



**HAL**  
open science

# Coopération homme-machine multiniveau entre une équipe d'opérateurs humains et des outils d'assistance : application au contrôle du trafic aérien

Frédéric Vanderhaegen

► **To cite this version:**

Frédéric Vanderhaegen. Coopération homme-machine multiniveau entre une équipe d'opérateurs humains et des outils d'assistance : application au contrôle du trafic aérien. Automatique / Robotique. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 1993. Français. NNT : 1993VALE0031 . tel-03432825

**HAL Id: tel-03432825**

**<https://uphf.hal.science/tel-03432825>**

Submitted on 17 Nov 2021

**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.

1993 VAE 0031

Numéro d'Ordre : 93-36

## THESE

présentée à  
l'Université de Valenciennes  
et du Hainaut-Cambrésis

pour l'obtention du  
**DOCTORAT**  
Spécialité  
AUTOMATIQUE  
INDUSTRIELLE ET HUMAINE

par  
**Frédéric VANDERHAEGEN**  
Maître ès Sciences

---

**COOPERATION HOMME-MACHINE  
MULTINIVEAU ENTRE UNE EQUIPE D'OPERATEURS  
HUMAINS ET DES OUTILS D'ASSISTANCE  
APPLICATION AU CONTROLE DU TRAFIC AERIEN**

---

Soutenu le 21 Décembre 1993 devant la commission d'examen :

Mme	:	Marie-Claude THOMAS	Rapporteur
MM	:	Pietro-Carlo CACCIABUE	Rapporteur
		Jean-Michel HOC	
		Noël MALVACHE	Président
		Patrick MILLOT	
		Pascal PLANCHON	
		Pierre VIDAL	Rapporteur



**THESE**

présentée à  
l'Université de Valenciennes  
et du Hainaut-Cambrésis

pour l'obtention du  
**DOCTORAT**  
Spécialité  
AUTOMATIQUE  
INDUSTRIELLE ET HUMAINE

par  
**Frédéric VANDERHAEGEN**  
Maître ès Sciences

---

**COOPERATION HOMME-MACHINE  
MULTINIVEAU ENTRE UNE EQUIPE D'OPERATEURS  
HUMAINS ET DES OUTILS D'ASSISTANCE  
APPLICATION AU CONTROLE DU TRAFIC AERIEN**

---

Soutenue le 21 Décembre 1993 devant la commission d'examen :

Mme	:	Marie-Claude THOMAS	Rapporteur
MM	:	Pietro-Carlo CACCIABUE	Rapporteur
		Jean-Michel HOC	
		Noël MALVACHE	Président
		Patrick MILLOT	
		Pascal PLANCHON	
		Pierre VIDAL	Rapporteur

A Monique et Jacques, mes parents,  
à Delphine, Isabelle, Pascale, mes sœurs,  
et à Bernard, mon frère.

---

## AVANT PROPOS

---

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au Laboratoire d'Automatique Industrielle et Humaine de l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, au sein de l'équipe Informatique Industrielle et Communication Homme-Machine dirigée par le Professeur Patrick MILLOT. Je tiens ici à lui témoigner toute ma reconnaissance pour le soutien et la confiance qu'il m'a accordés au cours de ce long travail.

Je remercie très vivement Madame Marie-Claude THOMAS, Professeur à l'Université de Nice et Directeur de Recherche au Laboratoire d'Informatique, Signaux et Systèmes de Sophia Antipolis, Monsieur Pietro-Carlo CACCIABUE, Directeur de Recherche et Chef du Secteur des Systèmes Socio-Techniques à l'Institut d'Informatique et d'Ingénierie des Systèmes à Ispra (Italie), et Monsieur le Professeur Pierre VIDAL, Directeur du Centre d'Automatique de Lille, d'être les rapporteurs de mon travail.

Je remercie Monsieur Jean-Michel HOC, Directeur de Recherche au CNRS, qui me fait l'honneur de participer à mon jury de thèse.

Mes remerciements s'adressent aussi à Monsieur le Professeur Noël MALVACHE, directeur du L.A.I.H., pour avoir accepté d'examiner ce travail et de siéger à la commission d'examen.

J'exprime également ma gratitude au personnel du Centre d'Etude de la Navigation Aérienne d'Athis-Mons. En particulier, je salue les contrôleurs et les ingénieurs du CENA qui ont participé activement à la première phase expérimentale de SPECTRA. De même, j'adresse mes remerciements à Monsieur Pascal PLANCHON, chef de la division Automatisation et Organisation du Contrôle au CENA, ainsi que Messieurs Hervé LE JEANNIC, Luc ANGERAND, Stéphane LY et Frédéric CHUPEAU, pour leur collaboration tout au long de la réalisation de ce travail.

Enfin, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à tous les chercheurs du LAIH, ainsi qu'à Isabelle OLIVEIRA pour leur soutien et leur sympathie. Plus particulièrement, je remercie Serge DEBERNARD et Igor CREVITS, chercheurs et collègues, sans lesquels ce travail n'aurait pu arriver à son terme.

---

## SOMMAIRE

---

INTRODUCTION GENERALE .....	7
CHAPITRE I - MODELISATION DE L'ACTIVITE HUMAINE COOPERATIVE DANS LA SUPERVISION DES SYSTEMES HOMME-MACHINE .....	10
Introduction .....	10
1. Organisation générale des systèmes de contrôle et de supervision .....	11
1.2. Fonctionnement général des systèmes automatisés ou semi-automatisés .....	11
1.2.1. Différents niveaux d'un système de contrôle et de supervision .....	11
1.2.2. Organisation de la commande des systèmes automatisés .....	12
1.2.3. Optimisation de la commande des systèmes automatisés .....	14
1.3. L'opérateur humain dans la boucle de supervision des systèmes complexes .....	15
1.3.1. Mécanismes et capacités de raisonnement chez l'opérateur humain .....	15
1.3.2. Modélisation du travail en équipe .....	18
* 1.3.3. Gestion temporelle et rôle des communications homme- homme .....	19 *
2. Modèles de la régulation de l'activité chez l'opérateur humain .....	21
2.1. Régulation par rétroaction .....	21
2.1.1. L'opérateur humain face à une tâche .....	21
2.1.2. Répartition des tâches dans une équipe de travail .....	22
2.2. Régulation par anticipation .....	23 *
2.3. Organisations humaines et régulation de l'activité .....	24
2.3.1. Pouvoirs décisionnels dans l'organisation sociale .....	25
2.3.2. Modes de coordination dans l'organisation du travail .....	25
2.3.3. Modes de coopération dans le travail coopératif .....	26
3. Les outils d'assistance pour la coopération homme-machine .....	27
3.1. Fonctions des systèmes d'assistance .....	28
3.2. Modes de coopération homme-machine .....	29
3.2.1. Coopération verticale .....	29
3.2.2. Coopération horizontale .....	30
3.3. Régulation de l'activité par la répartition dynamique implicite .....	31
3.3.1. Structure générale de la répartition dynamique implicite .....	31
3.3.2. Quelques modèles de répartition dynamique implicite des tâches .....	31
Synthèse et Conclusion .....	34
CHAPITRE II - COOPERATION MULTINIVEAU DANS UNE ORGANISATION MULTIPOSTE : EXEMPLE DU CONTROLE DU TRAFIC AERIEN .....	36
Introduction .....	36
1. Caractéristiques d'une organisation multiposte et coopération multiniveau .....	37
1.1. Mise en œuvre d'un système homme-machine dans une organisation multiposte .....	37
1.1.1. Méthodologie générale .....	37
1.1.2. Phase de conception .....	38
1.1.3. Phase d'évaluation .....	39
1.2. Réseau de communication dans une organisation multiposte .....	40

1.2.1. Description d'un poste de contrôle .....	40
1.2.2. Communications homme-machine .....	41
1.2.3. Structures organisationnelles globales .....	42
1.3. Principes d'une coopération homme-machine multiniveau .....	43
1.3.1. Affectation des tâches dans une organisation multiposte .....	44
1.3.2. Incomplétude statique et dynamique de la partageabilité .....	45
1.3.3. Autres problèmes d'affectation des tâches entre la machine et l'homme.....	47
1.3.4. Modes de gestion de la répartition des tâches dans un poste de contrôle .....	48
2. Coopération multiniveau dans le contrôle aérien .....	50
2.1. Présentation du contrôle du trafic aérien.....	50
2.1.1. Organisation globale du contrôle aérien .....	50
2.1.2. Fonctionnalités globales.....	51
2.1.3. Caractéristiques d'une position de contrôle.....	54
2.1.4. Le contrôleur radar et le contrôleur organique.....	55
2.2. Besoins d'assistance dans une position de contrôle .....	57
2.2.1. Besoins d'assistance dans le contrôle aérien.....	57
2.2.2. Découpage fonctionnel du contrôle du trafic aérien .....	59
2.2.3. Coopération homme-machine multiniveau dans le contrôle du trafic aérien .....	60
Conclusion .....	62

<b>CHAPITRE III - ETUDE DE FAISABILITE D'UNE REPARTITION DYNAMIQUE DES TACHES TACTIQUES DANS LE CONTROLE DU TRAFIC AERIEN .....</b>	<b>63</b>
Introduction .....	63
1. Mise en œuvre d'une répartition dynamique des tâches entre contrôleur radar et agent .....	64
1.1. Plate-forme expérimentale SPECTRA.....	64
1.1.1. Degré d'automatisation dans SPECTRA .....	64
1.1.2. Principes de répartition dynamique dans SPECTRA.....	66
1.1.3. Estimateurs d'exigence de tâches .....	67
1.1.4. Interfaces homme-machine de SPECTRA.....	68
1.2. Contexte expérimental .....	72
1.2.1. Données enregistrées en ligne.....	72
1.2.2. Questionnaires TLX.....	73
1.2.3. Autres questionnaires .....	75
1.2.4. Plan expérimental.....	76
2. Dépouillements des données expérimentales .....	77
2.1. Réponses aux questionnaires .....	77
2.1.1. Réponses générales sur le contexte expérimental .....	77
2.1.2. Réponses aux questions sur la charge de travail et la performance .....	78
2.1.3. Réponses concernant le mode explicite .....	78
2.1.4. Réponses concernant le mode implicite.....	79
2.1.5. Comparaison des deux modes.....	79
2.2. Résultats sur la charge de travail.....	80
2.2.1. Données TLX.....	80
2.2.2. Exigences mesurées et charge de travail subjective.....	81
2.3. Résultats concernant la performance .....	83
2.3.1. Critère économique et critère d'insécurité.....	83
2.3.2. Influence du niveau de coopération sur la performance globale .....	84
2.3.3. Liaison entre exigences de tâches et performance globale .....	85
Conclusion .....	87

<b>CHAPITRE IV- ORDONNANCEUR POUR L'AIDE AU PARTAGE DYNAMIQUE DES TACHES TACTIQUES</b> .....	88
Introduction .....	88
1. Caractéristiques humaines pour l'ordonnancement des tâches .....	89
1.1. Objectifs temporels du travail humain .....	89
1.2. La modélisation du temps chez l'opérateur humain .....	89
1.3. Les mécanismes humains pour l'ordonnancement des tâches .....	91
2. Répartition des tâches basée sur un ordonnanceur dynamique .....	93
2.1. Paramètres principaux d'un ordonnanceur .....	93
2.1.1. Niveaux décisionnels d'un ordonnanceur .....	93
2.1.2. Règles de priorité dans un ordonnanceur .....	94
2.1.3. Contraintes et évaluation des ordonnanceurs .....	94
2.2. Décision d'ordonnancement et décision d'affectation pour l'aide au partage des tâches entre opérateur humain et ordinateur .....	96
2.2.1. Formulation du problème .....	96
2.2.2. Caractérisation des ensembles de tâches .....	97
2.2.3. Caractéristiques générales des problèmes d'ordonnancement et d'affectation .....	99
2.3. Algorithmes de base .....	101
3. Mise en œuvre de la répartition des tâches entre processeur humain et coprocesseur artificiel .....	102
3.1. Modélisation par programmation dynamique .....	102
3.1.1. Principes de base .....	103
3.1.2. Système d'ordonnancement par programmation dynamique .....	103
3.1.3. Système d'affectation par programmation dynamique .....	105
3.2. Simplification du parcours combinatoire .....	107
3.2.1. Parcours arborescent et rupture de connexité .....	107
3.2.2. Illustration par un exemple .....	109
Conclusion .....	112
<b>CHAPITRE V - EVALUATION TECHNIQUE DE L'ORDONNANCEUR DYNAMIQUE EN VUE D'UNE COOPERATION MULTINIVEAU BIPOSTE DANS LE CONTROLE AERIEN</b> .....	113
Introduction .....	113
1. Evaluation technique de l'ordonnanceur dynamique .....	114
1.1. Formalisme simplifié des tâches de contrôle du trafic aérien .....	114
1.1.1. Recensement des tâches principales .....	114
1.1.2. Formalisation des tâches .....	117
1.2. Algorithmes pour les décisions d'ordonnancement et d'affectation .....	118
1.2.1. Décisions d'ordonnancement .....	118
1.2.2. Décisions d'affectation .....	122
2. Perspectives .....	125
2.1. Mise en œuvre d'une coopération multiniveau sur une position de contrôle .....	125
2.2. Structure de commande de la nouvelle organisation .....	126
2.3. Perspectives expérimentales .....	129
2.4. Vers une nouvelle organisation multiposte dans une salle de contrôle .....	130
Conclusion .....	131
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	133
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	136
<b>INDEX DES FIGURES</b> .....	146

---

## INTRODUCTION GENERALE

---

Un système homme-machine est défini comme une organisation dont les composantes sont des hommes et des machines reliés par un réseau de communication et travaillant ensemble pour atteindre un but commun, compte tenu des contraintes d'un environnement donné, /Sperandio, 88/. Dans le contrôle et la surveillance des procédés industriels, il se caractérise par un nombre important de variables en interaction qui évoluent dans le temps. Dans ce contexte, il s'agit précisément d'un système dynamique complexe dans lequel de nouvelles informations changent continuellement la nature du problème à résoudre, /Decortis et al, 91/.

On peut alors se demander si la complexité d'un système est telle qu'elle nécessite la présence de l'opérateur humain ou si, au contraire c'est la présence de l'opérateur humain qui est la cause principale de cette complexité, /Garot, 92/. En guise de réponse à ce dilemme, dans le cadre de l'automatisation des procédés industriels, le problème de la conception des systèmes homme-machine suscite beaucoup de réflexions scientifiques en automatique humaine, et en ergonomie.

Il est vrai que les critères de productivité et de sécurité de ce type de systèmes conduisent à une remise en question permanente du rôle de l'opérateur humain dans la boucle de contrôle et de surveillance. D'une part, l'augmentation de la complexité des machines nécessite l'automatisation de nombreuses tâches manuelles. D'autre part, la complexité de certaines d'entre elles impose une coopération homme-machine efficace afin d'assister l'opérateur humain. Le système homme-machine qui en résulte évolue donc constamment mettant en jeu à la fois des compétences techniques et humaines.

De ce fait, toute démarche d'automatisation doit prendre en compte d'une part les limites des supports techniques, et d'autre part celles des opérateurs humains. A partir du moment où les tâches qu'il doit exécuter sont bien définies, le calculateur sait effectuer des calculs précis et rapides. L'automatisation peut alors augmenter effectivement la productivité et la sécurité des systèmes, et améliorer les conditions de travail humain en effectuant des tâches difficilement réalisables par l'homme ou en déchargeant celui-ci d'un certain nombre de tâches. Or, lors d'une situation imprévue, le calculateur est incapable de construire une stratégie de récupération. C'est pourquoi, la présence humaine dans les tâches de contrôle/commande des systèmes complexes reste aujourd'hui encore indispensable.

Depuis quelques années, il semble que le concepteur, en fonction de la capacité technique des calculateurs de contrôle, fixe la répartition des tâches entre le niveau humain et le niveau technique, sans vraiment tenir compte des capacités de l'opérateur humain, /Debernard, 93/. Or, lorsqu'un système est totalement automatisable, son automatisation peut poser de graves problèmes dus à son niveau de faillibilité. De plus, à long terme, la baisse de la fréquence d'intervention humaine peut réduire la capacité de réaction de l'opérateur humain, dégrader ses connaissances, et par conséquent transformer un expert en un opérateur incompetent. La reprise en manuel du contrôle, suite à un incident par exemple, devient alors difficile, voire impossible.

Ainsi, dans la conception d'un système homme-machine, la définition du degré d'automatisation doit dépendre de la complexité du procédé étudié et des automatismes déjà implémentés, et de la connaissance des caractéristiques des opérateurs humains. A ce niveau, les automatismes doivent non seulement assurer la commande, mais aussi être un outil de travail pour l'homme. Lorsque cette commande est automatisée, elle doit être réversible, c'est-à-dire qu'elle doit pouvoir être prise en charge par l'opérateur humain, à tout moment, et vice versa

/Hollnagel et al, 93/. Les principes de coopération homme-machine répondent alors à ces exigences, /Millot, 88/, surtout lorsque les mécanismes interindividuels et intra-individuels mis en œuvre par les opérateurs humains pour réguler leur activité, deviennent insuffisants lors de situations surchargées. La coopération homme-machine consiste alors à apporter à l'opérateur humain soit une aide à la décision, soit une aide à l'action.

Ces principes sont à la base de notre recherche. Celle-ci consiste à établir les principes d'une coopération homme-machine multiniveau pour un système comportant plusieurs niveaux décisionnels humains. Notre domaine d'application est un procédé réel complexe. Il s'agit en effet du contrôle du trafic aérien pour lequel l'augmentation du trafic provoque parfois des états de surcharge de travail importants chez les aiguilleurs du ciel. Il est par conséquent nécessaire d'étudier l'apport d'outils d'assistance spécifiques, dans les supports de contrôle des contrôleurs aériens, afin de maintenir un niveau optimal de performance et de sécurité. Notre travail concerne la répartition dynamique des tâches entre un opérateur humain et un système automatisé. Il a été effectué au Laboratoire d'Automatique Industrielle et Humaine (URA CNRS 1118, URIAH) à l'Université de Valenciennes, en collaboration avec le CENA à Athis-Mons, Centre d'Etude de la Navigation Aérienne. L'objectif du CENA est de spécifier les futurs postes de contrôle aérien, afin de résoudre les problèmes induits par les prévisions du trafic des années 2000. Ce mémoire présente l'ensemble de notre étude suivant cinq chapitres.

Le premier chapitre présente les différents modèles qui expliquent la régulation de l'activité humaine. A partir d'une présentation générale d'un système homme-machine, et des caractéristiques des systèmes automatisés, notamment leurs limites et les dangers dus à une automatisation complète, ce chapitre analyse d'abord le rôle des opérateurs humains, en s'appuyant sur des modèles génériques individuels et collectifs. Dans la deuxième partie, divers modèles complémentaires propres à la régulation de l'activité humaine sont détaillés. Celle-ci peut également être facilitée à partir de régulateurs automatiques ou semi-automatiques, issus d'outils d'assistance particuliers. La troisième partie aborde donc les principes de coopération homme-machine qui permettent, par ailleurs, d'augmenter la capacité de travail de l'opérateur humain, par un filtrage de l'information, par une aide au diagnostic, ou encore par un partage dynamique des tâches entre l'homme et la machine.

Toutefois, les exemples d'application du premier chapitre concernent simplement un environnement mono-utilisateur. C'est pourquoi, le deuxième chapitre concerne les représentations des systèmes homme-machine plus réalistes dans lesquelles un réseau de communication homme-homme, homme-machine et machine-machine peut être instauré. A cet effet, il se base sur une définition d'un poste de contrôle qui permet de mettre en place des organisations monopostes et multipostes dans un environnement multi-utilisateur. Les principes de coopération homme-machine multiniveau sont alors explicités. Cette nouvelle approche est ensuite illustrée par l'exemple du contrôle du trafic aérien, depuis la gestion prévisionnelle à long terme du trafic jusqu'à sa supervision et son contrôle en temps réel. Notre étude concerne plus exactement une position de contrôle qui intègre un poste de contrôle radar et un poste de contrôle organique. Le premier gère les tâches tactiques, alors que le second s'occupe des tâches stratégiques. La coopération multiniveau que nous proposons d'expérimenter à partir d'une plateforme appelée SPECTRA, consiste alors en une répartition dynamique des tâches tactiques entre le contrôleur radar et un système expert, cette répartition étant prise en charge par le niveau stratégique.

Dans un premier temps, nous avons mené une étude de faisabilité d'une telle répartition, en intégrant dans SPECTRA le seul poste du contrôleur radar dans lequel les principes de répartition dynamique développés dans le premier chapitre ont été implémentés. Le troisième chapitre propose donc la démarche suivie pour cette première phase expérimentale de notre étude. Il détaille, d'une part l'ensemble du protocole expérimental réalisé pour la validation des concepts de base de SPECTRA, et d'autre part la globalité des résultats obtenus. Ces derniers montreront les conséquences des principes de répartition dynamique dans le domaine du contrôle aérien.

Même s'ils sont encourageants, l'absence du filtrage des données par le contrôleur organique (du niveau stratégique) soulève un certain manque de réalisme de la plate-forme et un partage non optimal des tâches. C'est pourquoi, en vue de mettre en œuvre une nouvelle plate-forme expérimentale intégrant les deux niveaux décisionnels et répondant en cela à la réalité du contrôle du trafic aérien dans une position de contrôle, le quatrième chapitre élabore les principes généraux d'une répartition dynamique de tâches basée sur un ordonnanceur dynamique. Cet ordonnanceur doit satisfaire les contraintes temps réel du système piloté. Son rôle est d'élaborer, à partir de données prévisionnelles mais en prenant en compte les aléas survenus au cours du temps, d'une part une phase décisionnelle de faisabilité d'ordonnancement des tâches que l'opérateur humain du niveau tactique devra réaliser, et d'autre part, une phase décisionnelle d'affectation de ces tâches, soit à l'opérateur humain, soit au système d'assistance. Dans la première phase, relativement aux contraintes temporelles des tâches affectées à l'opérateur humain, il s'agit de déterminer les sous-ensembles de tâches dont l'exécution risque d'être problématique. Dans la seconde, il s'agit de proposer des solutions d'affectation afin de résoudre ces problèmes de saturation de la ressource humaine, recensés dans la phase précédente.

A partir de ces principes, le dernier chapitre met alors en œuvre les algorithmes correspondants afin d'évaluer, en terme de temps de réponse et d'encombrement mémoire, les principes de répartition dynamique des tâches tactiques basée sur un ordonnanceur. Après cette phase de validation, différentes perspectives, concernant principalement la future architecture de SPECTRA, sont enfin apportées.

---

# CHAPITRE I - MODELISATION DE L'ACTIVITE HUMAINE COOPERATIVE DANS LA SUPERVISION DES SYSTEMES HOMME-MACHINE

---

## Introduction

La complexité des systèmes industriels actuels impose une présence humaine dans la boucle de supervision de ces systèmes pour d'une part assurer la surveillance du fonctionnement automatique et détecter d'éventuels dysfonctionnements, et d'autre part pour intervenir et corriger ces derniers. Un grand nombre d'études consacrées aux capacités et limites de l'opérateur humain dans la boucle de supervision ont contribué à dégager les facteurs ergonomiques qui permettent de conserver l'opérateur humain efficace, /Millot, 88/. Les principaux moyens consistent à réguler sa charge de travail, en lui affectant des tâches qui auraient pu être automatisées et ceci afin d'éviter une sous-charge de travail, ou au contraire en lui fournissant une aide à la décision ou à l'action en cas de surcharge, /Debernard, 93/. Toutefois, jusqu'à aujourd'hui, la majorité des études d'automatique humaine ont porté sur des postes de supervision mono-opérateur, alors que dans la réalité, la supervision est généralement assurée par plusieurs opérateurs qui coopèrent. Le but de ce chapitre est de présenter les différentes techniques de régulation de l'activité humaine pour la conduite et la supervision des systèmes complexes, en abordant non seulement l'activité humaine individuelle, mais aussi l'activité collective.

La première partie de ce chapitre introduit l'ensemble des caractéristiques d'un système de supervision, en considérant d'une part l'organisation des systèmes automatisés, et d'autre part le rôle des opérateurs humains. En rapport avec les limites des systèmes automatisés, elle soulève l'importance de la présence humaine pour la maîtrise de la complexité du procédé piloté.

L'opérateur humain est un régulateur de sa propre performance et de sa charge de travail. Il fonctionne comme un système en boucle fermée dans la mesure où sa prise de décision finale dépend directement ou indirectement des sorties du procédé contrôlé. De plus, ses capacités de résolution de problème pour la conduite et la supervision d'un système complexe, dépendent à la fois de ses aptitudes mentales et physiques, ainsi que des interactions entre les différentes personnes avec lesquelles il travaille. Ainsi, la deuxième partie de ce chapitre détaille-t-elle les mécanismes de régulation de l'activité individuelle et collective.

Toutefois, l'impossibilité d'automatiser toutes les tâches humaines d'une part et les limites des capacités de l'opérateur d'autre part nécessitent de repenser l'organisation des systèmes homme-machine, afin de maintenir le niveau de sécurité exigé par le système piloté. La dernière partie présente donc les principes de coopération homme-machine. Ceux-ci permettent d'intégrer, dans le système, des outils d'aide à l'action et/ou à la décision, destinés à réguler l'activité humaine, et à conserver l'opérateur humain actif dans la boucle de contrôle et de supervision.

## 1. Organisation générale des systèmes de contrôle et de supervision

L'impossibilité d'automatiser entièrement un système de contrôle et de supervision rend indispensable la présence humaine. Afin de mieux cerner le rôle de l'opérateur de supervision, nous présentons, d'abord l'organisation générale des systèmes de supervision, suivie de plusieurs approches de modélisation des activités humaines, incluant celles du travail collectif.

### 1.2. Fonctionnement général des systèmes automatisés ou semi-automatisés

Actuellement, des outils informatiques de plus en plus performants sont utilisés pour la conduite de systèmes industriels complexes. Le degré d'automatisation de ces derniers peut évoluer depuis le contrôle manuel, au contrôle de supervision, et même vers un contrôle entièrement automatique. La mise en œuvre d'un contrôle totalement automatisé reste toutefois envisageable qu'à très long terme. C'est pourquoi, l'opérateur humain reste nécessaire dans la boucle de contrôle et de surveillance d'un procédé quelconque. Cependant, du fait de ses capacités limitées et de la complexité grandissante des systèmes qu'il gère, l'opérateur ne peut piloter ces derniers sans l'assistance de systèmes d'aide à la décision ou d'autres opérateurs humains. Nous présentons d'abord les différents niveaux d'une structure de contrôle et de supervision, et ensuite nous en détaillons les modes de commande.

#### 1.2.1. Différents niveaux d'un système de contrôle et de supervision

Dans les infrastructures des systèmes de contrôle et de supervision, l'opérateur humain s'intègre dans un système homme-machine hiérarchisé regroupant quatre niveaux : le procédé industriel, ses calculateurs de commandes et de régulations locales, le niveau de supervision qui assure la coordination des unités locales, et plus généralement la surveillance des deux niveaux inférieures, et les opérateurs humains pour surveiller le procédé et intervenir lors de dysfonctionnements, /Sheridan, 85/, figure I-1.

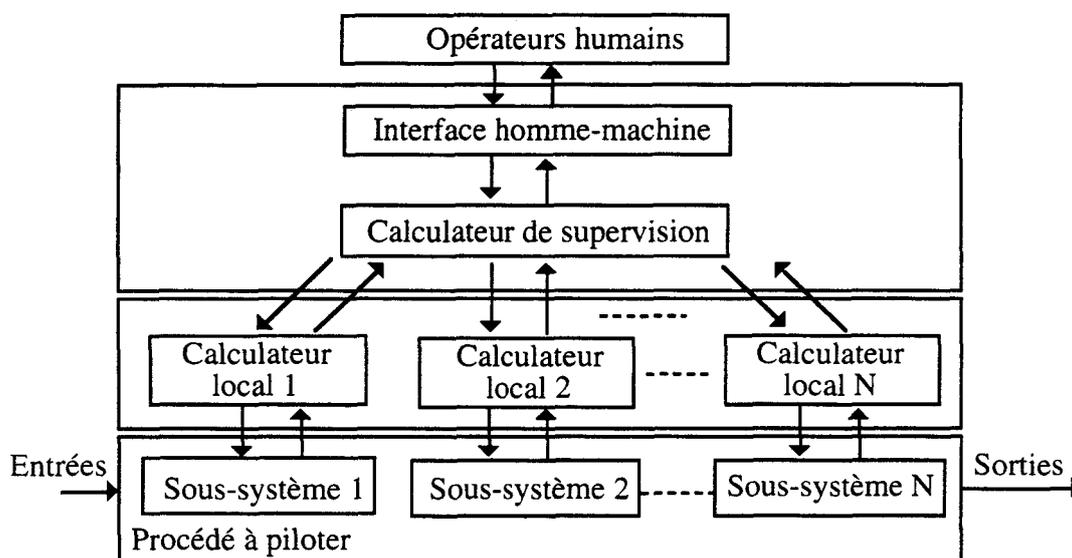


Figure I-1 : Architecture d'un système de contrôle et de supervision, adaptée de /Sheridan, 85/.

En règle générale, le système de commande automatique assure la conduite du procédé en fonctionnement normal. Les dispositifs de bas niveau gèrent la régulation des variables des sous-systèmes en fonction des consignes transmises par le calculateur de supervision. Celui-ci coordonne et adapte les stratégies de contrôle de chaque unité de commande locale, pour optimiser le fonctionnement du système global. Par contre, l'opérateur humain, à travers des interfaces de dialogue homme-machine adéquates, s'occupe de la définition des objectifs de conduite, et de la gestion des fonctionnements anormaux que le système automatique ne sait pas prendre en compte.

Globalement, ses tâches comprennent alors des tâches de transition pour le changement de régime du procédé, des tâches de contrôle et de suivi d'installation relatives à un fonctionnement normal, des tâches de détection de défaut et de diagnostic lors d'un dysfonctionnement, et enfin les tâches de compensation et de reprise des défauts, /Rouse, 83/.

L'automatisation totale ou partielle de l'ensemble de ces tâches vise à calquer les caractéristiques du raisonnement humain. Leur mise en œuvre s'effectue à partir de plusieurs architectures qui permettent de décrire les diverses interconnexions ou les décompositions fonctionnelles de la commande globale. En effet, dans le pilotage des procédés automatisés, celle-ci peut être décomposée selon plusieurs niveaux hiérarchiques, chacun d'eux ayant ses propres objectifs. Nous les abordons maintenant.

### 1.2.2. Organisation de la commande des systèmes automatisés

Les niveaux décisionnels et les objectifs de la commande automatisée caractérisent les différentes structures de base. Dans les structures à simple niveau, nous pouvons distinguer celles à simple objectif correspondant à la **commande centralisée**, et celles à plusieurs objectifs relatives à la **commande décentralisée**, /Titli, 79/. Par contre, les structures à plusieurs niveaux sont hiérarchisées. Elles présentent également des organisations à simple objectif, dites verticales, ou à plusieurs objectifs, dites horizontales.

Un problème de décision est souvent formulé de façon centralisée. Il s'agit d'une approche directe où les relations entre la commande et le processus sont considérées comme un tout, figure I-2. L'unité de commande prend des décisions à partir d'un ensemble de politiques préférentielles évaluées par des critères spécifiques, /Calvet et Bernussou, 87/. En fonction de l'état du système, le module de décision gère les variables de décision relatives à ces politiques et permet d'optimiser la commande du processus.

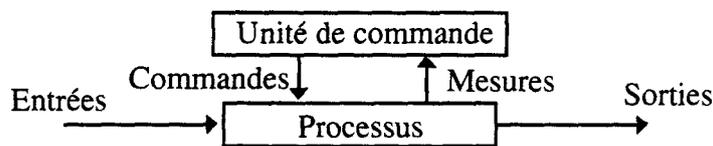


Figure I-2 : Commande centralisée, d'après /Titli, 79/.

Lorsque le processus global peut être considéré comme étant formé de sous-processus indépendants, il est alors possible de définir une organisation avec plusieurs décideurs ayant accès à différentes informations et exécutant différentes actions, figure I-3 : N décideurs semi-autonomes ont leur propre choix de politiques et un domaine d'actions limité sur le processus P. Ils interagissent soit pour se synchroniser et échanger des données, soit pour accéder à des ressources communes. Ils peuvent donc coopérer, ou alors entrer en compétition.

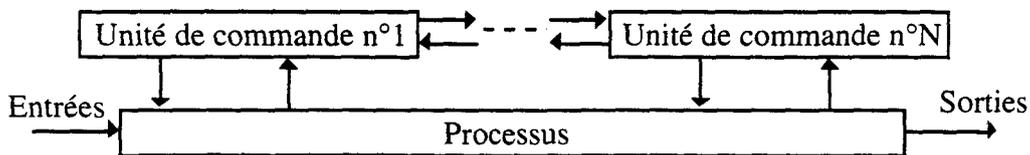
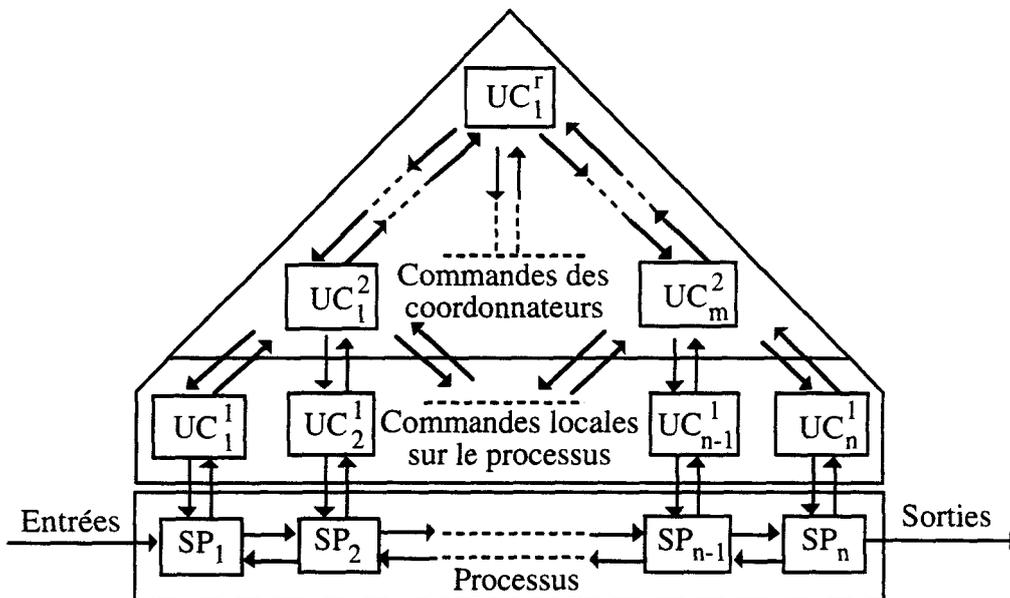


Figure I-3 : Commande décentralisée, d'après /Titli, 79/.

Toutefois, dans le cas d'un procédé complexe, de nombreuses variables mutuellement interdépendantes peuvent intervenir. C'est pourquoi, il est nécessaire de coordonner l'ensemble des unités locales afin d'optimiser le fonctionnement normal du procédé. Ceci est alors assuré par des niveaux supérieurs de commande, implantés dans le calculateur de supervision. Il s'agit d'autres structures basées sur plusieurs niveaux : les structures de **commande hiérarchisée**, figure I-4.

Celles-ci comprennent à la fois des structures verticales à simple objectif et des structures horizontales à plusieurs objectifs. Dans les premières, la fonction de commande globale est décomposée verticalement en différentes commandes élémentaires. Dans les secondes, le processus global est divisé en sous-processus plus simples, commandés selon des critères locaux. Le système de commande est alors constitué d'unités de commande disposées suivant une structure pyramidale hiérarchisée. Ces unités de commande sont réparties sur deux niveaux ou plus. Certaines d'entre elles n'ont qu'un accès indirect au processus à commander : elles reçoivent des informations des unités supérieures et inférieures, puis les traitent pour commander ensuite d'autres unités qui leur sont inférieures dans la hiérarchie. De plus, les unités de commande d'un même niveau ont des objectifs différents qui peuvent parfois être en conflit. C'est pourquoi des unités spécifiques du niveau supérieur, appelées "coordonnateurs", permettent de résoudre ces conflits éventuels et d'atteindre la solution optimale. Parmi les coordonnateurs les plus connus, nous pouvons citer par exemple les ordonnanceurs qui optimisent la répartition des tâches, des informations ou des ressources.



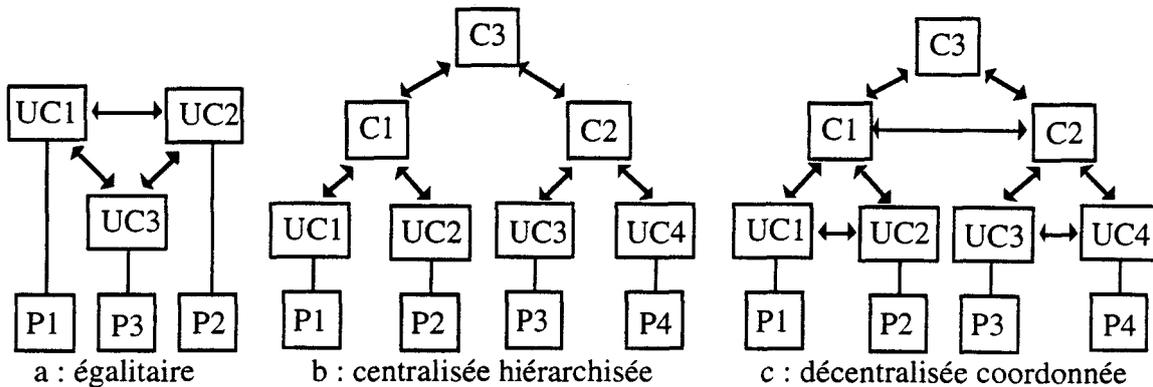
$UC_i^j$  : Unité de commande n° i du niveau n° j de la hiérarchie  
 $SP_i$  : Sous-processus n° i

Figure I-4 : Commande hiérarchisée, d'après /Titli, 79/.

Ces structures élémentaires peuvent être couplées et former des **organisations hybrides**. Par exemple, Froment et Lesage /89/ distinguent trois types de structures fonctionnelles pour la commande des systèmes de conduite, figure I-5 : égalitaire, centralisée hiérarchisée, décentralisée coordonnée.

- Dans la structure **égalitaire** (figure I-5-a), chaque unité de commande est un système intelligent, capable de dialoguer directement avec les autres. Elle coopère en communiquant soit par des échanges d'informations et de solutions partielles au moyen d'une base de connaissance commune appelée blackboard, soit par des messages, /Chaib Draa, 90/. Il convient de noter que cette structure est beaucoup plus familière en Intelligence Artificielle Distribuée (IAD) pour la mise en œuvre des organisations décisionnelles automatisées pour la commande et la supervision de systèmes complexes.
- Les unités de commande d'une structure **centralisée hiérarchisée** (figure I-5-b), du fait de leur autonomie, doivent faire appel à un coordonnateur pour dialoguer entre elles. Par exemple,  $UC_1$  et  $UC_2$  n'échangent des informations que par l'intermédiaire du coordonnateur  $C_1$ .

- La structure **décentralisée mais coordonnée** (figure I-5-c) est une superposition des deux précédentes. Par exemple, C1 et C2 ont des relations de coordination alors que UC1 et UC2 ont des relations de coopération.



C<sub>i</sub> : Coordonnateur n°i

UC<sub>i</sub> : Unité de commande n°i

P<sub>i</sub> : Processus ou sous-processus n°i

Figure I-5 : Structures des systèmes de conduite.

Les unités de commande locales et les coordonnateurs ont chacun leur propre processus décisionnel et leurs propres critères. Ces derniers permettent de choisir une stratégie optimale pour commander le processus. Les caractéristiques liées à l'optimisation de la commande sont maintenant abordées.

### 1.2.3. Optimisation de la commande des systèmes automatisés

Cette partie présente brièvement différents types de méthodes qui permettent d'optimiser les procédures décisionnelles d'un système automatisé. La complexité de formulation des problèmes de décision est due à leur grande diversité. Chaque processus est en général caractérisé par un modèle mathématique, déterminé à partir de méthodes d'identification et par une mesure de performance, /Calvet et Bernusson, 87/. Les valeurs des paramètres d'entrée du processus sont choisies afin de minimiser l'écart entre la sortie réelle observée et celle prédite par le modèle. Le critère de performance peut prendre en compte le temps de production, le coût de fonctionnement, le rendement, la sécurité..., plusieurs de ces critères pouvant d'ailleurs être agrégés. Cependant, la modification de certains paramètres supposés constants, due par exemple à l'usure de composants ne permet plus d'obtenir la commande optimale à partir du modèle mathématique statique. C'est pourquoi, les techniques de la commande adaptative sont parfois utilisées afin de réaliser ou de maintenir un certain niveau de performance, surtout quand les paramètres du système à commander sont inconnus ou variables dans le temps, /Tang, 89/.

Dans tous les cas, il s'agit d'un problème d'optimisation, défini de la manière suivante, /Faurre, 88/ :

*Une variable physique ou une variable de décision ou de commande doit être choisie de façon optimale, c'est à dire de façon à optimiser (minimiser ou maximiser selon les cas) un critère physique (action, énergie ...), un critère technique (précision, stabilité, durée ...) ou économique (coût, rentabilité, productivité) tout en respectant certaines contraintes techniques intrinsèques à la situation considérée.*

Trois classes de méthodes d'optimisation peuvent être distinguées :

- La première classe est celle des méthodes issues de la recherche opérationnelle. Parmi elles, nous pouvons citer la programmation linéaire, la programmation dynamique, la

théorie des graphes, la théorie des jeux dynamiques, les méthodes arborescentes. Ces méthodes permettent de résoudre divers problèmes déterministes, stochastiques. Elles s'appliquent dans plusieurs domaines : les problèmes d'affectation, d'ordonnancement, de chemins optimaux, de concurrence... /Faure, 87/.

- Les méthodes issues de l'Intelligence Artificielle complètent les problèmes difficiles à résoudre avec les techniques de recherche opérationnelle. Elles utilisent des modes différents de représentation de la connaissance comme la représentation logique, les réseaux sémantiques, /Cartignies, 93/.
- Les méthodes heuristiques, basées sur des règles de priorité statiques et dynamiques, et sur des méthodes de décomposition spatiale ou temporelle, permettent en général de choisir une solution parmi plusieurs, ou de faciliter la résolution du problème par des raccourcis éventuels, /Artiba, 90; Esquirol, 87/.

La commande automatique a libéré les opérateurs humains des tâches de bas niveau. Ainsi, leur charge de travail physique a pu être diminuée, la performance globale de la production améliorée. Toutefois, pour des cas trop complexes, l'automatisation ne permet pas actuellement d'assurer la totalité des activités de contrôle. En effet, elle est limitée par la difficulté de modéliser le système et de ce fait une solution optimale théorique n'est souvent qu'une approximation acceptable de la réalité, /Tang, 89/. Lorsque certains éléments importants sont ignorés dans cette approximation, le procédé peut se comporter d'une manière inattendue. De plus, d'une part, aucun système automatisé n'est à l'abri d'une défaillance éventuelle, et d'autre part, tout système de commande automatique est figé puisqu'il n'est capable d'exécuter qu'un programme prédéfini. Ces manques de **fiabilité** et de **flexibilité** peuvent être catastrophiques pour la sécurité du système. C'est pourquoi, le rôle de l'opérateur humain, surtout pour les tâches de résolution de problème reste indispensable.

### **1.3. L'opérateur humain dans la boucle de supervision des systèmes complexes**

Dans les systèmes automatisés, l'opérateur humain n'est plus en contact direct avec la machine. Il se construit alors une représentation mentale, c'est-à-dire un modèle simplifié du comportement du système qu'il contrôle. Ce modèle lui permet d'établir des relations fonctionnelles entre les réponses et les actions sur les commandes qu'il entreprend. Il est en fait mis à jour à partir, d'une part des mécanismes individuels du raisonnement humain dans la résolution de problème, et d'autre part des interactions entre opérateurs humains. La complexité du système peut être ainsi maîtrisée.

#### **1.3.1. Mécanismes et capacités de raisonnement chez l'opérateur humain**

Dans le pilotage des systèmes complexes, l'opérateur humain réagit en fonction de stimuli externes qui sont l'interprétation des signaux issus du procédé. Il peut alors être assimilé à un processeur, ou plus exactement, à un système de traitement d'informations régi par des règles, /Card et al, 83/, figure I-6.

Ce modèle du processeur humain comprend trois sous-systèmes interdépendants : perceptif, moteur et cognitif. Le système perceptif est l'ensemble des sous-systèmes spécialisés dans le traitement d'une classe de stimuli. Le système moteur est responsable des mouvements et des actions de l'opérateur. Enfin, le système cognitif contient le processeur de traitement des informations, et les mémoires à court et long terme. Il contrôle le transfert d'information entre ces deux mémoires, ainsi que le comportement de l'opérateur en fonction du contenu de la mémoire à court terme. Chaque système dispose, d'une part, d'une mémoire dont les performances se caractérisent par la persistance de l'information mémorisée, par la capacité de mémorisation d'information, et enfin par le type d'information mémorisée. D'autre part, il comprend un processeur limité par le cycle d'accès à sa mémoire locale.

Plusieurs tentatives de modélisation des interconnexions entre les différents sous-systèmes ont été menées parmi lesquelles une approche fondée sur les réseaux de neurones. En effet, ces

derniers sont assimilés à un système multiprocesseur dans lequel les composants communiquent entre eux en se transmettant, soit en parallèle, soit en série, des signaux d'activation ou d'inhibition, /Durand, 87/. Par un processus associatif, le réseau facilite, d'une part le mécanisme de stockage dans la mémoire à long terme par la possibilité de rattacher toute nouvelle information à une information déjà existante ou analogue, et d'autre part le mécanisme de recherche de données. Il permet ainsi la mise à jour, en temps réel, de la représentation mentale que l'opérateur a du système.

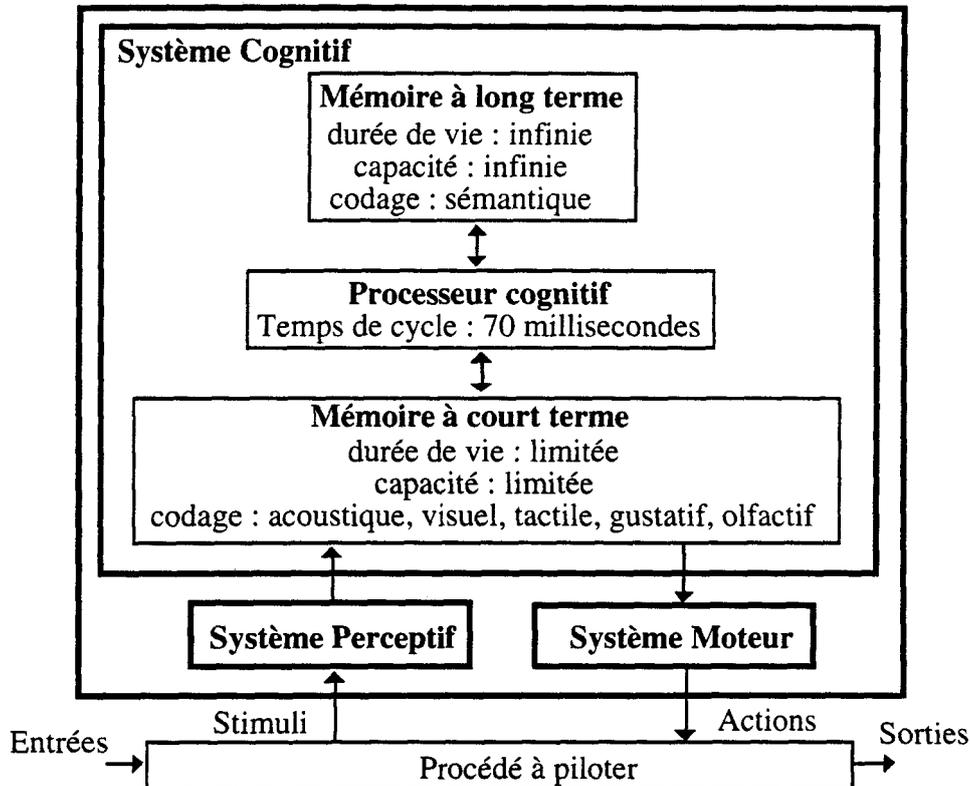


Figure I-6 : Modèle du processeur humain, adapté de /Card et al, 83/.

La démarche générale pour la prise de décision comporte quatre étapes de traitement de l'information, /Rasmussen, 80/ :

- La première étape consiste en l'acquisition de l'information et la détection d'un événement anormal. La détection d'un événement anormal met alors l'opérateur en état d'alerte. Cet état peut être provoqué soit par une alarme, soit par l'observation de l'évolution anormale d'une ou plusieurs variables.
- La deuxième étape est le traitement de l'information afin d'évaluer la situation. L'opérateur observe l'ensemble des informations utiles de façon à identifier l'état du procédé.
- La troisième étape correspond à la prise de décision. Compte tenu de l'état identifié à l'étape précédente et de ses objectifs de conduite, l'opérateur définit une stratégie générale de reprise du défaut détecté. Il décompose celle-ci en tâches, puis en procédures d'actions.
- Enfin, la dernière étape est l'exécution des actions, suite au processus décisionnel mis en œuvre précédemment.

Il est important de noter que le modèle de Rasmussen /80/ considère la mise en œuvre séquentielle de ces quatre étapes. Or des études plus récentes, /Hoc, 93; Bainbridge, 93/ montrent qu'il n'en est rien et que l'enchaînement de ces étapes est dicté par la tâche elle-même, l'opérateur humain pouvant être amené par exemple à effectuer plusieurs cycles "observation d'information - évaluation de la situation" avant de prendre sa décision et de la concrétiser par une ou plusieurs actions. De même, l'exécution d'une action ne constitue généralement pas la fin de la résolution de

problème, mais conduit à de nouvelles observations de variables et à des évaluations de l'état du processus afin d'évaluer l'efficacité de l'action précédente.

En outre, l'opérateur humain n'effectue pas systématiquement l'ensemble des étapes du modèle, surtout lorsqu'il est face à une situation connue. Il adopte en effet différents comportements en fonction de la situation rencontrée.

Trois types de comportements humains dans lesquels les stimuli sont interprétés comme des "symboles", ou comme des "signes", ou encore comme des "signaux", caractérisent la prise de décision finale, /Rasmussen, 83/, figure I-7 :

- Le premier comportement concerne les habiletés. L'opérateur exécute de façon quasi-automatique des actions en réponse à des informations perçues comme des "signaux". Ces derniers correspondent à un type de communication donnant des indications sur la situation courante de l'environnement.
- Lorsque l'opérateur est face à une situation familière, il adopte un comportement basé sur des règles. Celles-ci permettent d'identifier l'état du procédé et de choisir rapidement la procédure appropriée. Les informations sont ici perçues sous forme de "signes" qui peuvent être directement associés à une situation connue.
- Enfin, face à des situations nouvelles, l'opérateur adopte un comportement basé sur les connaissances. L'information est perçue alors sous forme de "symboles".

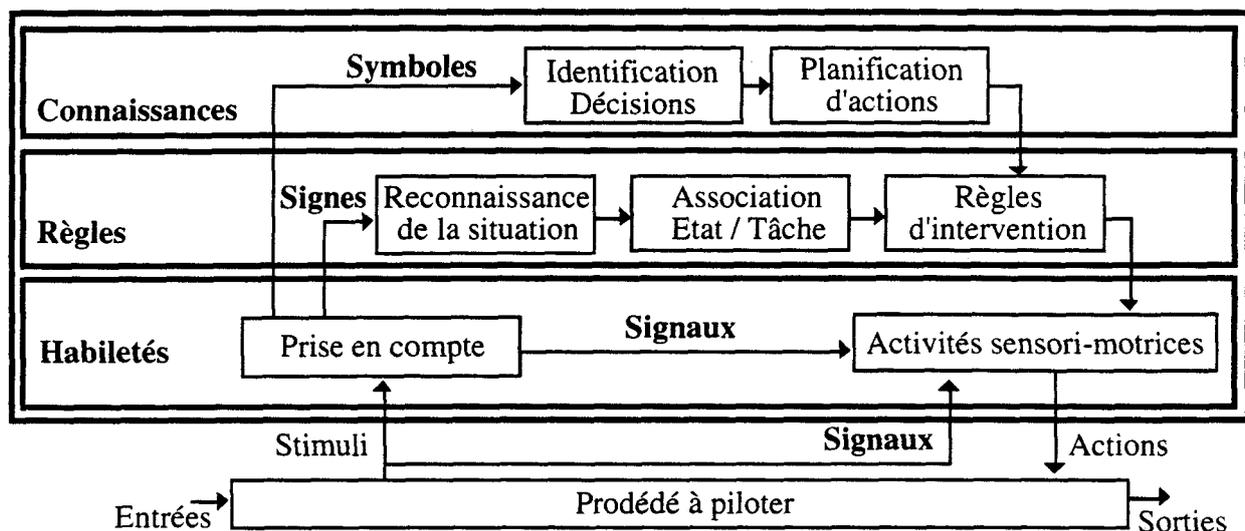


Figure I-7 : Modèle de résolution de problème, adapté de /Rasmussen, 83/.

Comme précédemment, il convient de remarquer que l'opérateur n'adopte pas exclusivement un seul type de comportement lors de la résolution d'un problème complexe, mais qu'il peut, par exemple, s'appuyer d'abord sur ses habiletés pour générer une action préliminaire conservatoire ou sécuritaire afin de stabiliser son processus, et ensuite adopter un comportement basé sur des règles ou sur la connaissance pour diagnostiquer précisément les dysfonctionnements et effectuer la ou les actions adéquates, /Bainbridge, 93/.

Néanmoins, d'un point de vue ergonomique, ces modèles permettent d'identifier les différentes activités humaines et en particulier celles qui nécessitent une assistance soit de la part d'autres opérateurs, soit de la part d'outils logiciels. Il s'agit principalement d'une aide au diagnostic pour l'observation des informations et l'évaluation de la situation, d'une aide à la prise de décision pour l'élaboration de l'action corrective, ou même d'une aide à l'action.

Dans la maîtrise de la complexité d'un système, la dimension collective est aussi un atout essentiel, /Prome, 92/, puisqu'il est parfois difficile, voire impossible, de réaliser individuellement

une tâche avec autant de rapidité et d'efficacité que collectivement, /Schmidt, 91/. La dimension collective dans le travail humain est abordée ci-après.

### 1.3.2. Modélisation du travail en équipe

L'équipe au travail est définie ici comme "un ensemble de plusieurs individus qui interagissent indépendamment et adaptativement pour atteindre des objectifs spécifiques et/ou partagés", /Baker et Salas, 92/. Le travail d'équipe sous-entend donc que les opérateurs coopèrent et coordonnent leurs activités. A partir des concepts particuliers au travail collectif, des modèles cognitifs, tels que le modèle du Référentiel commun, complété par le modèle de la Cellule Dynamique de Travail permettent de représenter les caractéristiques d'une équipe.

Avant de détailler ces modèles, plusieurs notions doivent d'abord être précisées. L'activité est ce que l'opérateur met en jeu pour exécuter une tâche, définie ici comme un but à atteindre dans des conditions plus ou moins prédéterminées. Elle inclut à la fois les comportements observables et inobservables. Elle est la réponse de l'opérateur humain à la tâche prescrite qui constitue un comportement standard théorique à réaliser /Leplat, 91b/. Son modèle représente la tâche réellement exécutée, c'est-à-dire la tâche effective. En outre, une tâche est collective si son exécution demande l'intervention de plusieurs opérateurs. L'activité collective peut être alors définie comme celle qui est effectuée par un ensemble d'opérateurs humains travaillant dans un même but, qui se sont concertés à cet effet, qui coordonnent leur activité et qui coopèrent /Desnoyers, 92/. En fait, il y a activité collective si ces derniers partagent le même but et coactivité, s'ils travaillent ensemble mais ont des buts différents /Leplat, 91a/.

Du point de vue cognitif, le modèle du **Référentiel Commun** est un modèle de l'activité collective, /De Terssac et Chabaud, 91; Leplat, 91b/. C'est une représentation fonctionnelle commune aux opérateurs humains, permettant d'orienter et de contrôler l'activité que ces derniers exécutent collectivement. Par conséquent, puisque leurs fonctions sont spécifiques, il leur permet de communiquer entre eux, de comprendre les décisions de chacun, de transférer les données utiles... Un référentiel commun minimum est donc nécessaire dans le travail collectif pour coopérer. Il évolue constamment compte tenu de l'expérience des opérateurs et de l'histoire de l'équipe. En fait, les différentes caractéristiques du Référentiel Commun sont les suivantes :

- Il est opératif et éphémère. Il présente une séquence opératoire propre aux caractéristiques du système et des opérateurs humains à un instant donné.
- Il prépare et permet la mise en commun des compétences. Il permet ainsi d'augmenter les limites de l'espace de compétence de chacun, par l'échange des connaissances individuelles, et celles de l'espace de compétence du collectif, par l'exploitation des compétences de chacun. Cette mise en commun est fonction des connaissances qui sont de deux types :
  - le savoir : connaissances déclaratives générales, acquises au cours de formations structurées,
  - le savoir-faire : connaissances opératives, nécessaires pour des cas particuliers, et connaissances routinières, générées sans contrôle conscient par des automatismes de traitement.

D'une manière abstraite, ce modèle est l'intersection des représentations fonctionnelles des opérateurs humains participant à une tâche collective. Cependant, il ne considère que des situations de travail pour lesquelles les compétences des équipiers sont spécifiques. C'est pourquoi, il peut être complété par un autre modèle qui intègre les recouvrements éventuels relatifs aux fonctions partageables entre plusieurs opérateurs humains : la **Cellule Dynamique de Travail**. Celle-ci est définie, autour d'une mission, comme un ensemble variable d'opérateurs humains qui ont leurs propres fonctions. Ces dernières peuvent ne pas être directement liées à la mission. Les opérateurs humains les activent suite aux exigences matérielles et humaines, /Courteix-Kherouf et Navarro, 92/. Ce concept permet d'expliquer le travail coopératif, et met en avant l'aspect dynamique de la composante collective. Un de ses objectifs est de déterminer les compétences spécifiques de chaque opérateur et les compétences partageables entre eux, figure I-8.

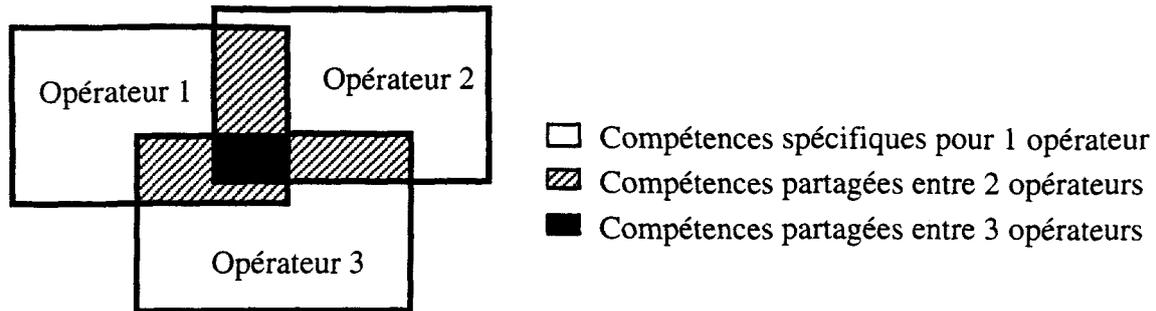


Figure I-8 : Cellule Dynamique de Travail, adaptée de /Courteix-Kherouf et Navarro, 92/.

Certaines situations de travail ne présentent pas une grande "dépendance cognitive" entre les activités individuelles. Les compétences majoritaires sont alors spécifiques. Par contre, d'autres situations de travail nécessitent un haut niveau d'imbrication des tâches. Le niveau de connexion fonctionnelle étant très élevé, les compétences partagées entre les opérateurs sont importantes. L'aspect dynamique de la Cellule Dynamique de Travail est caractérisé par le fait, d'une part, qu'une fonction ou une partie d'une fonction peut être réalisée par tel ou tel opérateur humain, et d'autre part, par le nombre d'opérateurs qui peut varier selon la situation de travail rencontrée.

Le travail d'équipe est également caractérisé par la capacité des membres à gérer au mieux les informations en fonction de la compétence et de la faiblesse de chacun, /Baker et Salas, 92/. Il correspond également à la capacité des membres à travailler ensemble, à anticiper les besoins de chacun, à inspirer une **confiance** réciproque et à **communiquer** efficacement. Le rôle des communications homme-homme dans la résolution de problème permet en effet la mise à jour du Référentiel Commun et de la Cellule Dynamique de Travail. Il mérite ainsi d'être soulevé.

### 1.3.3. Gestion temporelle et rôle des communications homme-homme

La communication joue un rôle essentiel au sein d'une équipe, surtout lors de la résolution d'un problème. Elle permet d'effectuer les activités collectives principales : la **coopération** et la **coordination**. En particulier, la communication pour le partage des connaissances et des représentations est mise en place par les mécanismes de **coopération**, /Navarro, 91/. Ces derniers aident à réaliser le partage des tâches et des résultats partiels. De plus, ils mettent en jeu la polyvalence des opérateurs humains en fonction des compétences de chacun.

Les communications pour la **coordination** de l'exécution des tâches sont également importantes dans les activités collectives. En fait, elles permettent, d'une part, de choisir les actions appropriées pour obtenir la communauté des buts visés et pour effectuer les actions adéquates. D'autre part, elles sont nécessaires lors de la mise en ordre temporelle de ces actions, /Navarro, 91/. Savoyant /85/ inclut dans la maîtrise de cette dimension temporelle, non seulement la simultanéité des actions individuelles, relative à la coactivité, mais aussi la synchronisation des actions collectives, relative à l'activité collective. La gestion temporelle dans le contrôle et la supervision d'un système est justifiée par les différentes actions effectuées par un opérateur humain, /De Keyser, 90; Decortis et al, 91/ :

- L'**évaluation temporelle** du système est l'évaluation constante de l'organisation temporelle des actions et des événements.
- La **coordination** du système est le transfert des informations vers les différents membres d'une équipe.
- L'**intégration du système** pour l'exécution des actions directes ou indirectes vise la transformation en temps réel de l'état du système.
- La **planification temporelle** du système est l'organisation de la gestion temporelle des activités à effectuer sur le système en prenant en compte l'état passé, présent et futur.

- Enfin, le **diagnostic dynamique** est le diagnostic des perturbations éventuelles. Il permet de revoir l'interprétation initiale en fonction des nouvelles informations qui arrivent régulièrement.

La coordination temporelle est surtout gérée à partir des communications verbales qui informent les équipiers concernés sur l'évolution normale ou anormale du procédé, /Van Dæle et De Keyser, 91/. Les opérateurs humains ont en effet besoin de connaître à chaque instant "qui fait quoi, quand, pour combien de temps". Quand l'un des membres de l'équipe demande des informations complémentaires afin de l'aider à situer le travail temporellement, il peut recevoir aussi des informations caractérisant les dysfonctionnements du procédé. Ces deux types d'informations lui permettent alors de mettre à jour sa mémoire opérationnelle sur le système. En fait, dans la résolution de problème, deux types de communications peuvent être distingués, /Van Dæle et De Keyser, 91/. Le premier est lié à une chronologie habituelle des actions. Il aide l'opérateur humain à vérifier son plan d'actions initial, et à déterminer la durée probable des exécutions. Le second est utile lorsqu'une chronologie inhabituelle des actions est nécessaire. Le problème est alors de déterminer quand les actions doivent commencer, et quand elles se termineront. Si l'information relative à une situation inhabituelle n'est pas disponible ou est inexistante sur les supports techniques d'information, et si l'opérateur humain n'a pas la connaissance suffisante pour la déduire ou la prédire, alors il se trouve dans une situation difficile. Pour surmonter une partie du problème, tout en respectant les contraintes temporelles des tâches, l'opérateur a tendance à favoriser les communications homme-homme, /Van Dæle et De Keyser, 91/. Le manque d'information et de compétence expliquent donc l'intérêt des communications homme-homme. Globalement, celles-ci permettent, /Navarro, 91/ :

- d'orienter les actions (préparation de l'action, choix des moyens...),
- de les exécuter (transmission des ordres, des informations...),
- de contrôler leur exécution (coordination des actions...),
- d'évaluer les résultats (conséquences des exécutions sur la performance, sur les erreurs, ou sur la charge de travail...).

Elles peuvent être classées selon une taxonomie générale, /Navarro, 92/ :

- les communications pour la réalisation d'actions mutuelles, coopératives,
- les communications pour la mise en commun des connaissances,
- et les communications fonctionnelles ayant un degré de pertinence élevé, permettant de transmettre des informations adaptées à l'interlocuteur ; dans ce type de communication, sont intégrés, par exemple, les langages opératifs /Falzon, 89/ ou les langages gestuels /Lechevin et Lanoë, 92/.

Ces communications peuvent être le reflet d'une régulation de l'activité de l'homme. En effet, afin de maintenir les performances nominales du système homme-machine, la fréquence des communications, leur codage, leur sémantique et la longueur des messages transmis varient en fonction de la situation de travail, des contraintes temporelles et spatiales ou de la charge de travail des opérateurs, /Savoyant, 77; Navarro, 87/.

L'automatisation entraîne également une irrégularité évidente de la charge de travail humaine. En effet, elle génère une baisse de la fréquence d'intervention humaine, donc une réduction de la charge globale des opérateurs, mais simplement en régime de fonctionnement normal. Par contre, en cas de dysfonctionnement où l'intervention humaine est nécessaire, l'opérateur peut être amené à gérer subitement une quantité importante d'informations. Il se trouve alors en surcharge de travail. Or, l'opérateur humain est capable de gérer cette fluctuation de la charge de travail, en modifiant par exemple ses communications, comme nous venons de le voir. Par conséquent, les modèles génériques du fonctionnement humain doivent être complétés par les différents mécanismes permettant la régulation de l'activité individuelle et collective qui sont abordés au paragraphe suivant. A partir de nouveaux modèles, plusieurs facteurs humains individuels et

collectifs pour la régulation de l'activité permettent d'expliquer la gestion des modes opératoires d'un opérateur humain et ceux de ses équipiers.

## 2. Modèles de la régulation de l'activité chez l'opérateur humain

La régulation de l'activité s'effectue selon deux plans, le **plan cognitif** et le **plan intensif**, /Navarro, 91/. La régulation au plan cognitif correspond à une régulation de l'activité par la connaissance des résultats obtenus, c'est-à-dire relative à la performance plus ou moins bonne qui s'exprime, par exemple, en termes d'écart entre les consignes et les sorties, de qualité du produit obtenu, ou du taux d'erreurs. La régulation selon le plan intensif permet une régulation de l'activité par la comparaison entre le niveau de charge de travail toléré et le niveau de charge ressenti.

Ces notions se retrouvent dans plusieurs modèles caractérisant les mécanismes de la régulation de l'activité humaine, et que nous présentons ci-après. Nous les avons regroupés en deux classes : la première classe concerne les modèles de régulation par rétroaction, la seconde regroupe les modèles de régulation par anticipation. Enfin, différents types d'organisations humaines sont développés afin de montrer l'influence de leur constitution sur cette régulation.

### 2.1. Régulation par rétroaction

La régulation par rétroaction est fonction des résultats obtenus, tant sur le plan cognitif que sur le plan intensif. Le premier modèle que nous décrivons concerne l'autorégulation chez un opérateur humain, alors que le deuxième aborde la régulation de l'activité d'une équipe de travail.

#### 2.1.1. L'opérateur humain face à une tâche

Ce modèle concerne l'opérateur humain seul face à une tâche et explique l'autorégulation, par l'adaptation des modes opératoires humains en fonction de paramètres particuliers, /Millot, 88/. Plusieurs mécanismes humains aident à effectuer la régulation de l'activité. Ils sont basés sur trois boucles principales relatives à la performance obtenue, à la charge de travail et à l'état de l'opérateur, figure I-9.

Les entrées du modèle sont les exigences fonctionnelles et temporelles des tâches à réaliser, c'est-à-dire des objectifs, de la complexité et de la difficulté de celles-ci. Elles permettent de déterminer les résultats à atteindre. Les sorties sont les tâches exécutées sur le procédé. L'évolution de celui-ci, suite aux actions humaines, permet d'évaluer les performances obtenues. Dans la première boucle, l'opérateur régule sa performance, compte tenu des exigences des tâches, en choisissant les modes opératoires adéquats. L'exécution de ces derniers se traduit par une charge de travail, définie comme *le niveau d'activité mentale, sensori-motrice et physiologique nécessaire pour accomplir une tâche*, /Spérandio, 88/.

La régulation de cette charge de travail constitue ainsi la deuxième boucle. En effet, l'opérateur choisit ses modes opératoires afin de réguler son niveau de charge de travail, dans la limite de sa capacité de travail disponible après avoir traité les nuisances physiques de type vibratoire, sonore, lumineux ou thermique de l'environnement de travail. Enfin, la dernière boucle de régulation caractérise la capacité de travail maximale. Celle-ci peut évoluer selon l'état physiologique, psychologique et cognitif des individus.

Afin de maintenir une charge de travail acceptable, l'opérateur humain adopte des stratégies plus "économiques" qui entraînent, par exemple, une modification de la pertinence des informations, /Bouju et Spérandio, 78/. Ce comportement influence donc les modes opératoires, ainsi que les critères de décision associés. De plus, la variation des stratégies opératoires et de la capacité de travail permettent de maintenir un coût opératoire acceptable, c'est-à-dire, un niveau de performance satisfaisant sans atteindre la saturation. Lorsque l'opérateur humain ne peut plus compenser l'augmentation des exigences des tâches, il est alors en état de surcharge de travail.

Cette dernière peut provoquer une dégradation des performances et une augmentation du risque d'erreur.

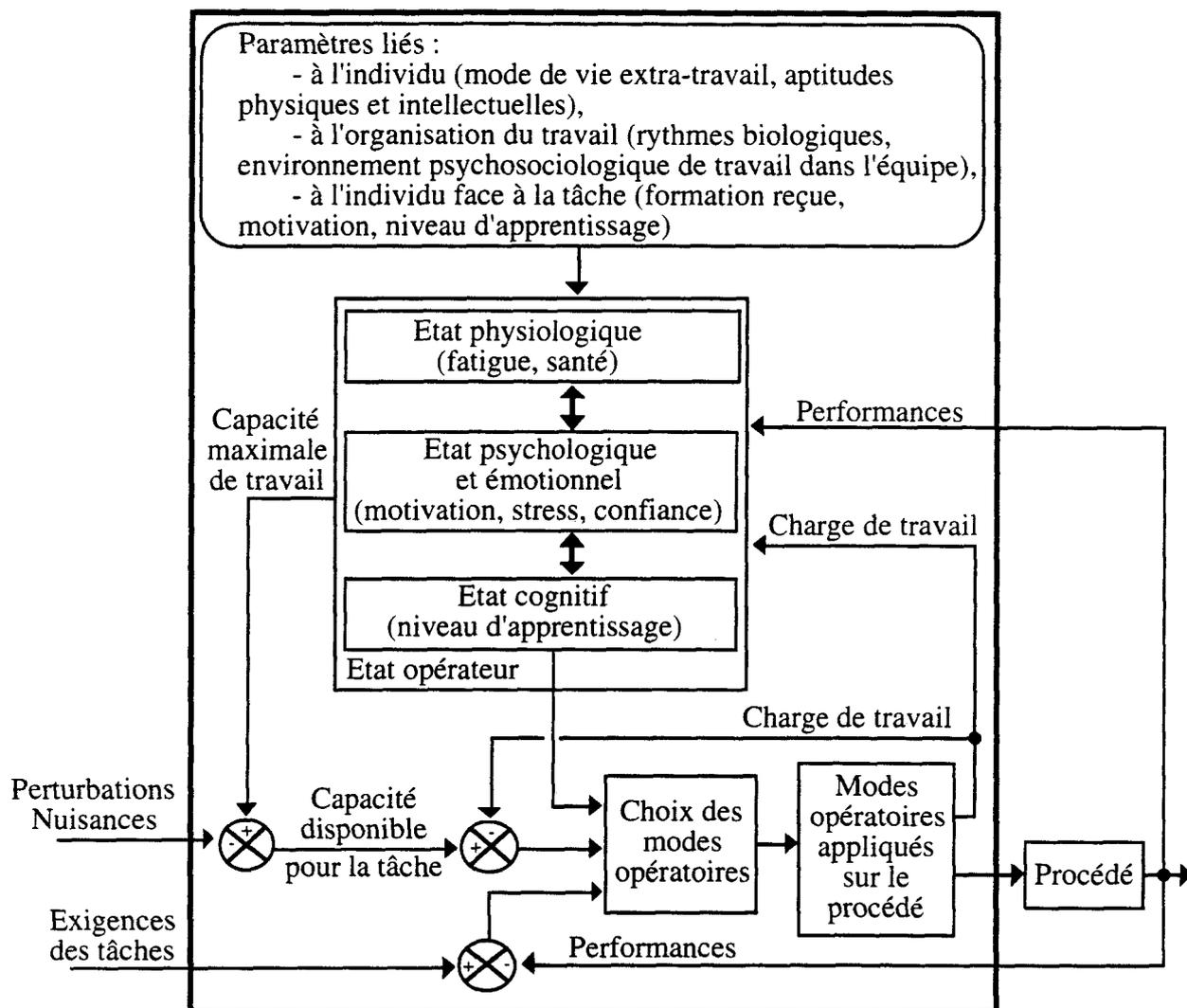


Figure I-9 : Modèle de l'opérateur humain face à une tâche, adapté de /Millot, 88/.

De plus, lorsque l'opérateur est impliqué dans une activité collective, cette surcharge transforme la coordination en une tâche secondaire, /De Keyser, 90/. Ainsi, des oublis et/ou des retards du transfert d'information vers d'autres opérateurs peuvent être commis. Néanmoins, la fiabilité d'un système homme-machine se gère aussi collectivement, c'est à dire avec la participation active de tous les opérateurs humains impliqués dans le système, /Guillevic et de Terssac, 90; Duarte et Vidal, 92; Driskell et Salas, 92; Leplat, 91b/. Cette part prise par l'activité collective dans la fiabilité générale est à présent abordée à partir du modèle présenté ci-après. Celui-ci explique les mécanismes de la régulation de l'activité dans une équipe de travail, à la fois sur le plan cognitif et sur le plan intensif.

### 2.1.2. Répartition des tâches dans une équipe de travail

Le modèle de Bøttcher et Levis /82/ explique les mécanismes de la régulation de l'activité dans une équipe de travail, à la fois sur le plan cognitif et sur le plan intensif. Il est complémentaire du précédent, et correspond à la modélisation des interactions entre deux décideurs. Plus précisément, il concerne la répartition des informations entre ces derniers en prenant en compte les limites de la capacité du raisonnement humain. Le modèle de l'organisation de référence comprend un répartiteur d'information, qui en fonction de plusieurs paramètres d'entrée, distribue les

informations entre plusieurs modèles humains. La prise de décision chez chaque décideur s'effectue en deux étapes. Dans la première, l'opérateur humain évalue la situation. Il peut communiquer cette situation à d'autres décideurs et recevoir éventuellement des informations supplémentaires. La seconde étape est l'examen des différents choix possibles afin de sélectionner une réponse adéquate. Dans l'exemple de la figure I-10, l'organisation est hiérarchisée. C'est pourquoi, la procédure d'actions, choisie par l'opérateur A est une commande transmise à l'opérateur B du niveau inférieur qui agit directement sur le système.

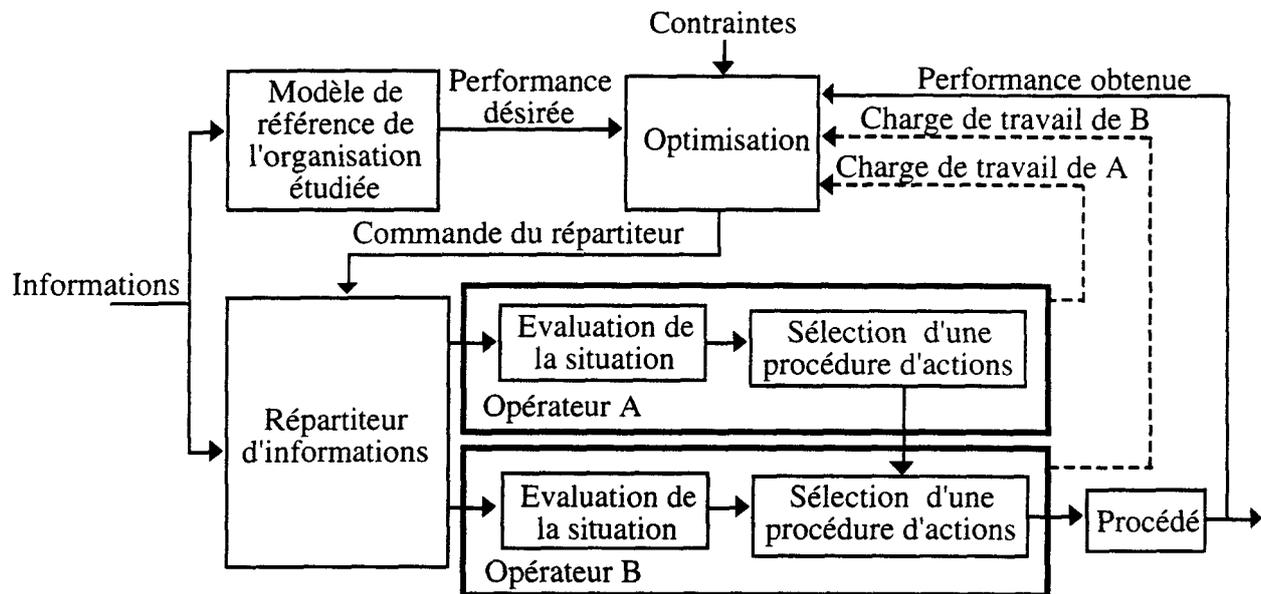


Figure I-10 : Répartition des tâches entre deux décideurs humains, adaptée de /Böttcher et Levis, 82/.

Les modèles précédents se basent sur les résultats obtenus relatifs à la performance et à la charge de travail. Une autre approche pour la régulation interindividuelle et intra-individuelle de l'activité est celle effectuée par anticipation, à partir de l'évaluation des résultats futurs probables. Elle permet, entre autres, d'expliquer la répartition des tâches humaines, par un moyen différent.

## 2.2. Régulation par anticipation

Dans ce contexte, pour prendre des décisions, un opérateur humain a besoin d'une part, de raisonner sur des informations temporelles, et d'autre part de prédire les effets de ses actions sur le procédé. Il doit donc continuellement faire référence à ce qui s'est passé, se passe, et se passera probablement, et coordonner sur un axe temporel les actions des différentes personnes impliquées dans son travail. La régulation sur le plan intensif correspond alors à une comparaison entre la charge de travail maximale acceptée et la charge future probable, /Boudes, 92/. De même, la régulation sur le plan cognitif vise à minimiser l'écart entre l'évolution souhaitée du système et son évolution future probable.

La régulation par anticipation, dans une équipe de travail, met ainsi en jeu plusieurs connaissances, pour un opérateur donné :

- Les **connaissances générales** sont basées sur la maîtrise de la gestion temporelle et sur les caractéristiques du système à contrôler.
- Les **connaissances situationnelles** concernent :
  - l'évolution future éventuelle du système, c'est à dire les connaissances sur l'évolution spontanée du processus et sur l'évolution provoquée par les actions,
  - le modèle du coopérateur pour connaître l'activité future probable de cet autre membre de l'équipe avec lequel il coopère,

- l'évaluation de sa propre charge de travail déduite des connaissances précédentes.

La figure I-11 donne un exemple de cette régulation de l'activité. En fonction des données spécifiques et communes, et en fonction de sa propre connaissance, chaque opérateur A ou B évalue l'état du système afin de résoudre un problème. Chaque représentation individuelle est comparée à celle de l'autre, grâce à des communications. Le résultat ainsi obtenu produit une prise de décision commune.

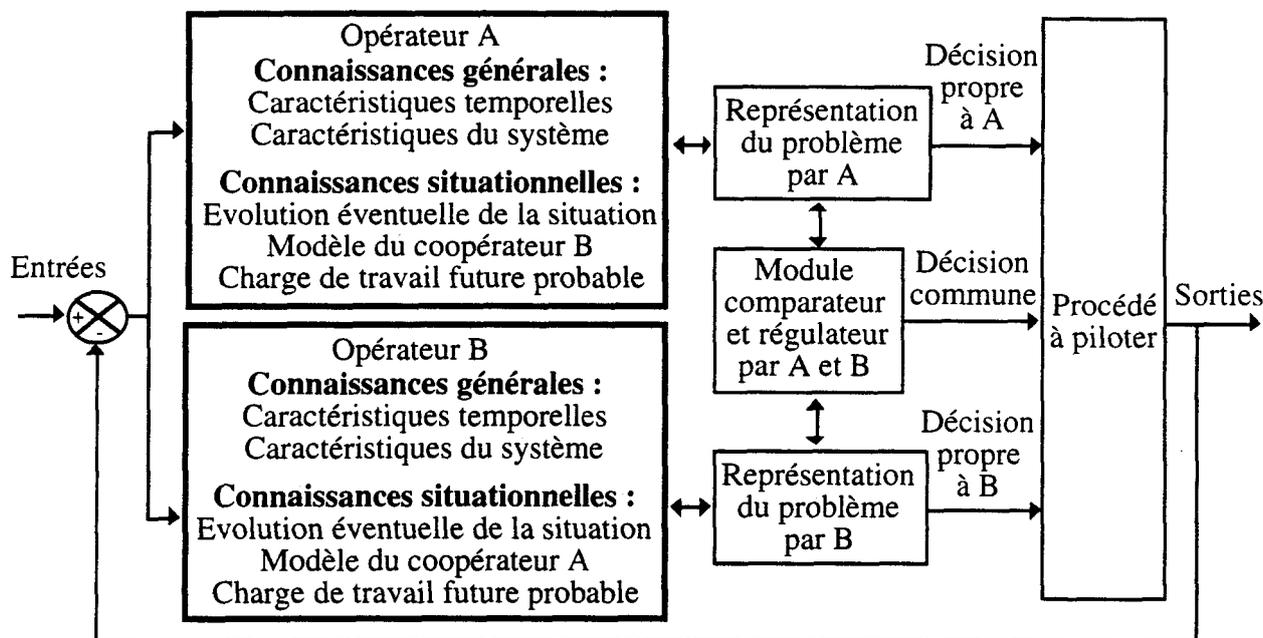


Figure I-11 : Régulation de l'activité humaine par anticipation, adaptée de /Boudes, 92/.

Le module comparateur/régulateur modélise les interactions entre les opérateurs A et B. Il permet d'établir une solution finale par coopération, afin d'éviter toute situation conflictuelle. En effet, il génère la confrontation entre les équipiers pour la mise au point de leurs représentations mentales individuelles. Ceci entraîne une augmentation évidente de la charge de travail de chaque équipier. Cette situation est parfois problématique surtout lorsque la décision à prendre est urgente. C'est pourquoi, cette comparaison n'a parfois pas lieu d'être quand, par exemple, la tâche à effectuer est soumise à des contraintes temporelles très sévères ou quand elle est individuelle. En outre, en fonction des compétences humaines et des exigences de la tâche à réaliser, l'exécution de celle-ci peut faire intervenir, soit un seul opérateur, soit les deux.

Les deux exemples de régulation de l'activité dans une équipe de travail, par rétroaction (modèle de Boëtcher et Levis) et par anticipation (modèle de Boudes), proposés précédemment, sont différents. Le premier concerne une organisation hiérarchisée dans la mesure où deux niveaux décisionnels apparaissent. Le deuxième est plutôt égalitaire. En effet, les opérateurs sont sur le même niveau de la hiérarchie et coopèrent afin de déterminer qui d'entre eux seront impliqués dans l'exécution de la tâche à effectuer. Il semble donc important de déterminer les caractéristiques générales qui mettent en œuvre les possibilités de régulation de l'activité des opérateurs humains au sein d'une équipe.

### 2.3. Organisations humaines et régulation de l'activité

Le travail en commun nécessite de planifier, de coordonner, et de réguler les actions des différents acteurs impliqués dans le système, /Guillevic et De Terssac, 90/. Cependant, ces activités diffèrent en fonction des situations de travail qui présentent différentes facettes propres à l'organisation de l'équipe, des machines, des tâches à exécuter... L'environnement d'une organisation homme-machine peut être décomposé en quatre niveaux élémentaires interactifs,

/Schmidt, 89/ : l'organisation sociale, l'organisation du travail, le travail coopératif et le système technique.

Nous présentons ici les caractéristiques relatives à la régulation de l'activité dans une organisation humaine. Elles comprennent les différents paramètres qui gèrent la régulation de l'activité humaine : les niveaux des pouvoirs de décision, les formes de coordination et de coopération lors de la répartition des tâches.

### 2.3.1. Pouvoirs décisionnels dans l'organisation sociale

Selon le pouvoir décisionnel de chacun des membres d'une équipe, la régulation de l'activité va s'effectuer de différentes manières. Les différentes organisations sociales recensées dans /Rasmussen, 91/ sont liées aux responsabilités décisionnelles propres à chaque opérateur :

- Dans l'**organisation autocratique**, un seul décideur a la responsabilité de la coordination des activités entre les différents opérateurs humains.
- L'**organisation hiérarchique** est stratifiée. La coordination est distribuée de telle manière qu'un décideur d'un niveau donné évalue et planifie les activités du niveau inférieur.
- La stratification d'une **organisation bureaucratique** est moins prononcée et les décideurs peuvent intervenir dans les domaines de leurs supérieurs ou subordonnés pour coopérer.
- Dans l'**organisation anarchique**, chaque opérateur planifie sa propre activité sans interaction avec les autres décideurs. La communication existe seulement dans le contenu du travail.
- La coordination relative à une **organisation démocratique** entraîne une interaction et une négociation entre tous les décideurs de l'organisation.
- Enfin, chaque décideur d'une **organisation diplomatique** négocie avec ses voisins concernés et le flux d'information est localement planifié.

Ces différents types d'organisations sociales influencent la répartition des tâches au sein d'une équipe. Les mécanismes d'allocation de celles-ci sont également dépendants des modes de coordination dans l'organisation du travail. Ils sont abordés ci-après.

### 2.3.2. Modes de coordination dans l'organisation du travail

Les différents modes de coordination sont en général basés sur les concepts des structures verticales et horizontales, /Stammers et Hallam, 85/, comparables à celles définies au § 1.2.2. Les **organisations à coordination en série** sont des **structures verticales** dans lesquelles un ensemble de tâches est affecté à un seul opérateur et où les flux d'informations vers les opérateurs suivants sont séquentiels. L'exécution des tâches d'un opérateur dépend de la réussite des tâches de l'opérateur précédent. Plusieurs structures sont alors envisageables. Par exemple, dans une situation où l'opérateur a la responsabilité d'une partie du processus, les activités qui lui sont affectées peuvent correspondre à des transformations séquentielles ou alternées, figure I-12-a. Dans chacune de ces organisations qui concernent à la fois les compétences spécifiques et partagées des opérateurs, les activités de l'un sont obligatoirement synchronisées avec celles des autres. Les **organisations à coordination parallèle** sont des **structures horizontales** dans lesquelles seules les compétences partagées sont exploitées et où chaque tâche est prise en charge par plusieurs opérateurs simultanément, figure I-12-b. Enfin, les **organisations hybrides** sont une combinaison de structures organisées verticalement et horizontalement, figure I-12-c.

Néanmoins, ces organisations différentes de l'activité humaine ne sont pas figées. Elles dépendent évidemment des exigences de la tâche à réaliser, de la souplesse d'affectation des tâches ou des sous-tâches à différents opérateurs, des capacités humaines et des caractéristiques du groupe. Celui-ci peut, en effet, être assimilé à un système auto-actif intégrant le concept

d'équifinalité, c'est-à-dire la possibilité d'obtenir les mêmes résultats par différents moyens, /Leplat, 91a, 91b/. Ainsi, deux types d'allocations, l'allocation rigide et l'allocation flexible au cours de laquelle les opérateurs ont à évaluer qui va exécuter telle ou telle tâche, sont envisageables. Leplat /91a/ introduit alors un degré de flexibilité qui détermine la distribution des tâches, c'est-à-dire le degré de liberté que l'organisation donne au groupe pour la répartition de celles-ci. Plus cette flexibilité est grande, plus la gestion de cette répartition prend une part importante dans l'activité.

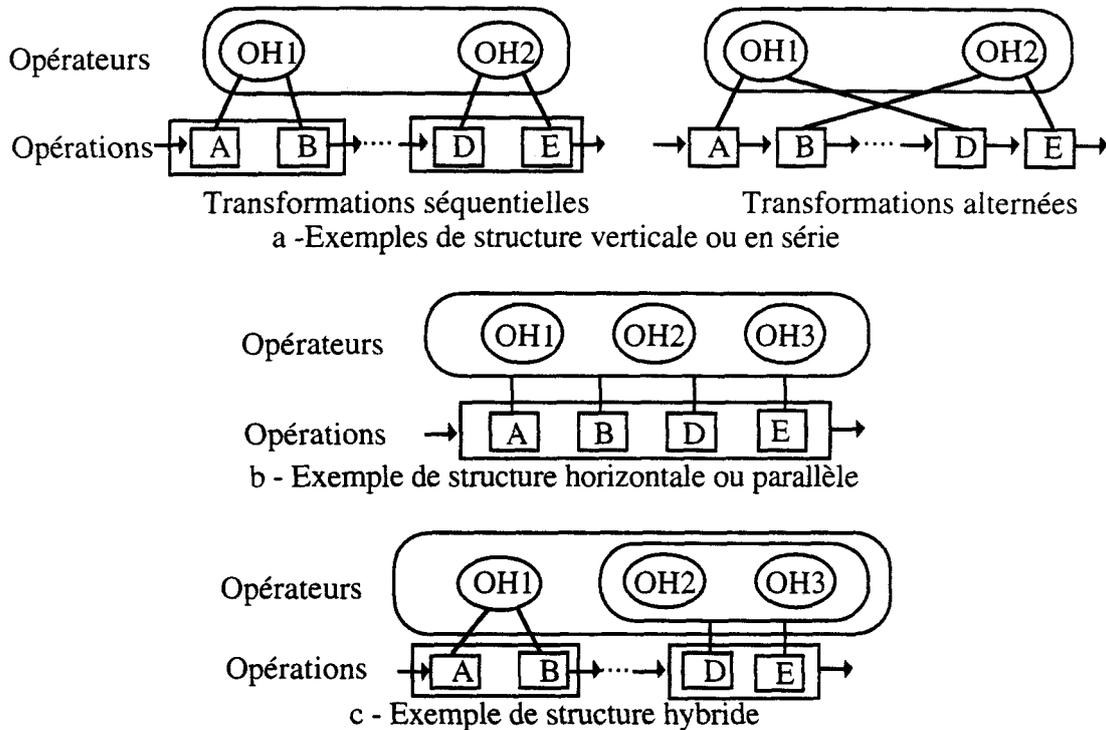


Figure I-12 : Structures des organisations du travail.

Toutefois, cette activité supplémentaire de gestion de la répartition des tâches permet de mieux réguler le travail de chaque opérateur. Quand une tâche collective est décomposable en sous-tâches individuelles, plusieurs situations peuvent se présenter, /Leplat, 91a/. Par exemple, le résultat final peut être la somme des contributions de chaque membre. Il peut aussi dépendre du membre le moins compétent ou du membre le plus expert. Dans le premier cas, le groupe ne peut travailler plus vite que le membre le plus lent. En outre, l'organisation du travail dépend des interactions entre les différentes tâches ou sous-tâches. En effet, les relations temporelles (actions synchronisées, simultanées ...) et fonctionnelles (actions dépendantes, indépendantes, interdépendantes) entre les différentes tâches ou sous-tâches influencent aussi la répartition effective des tâches dans l'organisation humaine.

Ces organisations du travail nécessitent souvent une coopération entre les différents opérateurs, surtout quand les objectifs de ces derniers sont communs. C'est le travail coopératif qui détermine alors l'exécution coordonnée des tâches de chacun. Les modes de coopération sont donc maintenant présentés.

### 2.3.3. Modes de coopération dans le travail coopératif

Le travail en équipe implique une coopération entre les opérateurs humains, c'est à dire une communication intentionnelle des informations, /Savoyant, 77/. Par contre, il n'y a pas de travail collectif lorsqu'il s'agit d'une juxtaposition de travaux individuels. Le travail à la chaîne en est un exemple puisqu'en fait l'intégration des informations est assurée par un fonctionnement

automatique. Quoi qu'il en soit, nous considérons ici les premiers types d'organisations où plusieurs modes de coopération peuvent être recensés, /Schmidt, 91/ :

- Une **coopération éloignée ou proche** est relative au lieu de travail et intègre les zones géographiques d'exécution .
- Une **coopération synchrone ou asynchrone** est relative au temps et à la chronologie des actions : les différentes sous-tâches peuvent être exécutées simultanément ou en différé.
- Une **coopération distribuée ou collective** est relative aux fonctions des opérateurs. Pour la coopération collective, ces derniers forment un groupe avec une responsabilité commune, c'est-à-dire qu'aucun d'entre eux ne peut exécuter une tâche sans concertation avec les autres. Dans la coopération distribuée, les opérateurs humains sont semi-autonomes et chacun d'eux peut modifier indépendamment des autres son comportement et concevoir ses propres stratégies.
- Une **coopération directe ou interposée** est relative aux moyens de communication, c'est-à-dire que les opérateurs soit interagissent directement en communiquant, soit coopèrent par l'intermédiaire d'un système technique.

Cependant, malgré ces différents mécanismes humains pour la régulation de l'activité, les problèmes liés à l'irrégularité de la charge de travail persistent. En effet, du fait de la capacité limitée des opérateurs humains, au-delà d'un certain niveau de charge, les communications homme-homme, par exemple, deviennent difficiles. Le transfert d'informations peut alors être erroné. Les mécanismes de régulation interindividuelle et intra-individuelle peuvent devenir inefficaces et éventuellement provoquer des erreurs graves. C'est pourquoi, pour satisfaire les contraintes de **pilotabilité** du système homme-machine qui dépend fortement de la charge de travail humain, /Rouhet, 88/, et de **réversibilité** de la commande qui permet de passer d'une commande manuelle à une commande automatique et vice versa, /Hollnagel et al, 93/, il semble ici intéressant d'exploiter les principes de coopération homme-machine, à partir d'outils d'assistance spécifiques. Ces derniers sont en fait inclus dans une des entités interactives d'un système complexe, /Woods, 88/, figure I-13.

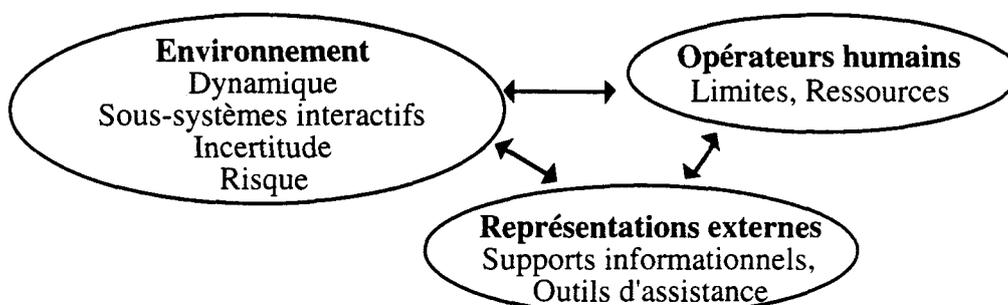


Figure I-13 : Facteurs contribuant à la complexité d'un système homme-machine, selon /Woods, 88/.

L'environnement de travail englobe les caractéristiques de la situation de travail. Il est géré par des opérateurs humains, ainsi que par des supports techniques qui permettent, d'une part, de représenter l'état du système, et d'autre part, d'exécuter les commandes appropriées. Les caractéristiques de ces systèmes d'assistance sont maintenant abordées.

### 3. Les outils d'assistance pour la coopération homme-machine

Ce paragraphe présente tout d'abord, une classification des systèmes d'assistance qui permet de situer le contexte dans lequel une coopération homme-machine relative aux fonctions des deux décideurs, l'opérateur humain et le système d'aide, est mise en œuvre. Ensuite, les différents modes de coopération sont détaillés. Plusieurs exemples d'aide à la régulation de l'activité par le partage des tâches entre un opérateur humain et un système d'assistance illustreront notre propos.

### 3.1. Fonctions des systèmes d'assistance

En fait, dans les salles de contrôle, le système automatisé de supervision est souvent couplé avec un système d'assistance en tenant compte des interactions entre quatre niveaux : l'opérateur humain, le procédé, le système de commande et de supervision, et le système d'assistance, figure I-14.

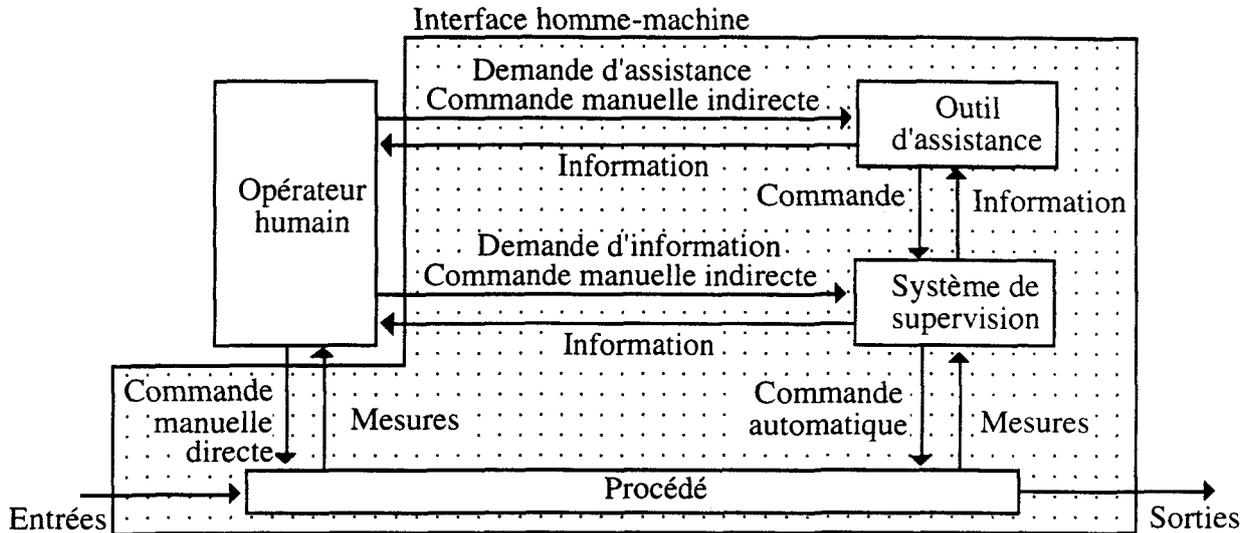


Figure I-14 : Couplage entre un système de supervision et un système d'assistance, adapté de /Johannsen, 91/.

Les fonctions des systèmes d'assistance, intégrées dans le système homme-machine peuvent être différentes, /Finin et Klein, 87/. Elles dépendent de leurs modes de connexions au procédé et aux opérateurs que ces systèmes assistent :

- Les **consultants** sont des systèmes indépendants, non connectés au procédé. Ils sont de ce fait alimentés en données par l'opérateur, et connectés en sortie à celui-ci. Ils sont utilisés pour obtenir des informations complémentaires lors d'un diagnostic par exemple. Leur utilisation peut toutefois s'avérer contraignante lorsque le nombre de données à leur fournir est important ou lorsque les décisions qu'ils proposent doivent être prises rapidement.
- Les **contrôleurs** sont des systèmes directement connectés aux capteurs du procédé, capables d'analyser la situation courante et de fournir à l'opérateur humain des conseils de décision. Ils permettent donc d'une part décharger ce dernier de la tâche d'évaluation d'une situation donnée, tout en lui laissant la responsabilité de la décision finale.
- Les **agents** sont des systèmes autonomes, connectés au procédé, capables de décharger l'opérateur humain d'une partie des tâches en prenant des décisions et en appliquant les actions correspondantes directement sur le procédé. Il est cependant nécessaire que ces outils soient fiables et robustes, surtout lorsque les tâches en question sont complexes.
- Les **servants** sont des systèmes semi-autonomes, agissant directement sur le procédé, mais à partir de données qui sont transmises par l'opérateur humain. Dans ce mode de connexion, c'est donc ce dernier qui assiste le calculateur dans la prise de décision. Ceci constitue un frein ergonomique dans leur mise en œuvre.

A partir de ces caractéristiques structurelles et fonctionnelles, les modes de coopération homme-machine pouvant être pris en compte doivent permettre un travail complémentaire et coopératif entre l'environnement humain et l'environnement technique. Dans le cadre de notre étude, les outils de type servant ne nous intéressent pas car ils asservissent l'opérateur humain à la machine. Les autres outils s'insèrent dans des modes de coopération différents. La coopération homme-machine dite verticale nécessite des outils d'assistance de type consultant ou contrôleur,

alors que la coopération dite horizontale requiert des systèmes de type agent, /Milot, 88/. Ces modes de coopération sont à présent détaillés.

### 3.2. Modes de coopération homme-machine

Différents modes de répartition peuvent être considérés. Dans une répartition statique, l'allocation des tâches est prédéfinie suivant un critère particulier. En général, elle dépend surtout des compétences des décideurs et détermine donc le degré d'automatisation du système. Ainsi, dans la **coopération homme-machine verticale**, les tâches de contrôle et de supervision sont sous la responsabilité de l'opérateur humain, aidé dans sa décision finale par des outils spécifiques. Leur affectation est donc statique, alors que dans la **coopération horizontale**, elles sont dynamiquement réparties entre la machine et l'homme, suivant les deux modes possibles : explicite ou implicite, /Rieger et Greenstein, 82/.

#### 3.2.1. Coopération verticale

Dans ce type de coopération, l'opérateur humain reste entièrement maître des actions à effectuer sur le procédé et est assisté par des outils d'aide à la décision, figure I-15.

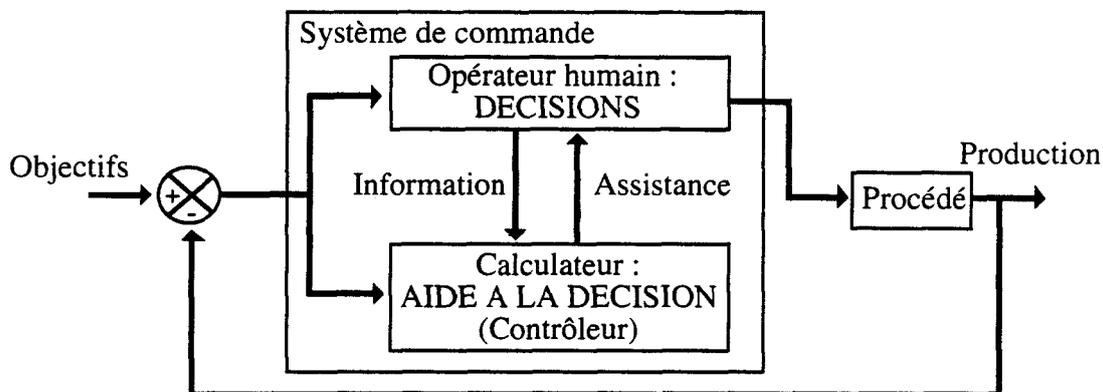


Figure I-15 : Coopération verticale.

Deux cas de figure apparaissent, /Debernard, Vanderhaegen, Millot, 92/:

- Le premier cas concerne les procédés qui ne nécessitent pas des décisions rapides. Il s'agit de guider l'opérateur humain dans sa démarche de résolution de problème pour qu'il découvre lui-même la solution. Ceci peut être obtenu en lui fournissant les éléments fiables, nécessaires à son raisonnement. Il peut s'agir par exemple de la liste des variables en défaut de telle sorte que l'opérateur découvre lui-même le diagnostic, ou encore du diagnostic en question de façon qu'il génère lui-même la procédure de correction. Ce principe permet de maintenir et d'enrichir les connaissances humaines. Néanmoins, un tel système d'aide doit être adaptatif de manière à assurer d'une part une cohérence parfaite entre son raisonnement et celui de l'opérateur humain, et à éviter d'autre part une charge de travail supplémentaire trop importante pour celui-ci. C'est pourquoi, il doit être **interactif** ou **conversationnel** afin de renseigner l'opérateur humain quand celui-ci le désire.
- Le second cas prend en compte les situations d'urgence où l'opérateur humain risque de perdre ses capacités de raisonnement, suite au stress, par exemple. Le système d'aide est alors **non interactif**, et il doit proposer immédiatement la solution du problème à l'opérateur. Dans ce cas, des conflits peuvent apparaître lorsque l'opérateur humain la refuse. C'est pourquoi, l'outil d'aide doit pouvoir la justifier pour que l'opérateur humain puisse trouver le plus rapidement possible un consensus (qui a tort ? pourquoi ? ...). Cette approche a été implémentée dans un système de supervision, /Taborin et Millot, 89/. L'interface, définie à partir des besoins informationnels de l'opérateur, s'adapte aux modes de fonctionnement normaux ou anormaux du procédé. Le système expert intégré

est un outil de type contrôleur qui prédit continuellement l'évolution du procédé. Les valeurs prédites des différentes variables sont comparées avec les seuils d'alarme et, en cas de divergence, le système expert propose des conseils de prévention.

Néanmoins, ce type de coopération n'est pas efficace si l'opérateur humain est soumis à des contraintes temporelles trop élevées. En effet, dans ce cas précis, ce dernier n'aura pas le temps d'analyser les conflits décisionnels entre le système d'aide et lui-même. Il choisira alors soit ses propres solutions indépendamment de celles proposées par le système d'aide qui devient ici inutile, soit celles du système indépendamment de son propre diagnostic en risquant ainsi de perdre ses connaissances et ses capacités décisionnelles. Dans ce cas, le mode de coopération horizontale doit alors être envisagé.

### 3.2.2. Coopération horizontale

Quand les variations de charge de travail de l'opérateur humain sont trop importantes, ce type de coopération est souhaitable. Il consiste à introduire dans la boucle de supervision et de contrôle, un répartiteur de tâches qui partage dynamiquement les tâches entre deux décideurs : l'opérateur humain et un système de type agent, figure I-16. Ce partage dynamique doit d'une part optimiser les performances globales du système, et d'autre part maintenir actif l'opérateur humain dans la boucle principale de supervision en lui évitant une sous-charge ou une surcharge de travail. En effet, la sous-charge de travail permanente peut provoquer une perte de vigilance de l'opérateur, et à long terme une perte d'apprentissage. La surcharge de travail quant à elle, peut amener l'opérateur à dégrader ses performances si elle se prolonge, et donc à commettre des erreurs.

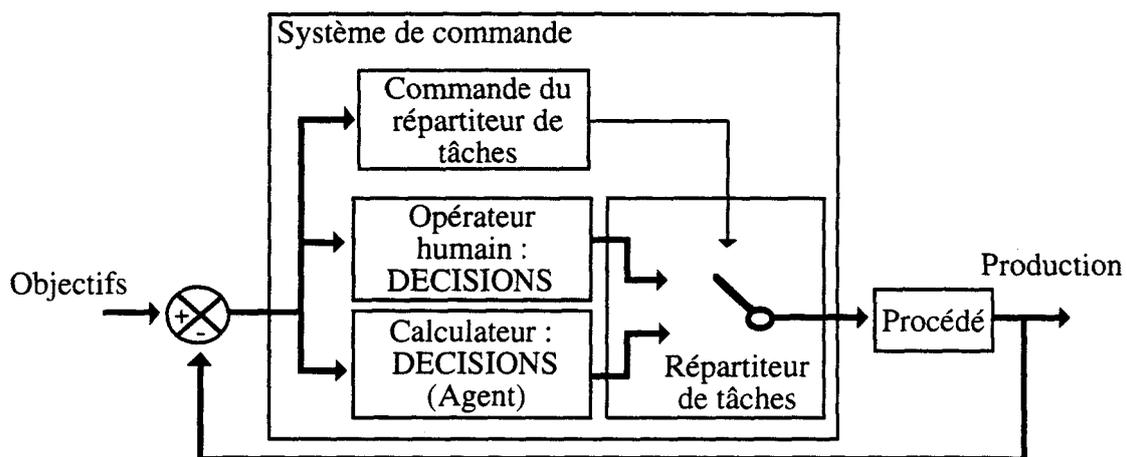


Figure I-16 : Coopération horizontale.

L'implémentation d'une répartition dynamique de tâche peut être définie selon deux structures, /Rieger et Greenstein, 82/ :

- Dans la **répartition dynamique explicite**, le répartiteur de tâche est commandé par l'opérateur humain lui-même à partir d'une interface de dialogue spécifique. Celui-ci effectue alors le partage des tâches suivant ses propres critères. Si l'implémentation de cette forme de coopération est assez aisée, elle présente l'inconvénient majeur d'introduire une charge de travail supplémentaire pour l'opérateur puisqu'il doit, en plus de ses propres tâches de décision, assurer la gestion de la répartition des tâches. C'est pourquoi, Greenstein et Lam /85/ proposent d'optimiser les aspects ergonomiques de l'interface de dialogue (mode et moyen de communication, présentation de l'information, ...) de manière à minimiser cette charge.
- Dans la **répartition dynamique implicite**, le répartiteur de tâche est géré automatiquement par le calculateur à partir d'un algorithme de partage. La principale difficulté est la définition d'un critère de répartition efficace, basé par exemple sur la performance globale du système et/ou sur la charge de travail de l'opérateur humain. Cette

forme de répartition a l'avantage de décharger l'opérateur humain de la tâche de gestion de la répartition.

Ce concept de coopération horizontale a été utilisé afin de mettre en œuvre plusieurs applications expérimentales. Différentes approches de mise en œuvre d'une répartition implicite ont été proposées.

### 3.3. Régulation de l'activité par la répartition dynamique implicite

L'architecture générale de la répartition dynamique implicite permet de comprendre les flux d'information au sein du système homme-machine. Plusieurs mécanismes d'adaptation pour la régulation de l'activité humaine sont brièvement présentés afin d'illustrer son fonctionnement.

#### 3.3.1. Structure générale de la répartition dynamique implicite

La structure générale d'un système de contrôle et de supervision, piloté selon une répartition dynamique implicite, peut être décomposée en trois niveaux, figure I-17.

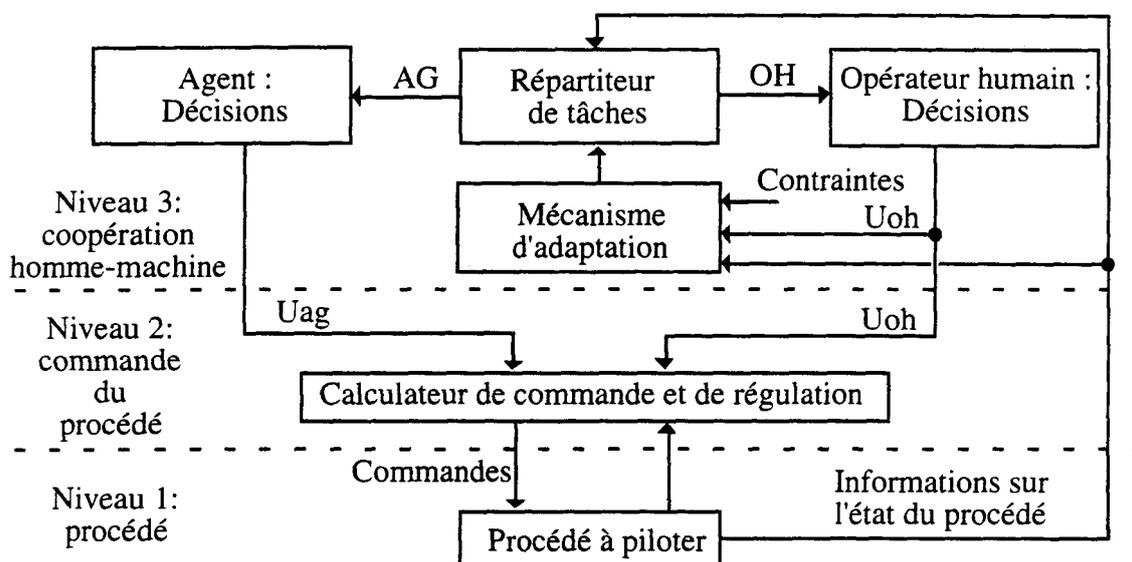


Figure I-17 : Structure générale d'une répartition dynamique implicite, adaptée de /Millot, 88/.

Le niveau le plus bas représente le procédé lui même. Le niveau intermédiaire concerne le niveau automatisé de commande et de régulation. Enfin, le niveau le plus haut correspond au niveau décisionnel. Il comprend les deux décideurs, l'opérateur humain et l'agent, le répartiteur de tâches pour le partage dynamique des tâches entre ces deux décideurs, et le mécanisme d'adaptation. Celui-ci gère le partage des tâches à partir d'une politique d'allocation spécifique, et commande le répartiteur.

Cette structure de base permet d'établir ci-après une liste des différents mécanismes d'adaptation, liste qui n'est certes pas exhaustive.

#### 3.3.2. Quelques modèles de répartition dynamique implicite des tâches

Une première approche est le formalisme de Chu et Rouse /79/, basé sur la théorie des files d'attente. Les deux décideurs (humain et automatique) sont les deux serveurs de la file qui contient l'ensemble des tâches à réaliser, chacune d'entre elles étant affectée d'un coût d'attente prédéfini relatif à sa priorité. La politique d'allocation des tâches consiste alors à maintenir le coût d'attente de la file entre deux seuils minimum  $S_{\min}$  et maximum  $S_{\max}$ , figure I-18. Ces derniers évoluent en fonction du taux d'arrivée des événements, de la performance du serveur et de la complexité de

la tâche, des perturbations du système à piloter. Toutefois, cette méthode ne se base que sur le plan intensif de régulation de l'activité humaine, c'est-à-dire qu'elle ne prend pas en compte la performance du procédé piloté.

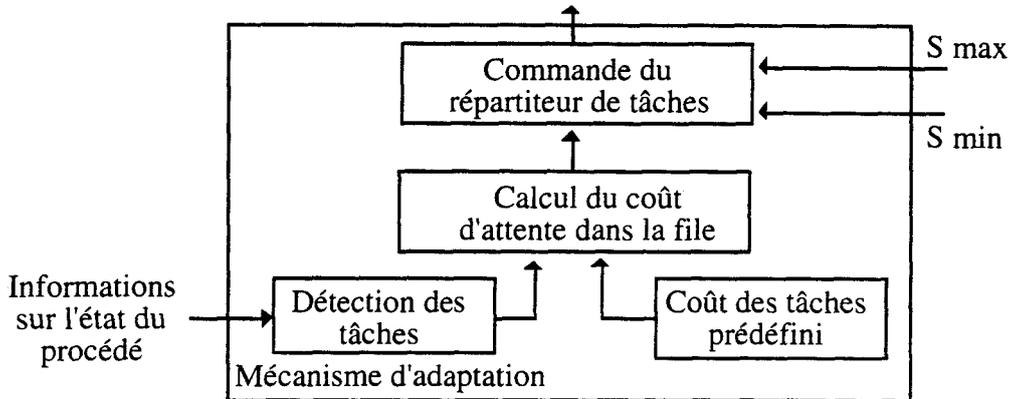


Figure I-18 : Répartition implicite basée sur la théorie des files d'attente, d'après /Chu et Rouse, 79/.

Une autre approche est basée sur un modèle prédictif simplifié des stratégies humaines, /Greenstein et Revesman, 86/, qui sert à prédire les tâches, c'est-à-dire le plan que l'opérateur est susceptible d'exécuter. Les autres tâches sont alors affectées à l'agent, figure I-19. Quoique séduisante, cette méthode se heurte aux problèmes de mise en œuvre, surtout lorsque les tâches considérées sont complexes. Dans ce cas, la prédiction des actions humaines peut en effet devenir difficile à réaliser.

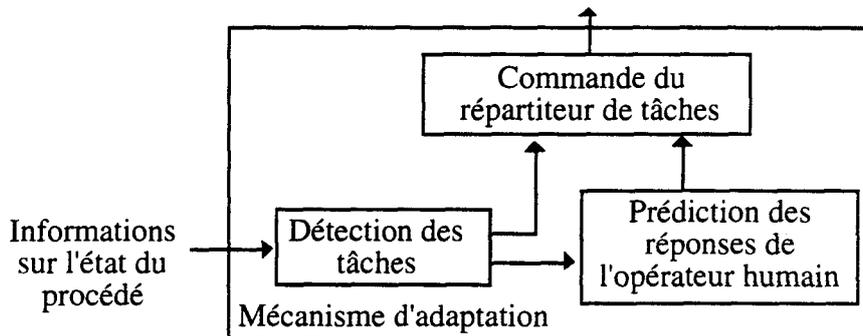


Figure I-19 : Répartition implicite basée sur un modèle prédictif, d'après /Greenstein et Revesman, 86/.

La troisième approche concerne les études menées par Millot /88/ et Kamoun /89/. Le principe est basé sur la commande optimale, c'est-à-dire qu'il consiste à rechercher un partage des tâches qui optimise un critère de performance obtenu à partir des écarts entre les sorties du procédé et leur consigne, figure I-20.

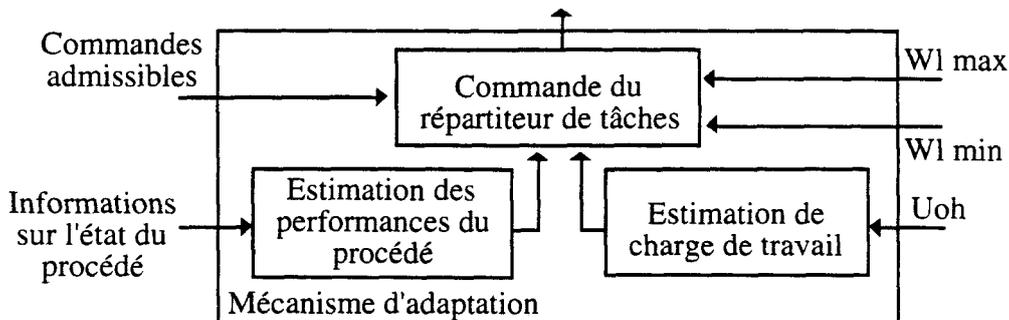


Figure I-20 : Répartition implicite basée sur la commande optimale, d'après /Millot, 88/; Kamoun, 89/.

Néanmoins, afin de maintenir la charge de travail de l'opérateur humain entre deux seuils minimum  $Wl_{min}$  et maximum  $Wl_{max}$ , une estimation en temps réel de la charge de travail est réalisée. Elle est définie à partir d'un modèle observateur qui évalue le taux d'occupation de l'opérateur humain et les exigences temporelles et fonctionnelles des tâches à exécuter. Même si cette approche est séduisante, elle est confrontée au problème d'évaluation en ligne de la charge de travail humain et de la performance, dans des cas complexes.

Une dernière approche, proposée par Debernard /93/, est basée sur la commande adaptative en boucle fermée, figure I-21. Elle considère l'ensemble constitué du répartiteur de tâche et des deux décideurs, comme un régulateur ajustable. Le mécanisme d'adaptation par lequel celui-ci est commandé comporte un estimateur de la charge de travail de l'opérateur et un estimateur de la performance. En outre, la commande du répartiteur est basée sur un modèle statique et dynamique. Le modèle de connaissance statique détermine les plages de fonctionnement des deux décideurs en fonction des contraintes de chacun (pour l'opérateur humain : contraintes de charge de travail ; pour l'agent : contraintes liées à sa compétence), ainsi que leurs performances intrinsèques pour chacune des tâches. Le modèle dynamique repose sur le fonctionnement des deux décideurs, c'est-à-dire sur les conséquences dues aux modifications éventuelles apportées au partage des tâches. Cependant, les difficultés dues à l'estimation de la charge de travail ou de la performance ont conduit à un mécanisme d'adaptation plus simple basé sur la commande adaptative programmable dans lequel la commande du répartiteur dépend alors d'un estimateur d'exigence fonctionnelle et/ou temporelle des tâches et où seul le modèle statique est utilisé, /Debernard, Vanderhaegen, Debbache, Millot, 90a/.

Rappelons que les exigences de tâches correspondent aux difficultés intrinsèques des tâches, quantifiables par des mesures physiques, comme leur nombre, leur fréquence. La charge de travail est, quant à elle, la difficulté ressentie par l'opérateur humain, selon son état physiologique, psychologique et son savoir-faire (cf § 2.1.1).

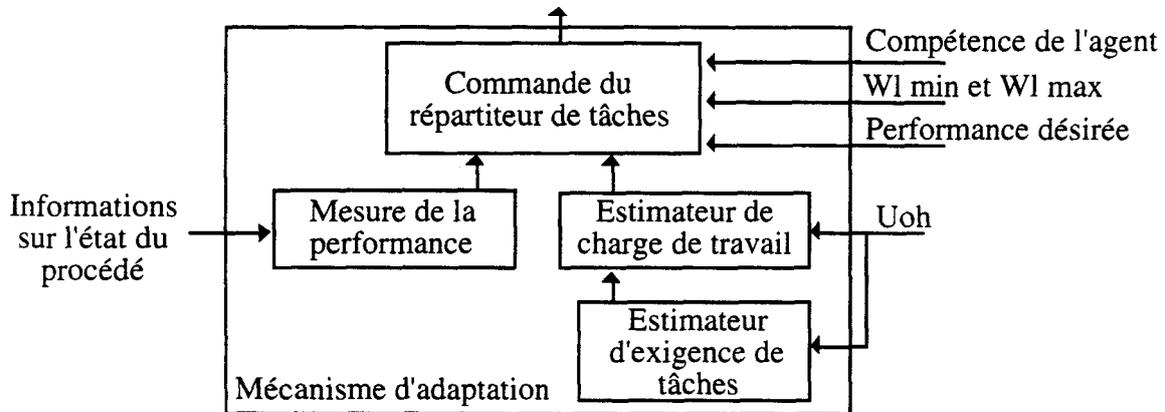


Figure I-21 : Répartition implicite basée sur la commande adaptative en boucle fermée, d'après /Debernard, 93/.

Lors de la conception d'un système homme-machine, le choix du niveau de coopération effectif est d'ailleurs contraint par ces difficultés d'évaluation en ligne de la charge de travail humain et de la performance globale du système. L'implémentation de ce type de coopération nécessite donc une phase expérimentale de validation afin d'évaluer l'efficacité de l'outil d'assistance, des interfaces homme-machine correspondantes. Toutefois, il faut noter que, pour l'instant, les études sur la coopération homme-machine horizontale n'ont pris en compte qu'un seul opérateur humain. Ces considérations seront abordées dans le chapitre suivant.

## Synthèse et Conclusion

Ce chapitre a fait le point sur les différents régulateurs de l'activité humaine dans un système homme-machine. Afin de maintenir une performance optimale de ces derniers, et d'éviter les situations de surcharge de travail humain, plusieurs éléments entrent en jeu : l'opérateur humain, l'équipe de travail et les outils d'assistance pour l'aide à la décision ou à l'action. Dans le contrôle et la supervision de ces systèmes complexes, les différents mécanismes humains et techniques, ainsi que les possibilités de coopération homme-machine ont donc été énumérées. L'insuffisance de la représentation et de la validation des systèmes homme-machine a alors été soulevée.

La première partie a proposé une représentation classique des systèmes homme-machine. Elle a abordé les différentes caractéristiques des systèmes techniques et des opérateurs humains face au système qu'ils pilotent.

Plusieurs modèles des régulations intra-individuelles et interindividuelles de l'activité humaine ont ensuite été spécifiés, dans la deuxième partie. D'une part, les mécanismes d'autorégulation permettent à l'opérateur de gérer sa propre activité. D'autre part, dans un contexte collectif de travail, les opérateurs humains impliqués fonctionnent comme des régulateurs interactifs, en communiquant, pour coopérer et coordonner leurs activités. Cependant, ces mécanismes de régulation de l'activité humaine diffèrent en fonction des caractéristiques intrinsèques de l'organisation humaine. En effet, celle-ci présente de multiples facettes relatives au pouvoir décisionnel de chacun des membres d'une équipe, et aux modes de coordination et de coopération qui influencent la répartition effective des tâches entre les opérateurs humains.

Les caractéristiques des modes de coopération homme-machine ont ensuite été développées dans la troisième partie. Celle-ci a proposé différents outils d'assistance pouvant s'intégrer soit dans une coopération verticale, soit dans une coopération horizontale. Dans la première, il s'agit d'aides au diagnostic, à la gestion d'alarmes, à la décision. La deuxième permet, quant à elle, de mettre en place des régulateurs spécifiques pour l'aide à l'action. Ces outils d'assistance sont gérés soit par l'intermédiaire de l'opérateur humain en mode explicite où la répartition des tâches dépend de paramètres subjectifs, soit par un mécanisme automatique en mode implicite où des méthodes objectives permettent d'évaluer la charge de travail de l'opérateur humain, et/ou le comportement de celui-ci, et/ou la performance du système.

Ainsi, pour résumer, une organisation au sens large est constituée de plusieurs sous-ensembles qui doivent être pris en compte lors de la conception d'un système homme-machine, figure I-22. Le premier est l'organisation humaine, déterminée à partir des caractéristiques sociales, des modes de coordination et de coopération entre les différents opérateurs humains. Le deuxième correspond à l'organisation technique, définie par des structures spécifiques mettant en œuvre des mécanismes de coopération ou/et de coordination entre plusieurs modules fonctionnels. Le troisième sous-ensemble permet le lien entre les deux premiers, à partir d'une coopération homme-machine verticale ou horizontale, ou d'une affectation statique qui détermine le degré d'automatisation. A partir d'une communication efficace, l'homme et la machine effectuent alors un travail complémentaire où la coopération n'est pas forcément réduite à l'assistance de l'homme par la machine, mais peut inclure également l'assistance de la machine par l'homme.

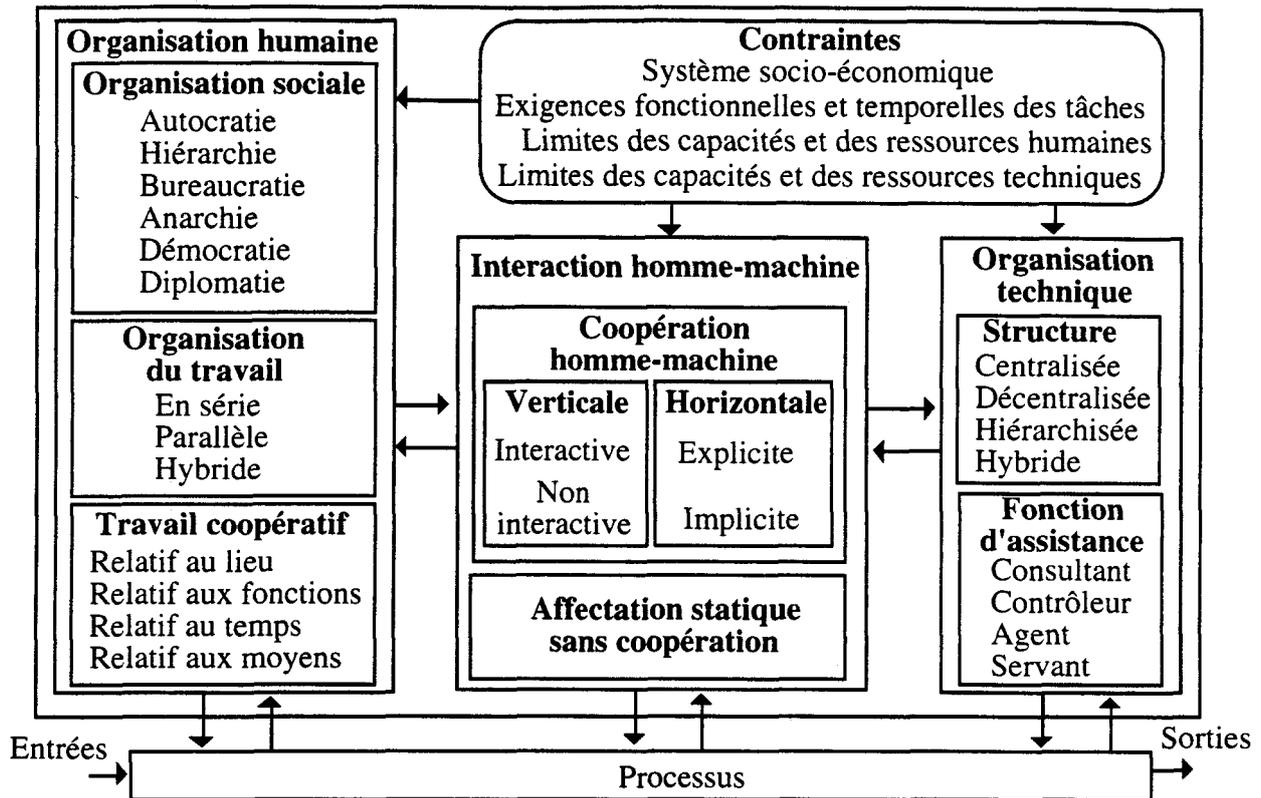


Figure I-22 : Organisation homme-machine.

Cependant, les modèles classiques d'un système homme-machine sont souvent représentés comme des systèmes fermés, intégrant un seul opérateur humain et un seul système d'aide. En effet, les applications qui en découlent, comme celles évoquées précédemment, se limitent aux cas des interfaces ne prenant en considération qu'un seul opérateur humain, en faisant abstraction des caractéristiques du travail collectif. Leur validation est donc partielle puisqu'elle néglige les diverses interactions qui existent dans un système homme-machine. C'est pourquoi, une nouvelle représentation de ce dernier doit être définie afin d'intégrer tous les réseaux de communication qui gèrent l'organisation correspondante.

C'est le propos du chapitre suivant qui redéfinit les caractéristiques des postes de travail en y intégrant plusieurs composants de type humain ou technique. Cette nouvelle représentation permet de développer les principes de base de notre recherche qui s'oriente vers une coopération homme-machine multiniveau, dans un contexte de travail multiposte.

---

## **CHAPITRE II - COOPERATION MULTINIVEAU DANS UNE ORGANISATION MULTIPOSTE : EXEMPLE DU CONTROLE DU TRAFIC AERIEN**

---

### **Introduction**

Les principes de coopération homme-machine multiniveau, pour un contexte de travail multi-utilisateur s'appuient sur ceux développés dans le chapitre précédent. Tout d'abord, à partir d'une méthodologie générale de conception et d'évaluation des systèmes homme-machine, ce chapitre présente les différentes caractéristiques des organisations gérées par des postes de travail ou de contrôle. Celles-ci concernent plusieurs domaines complexes d'applications, tels que la télérobotique, les systèmes de production, les systèmes de traitement de flux comme les réseaux de distribution d'électricité, le trafic aérien, le trafic ferroviaire ou le trafic maritime. A travers cette structure multiposte, pour la régulation de l'activité humaine, plusieurs niveaux de coopération peuvent s'exercer autour d'un même poste de contrôle, ou entre les différents postes. Nous proposons alors une nouvelle approche pour la répartition dynamique des tâches, basée sur une organisation de travail contenant deux postes, un des postes prenant en charge la répartition des tâches entre les ressources du deuxième poste, c'est-à-dire l'opérateur humain et le système d'aide de type agent. Notre propos est finalement illustré par l'exemple du contrôle du trafic aérien.

La première partie représente les systèmes de contrôle et de supervision à partir des caractéristiques des postes de travail qui peuvent constituer, dans l'organisation globale de travail, un réseau complexe de coopération homme-machine. A cet effet, nous proposons une méthodologie générale de conception et d'évaluation d'un système homme-machine multiposte. Cette démarche, nécessaire lors de l'implémentation de nouveaux postes de contrôle, permet d'établir le réseau de communications homme-machine interposte et intraposte. Les principes de la coopération homme-machine multiniveau sont alors développés en nous appuyant sur les caractéristiques des systèmes coopératifs décrits dans le premier chapitre.

La seconde partie constitue un exemple d'application de ces organisations dans le domaine du contrôle du trafic aérien. Depuis plusieurs années, ce secteur est en pleine évolution, suite à l'augmentation du trafic, à l'amélioration des performances des aéronefs et des moyens de contrôle. Cependant, l'accroissement régulier du trafic tend à saturer ces derniers, malgré une régulation du flux, effectuée par plusieurs niveaux décisionnels. C'est pourquoi, de nombreuses études cherchent à développer des outils d'aide afin d'assister le travail des contrôleurs aériens. Cette partie introduit donc notre domaine de recherche qui concerne l'intégration d'une coopération multiniveau entre les hommes et des outils d'aide pour le contrôle du trafic aérien "en route".

## **1. Caractéristiques d'une organisation multiposte et coopération multiniveau**

L'étude des systèmes homme-machine s'est souvent focalisée sur l'activité d'un individu isolé, indépendamment des activités de coordination ou de coopération avec les autres opérateurs. Or, ces interactions jouent un rôle important dans la prise de décision. Aussi, cette partie propose-t-elle une méthodologie originale de conception et d'évaluation des organisations multipostes. Elle détaille ensuite l'ensemble des communications interpostes et intrapostes pouvant être mises en œuvre dans ces dernières. Puis, elle aborde la coopération homme-machine multiniveau.

### **1.1. Mise en œuvre d'un système homme-machine dans une organisation multiposte**

Cette méthodologie est certes très générale. Cependant, elle vise à donner un aperçu nouveau pour la conception et l'évaluation d'un système homme-machine dans lequel plusieurs postes de contrôle sont intégrés. Elle se décompose en deux phases : une phase descendante de conception et une phase ascendante d'évaluation.

#### **1.1.1. Méthodologie générale**

On peut affirmer que la majorité des erreurs est d'origine humaine puisque l'homme crée le système homme-machine, et généralement plusieurs personnes contribuent directement ou indirectement à sa production : celles qui ont conçu les supports de travail, celles qui ont défini les règles de leur utilisation, celles qui les utilisent... En contrepartie, comprendre les mécanismes qui engendrent les erreurs humaines peut contribuer au développement des systèmes homme-machine notamment pour définir les supports informationnels adéquats et/ou pour éventuellement créer des interfaces tolérantes aux erreurs humaines, /Hollnagel, 91; Beka, Malvache, 92/.

Les systèmes étant de plus en plus complexes à gérer, les interfaces de dialogue homme-machine pour le contrôle et la supervision font perdre aux opérateurs le contact avec la réalité. Ceci peut entraîner une discordance entre la représentation mentale que ces derniers ont du procédé et le système physique réel. Ces différences, parfois importantes, augmentent considérablement les risques d'erreur humaine. Pour remédier à ces problèmes, Wanner /89/ propose de concevoir les interfaces selon les cinq caractéristiques humaines suivantes :

- l'opérateur humain travaille séquentiellement,
- il a besoin d'information pour prédire les événements,
- il peut réguler son activité,
- il travaille en fonction de sa propre représentation mentale du système,
- il ne peut pas estimer les risques facilement.

De plus, l'opérateur humain peut s'adapter aisément à une situation donnée. Il peut apprendre, anticiper, corriger ses propres erreurs, mais il n'est pas fiable du fait de sa capacité variable dépendant de son état mental ou physique, /Cellier, 90/. Ainsi, la meilleure interface semble être individuelle : elle doit prendre en compte les caractéristiques particulières de chaque individu et de la tâche, /Spérandio, 90; Gillet, 90/. Il est vrai que les variables individuelles, comme par exemple les habiletés, l'expérience, la personnalité peuvent donner des niveaux de performance divergents pour des situations de travail identiques. Or, pour la conception des interfaces, il est non seulement important de prendre en compte les caractéristiques liées à l'opérateur humain, mais aussi celles du travail collectif, /Spérandio, 92/. C'est pourquoi nous proposons une méthodologie générale pour la conception et l'évaluation d'un système homme-machine multiposte, dérivée de celle de Millot et Debernard /93/, figure II-1.

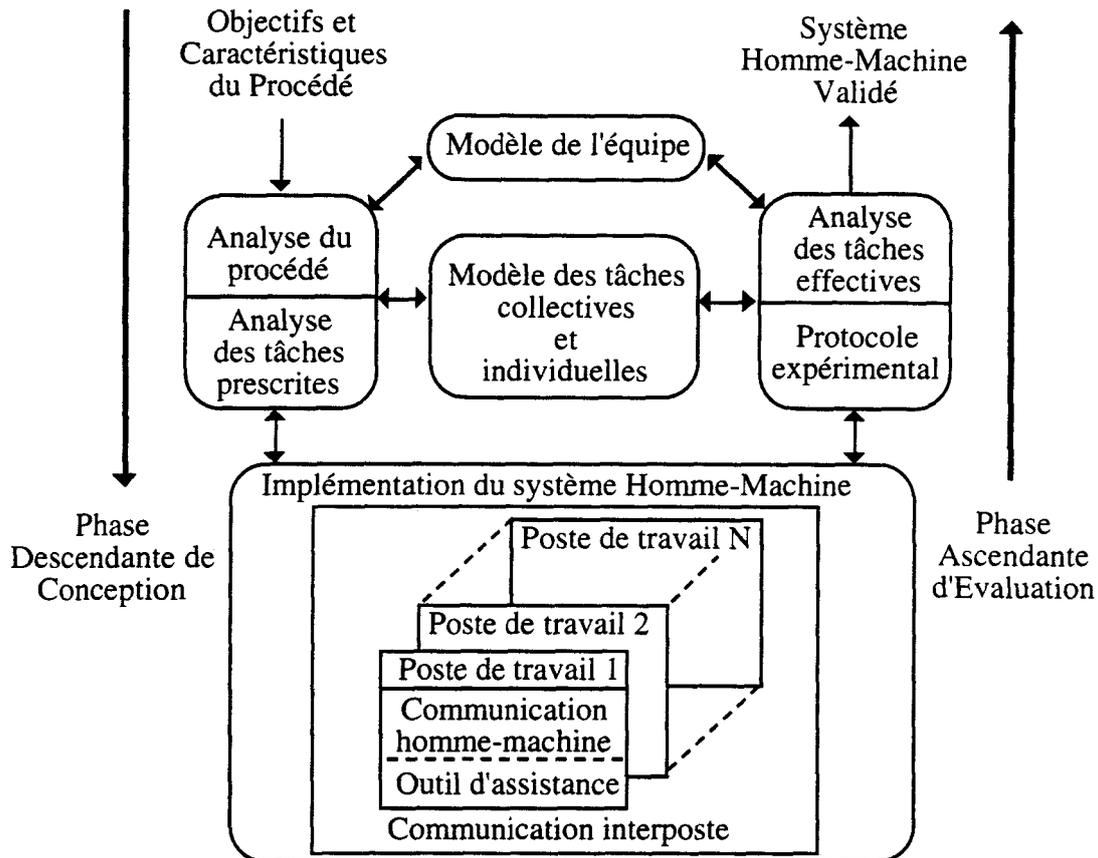


Figure II-1 : Conception / Evaluation d'un système homme-machine.

La phase de conception est basée sur les analyses du système initial et des tâches prescrites. La phase d'évaluation permet de valider le nouveau système homme-machine implanté à partir d'un protocole expérimental et de l'analyse des tâches effectives. Les deux étapes utilisent et mettent à jour deux modèles différents. Le premier est le modèle d'équipe qui détermine les limites et les ressources humaines. Le second permet d'obtenir l'ensemble des interactions et des besoins informationnels de l'équipe. L'étape descendante est d'abord détaillée.

### 1.1.2. Phase de conception

La phase descendante de conception commence par l'analyse du fonctionnement du procédé. Cette analyse permet de déterminer les tâches collectives et individuelles, et en particulier les tâches de contrôle et de supervision. Cette première étape doit donc être effectuée en fonction des modes de fonctionnement normaux et anormaux du procédé. Les modes de fonctionnement normaux déterminent les informations nécessaires à la surveillance du procédé, alors que les modes de dysfonctionnement prévisibles mettent en évidence les parades réalisées par les opérateurs pour y faire face. Une analyse plus fine de l'activité humaine doit alors être effectuée, en respectant les contraintes humaines fournies par le modèle de l'équipe. Elle permet de déterminer les exigences temporelles, fonctionnelles, et informationnelles des tâches, nécessaires aux différents membres d'une équipe.

L'analyse de l'activité collective ou de la co-activité consiste alors à étudier l'organisation dynamique des actions, des communications et des interprétations des opérateurs humains dans une situation de travail. L'analyse de la tâche est fonction des tâches exécutées par chaque individu, tandis que l'analyse de l'équipe est basée sur les interactions entre les différents membres, /Baker et Salas, 92/.

Deux courants sont alors envisageables pour analyser l'activité d'une équipe, /Leplat, 91b; Filippi et Theureau, 92/. Le premier concerne l'analyse par rapport au groupe globalement. Elle

prend en compte l'organisation de l'environnement de travail, avec son caractère collectif. Par contre, le second est l'analyse par rapport à l'activité individuelle. Il se focalise sur les individus en situation de travail car l'action de chacun dépend de celle des autres, s'articule autour de celle des autres, et peut porter sur celle des autres. A partir de ces nuances, l'analyse de l'activité des équipes implique plusieurs étapes, /Savoyant, 85/ :

- La première étape est l'analyse du processus de transformation d'un objet effectuée par les membres d'une équipe.
- Le deuxième étape est l'analyse de la répartition et de l'affectation des tâches au sein de l'équipe.
- Enfin, la dernière étape est l'analyse de la coordination interindividuelle. Celle-ci demande plusieurs caractérisations. Tout d'abord, le type d'activité mis en jeu dans le travail doit être déterminé. Il s'agit soit d'une action collective, soit d'une co-action. Ensuite, la coordination entre les opérateurs doit être caractérisée suivant trois points distincts :
  - Ses formes caractérisent les relations entre les éléments de l'activité.
  - Ses conditions reflètent la représentation chez chaque opérateur humain des éléments de l'activité des autres membres de l'équipe.
  - Ses moyens expliquent la manière dont est effectivement assurée la coordination.

La réalisation de cette analyse peut en fait être étudiée au travers de la manifestation de l'activité en site réel ou par modification des situations de travail. De plus, elle dépend du recueil de données objectives liées à la tâche effectuée par l'analyse de l'activité oculaire, posturale ou l'analyse des communications par exemple, ainsi que du recueil de données subjectives issues de l'analyse des traces de l'activité par des méthodes de verbalisation ou de classification, /Abed, 90/.

Les analyses propres à cette phase de conception doivent déterminer la séparation physique des postes de travail, les tâches partageables entre les individus, ainsi que le niveau de lisibilité de l'activité d'un opérateur par un autre, /Kasbi, 92/. De plus, elles permettent une classification des tâches : celles pouvant être totalement automatisées, celles ne pouvant pas l'être... En particulier, la classification des tâches de communication pourra être utile lors de la conception du dialogue homme-machine, mais aussi lors de la conception des salles de contrôle en agencant les différentes positions de travail de façon à favoriser les communications nécessaires entre les différents opérateurs. Pour chaque tâche effectuée sous la responsabilité de ces derniers, les besoins informationnels et le type d'assistance nécessaire doivent être prédéfinis. En fait, cette classification correspond à l'évaluation du degré d'automatisation et de la coopération homme-machine envisagée pour chaque poste de travail. Afin de les intégrer définitivement, la dernière étape consiste à spécifier l'interface de dialogue homme-machine, ainsi que les différentes interactions entre les postes de travail.

Dès que les spécifications de la nouvelle organisation sont effectuées, il s'agit de l'implémenter, puis de la valider à partir de la phase ascendante.

### **1.1.3. Phase d'évaluation**

La phase ascendante d'évaluation, basée sur l'analyse des tâches effectives, est l'évaluation du nouveau système homme-machine. Elle permet de valider ce dernier en respectant des critères spécifiques relatifs aux activités individuelles et aux interactions entre les individus. Les méthodes d'évaluation subjectives ou objectives doivent aboutir à l'analyse des problèmes rencontrés afin d'améliorer le système homme-machine. Par exemple, les objectifs de l'évaluation peuvent être liés à l'estimation de la performance globale du système homme-machine, c'est-à-dire l'écart entre la production réelle du système piloté et les objectifs fixés. Cette performance globale concerne non seulement celle de chacun des opérateurs face aux supports d'aide, mais aussi celle de l'équipe relative à l'efficacité des communications, /Baker et Salas, 92/. Elle détermine les erreurs dues à un système mal conçu ou celles dues à une mauvaise exécution des opérateurs. La phase d'évaluation peut aussi tenir compte de critères ergonomiques qui permettent d'expliquer les difficultés rencontrées lors de l'exécution d'une tâche donnée. Cette évaluation ergonomique des interfaces

doit intégrer la dimension collective pour justifier l'adéquation des interfaces aux opérateurs et aux objectifs individuels et collectifs, /Kasbi, 92/. Elle est cependant difficile à mettre en œuvre car elle cherche à analyser les activités mentales inobservables. C'est pourquoi, l'évaluation doit s'appuyer sur des méthodes de recueils de données subjectives, et/ou sur des modèles observateurs qui, à partir des données mesurables, aident à reconstituer ces activités mentales, ou à estimer la charge de travail des opérateurs.

Au travers de ces différents critères, l'évaluation du système homme-machine repose en fait sur trois phases, /El Mhamedi, 90/ :

- Une **évaluation structurelle** évalue l'efficacité des équipes en fonction du niveau de "coopérativité" (niveau d'autonomie, de polyvalence...) entre les différents opérateurs, c'est-à-dire de la possibilité pour chacun d'entre eux de travailler ensemble en vue d'atteindre un objectif.
- Une **évaluation qualitative** évalue les différentes alternatives d'affectation des tâches aux hommes ou aux machines en fonction des caractéristiques de chacun (niveau de compétence, niveau de fiabilité...).
- Une **évaluation quantitative** évalue la répartition des tâches entre la machine et l'homme en fonction des caractéristiques de la tâche (totalement automatique, semi-automatique, totalement manuelle).

Un protocole expérimental établissant le contexte expérimental et les critères d'évaluation est donc nécessaire pour mener à bien cette validation. L'analyse des données subjectives et objectives, recueillies lors des expérimentations, ainsi que l'analyse cognitive des activités permettront d'analyser les interfaces et les types de coopération implantés dans le système, afin de valider ou d'affiner celui-ci.

Cette méthodologie permet de spécifier l'ensemble des communications pouvant être intégrées dans un poste de contrôle. Ce dernier est défini de manière à pouvoir intégrer toutes les caractéristiques dynamiques des organisations humaines et techniques. Il contient donc tous les composants nécessaires pour satisfaire les objectifs monopostes et/ou multipostes.

## **1.2. Réseau de communication dans une organisation multiposte**

L'architecture de base d'un poste de contrôle permet une communication homme-machine interne et externe. Les outils de communication peuvent alors être très variés. Par exemple, les différentes interactions intrapostes et interpostes s'effectuent à partir de plusieurs types d'interfaces homme-machine. De plus, elles déterminent les structures organisationnelles multipostes. Ces différents points sont abordés ci-après.

### **1.2.1. Description d'un poste de contrôle**

Lors de la conception d'un système homme-machine, les fonctions spécifiques et partageables de chacun des membres d'une équipe, ainsi que le rôle des outils d'assistance doivent être déterminés afin d'élaborer les différents postes de travail correspondants. Chaque poste de contrôle a ses propres objectifs locaux régis par les objectifs globaux. Il permet d'effectuer les activités de contrôle et de surveillance relatives au suivi ou à la commande d'un processus ou sous-processus. Il est globalement constitué d'un support technique d'une part, et d'un support humain d'autre part, figure II-2. Le premier contient des supports de travail pour communiquer avec le support humain d'un même poste, des supports d'échange pour les protocoles de communications lors des transferts automatiques de données avec d'autres postes, des outils d'assistance et le système de supervision. Le second intègre un ou plusieurs opérateurs humains.

Les communications homme-homme au sein d'un poste de contrôle sont alors de plusieurs types. En effet, elles sont internes si elles concernent les membres d'un même poste, ou externes dans le cas contraire. Ces communications externes sont directes si elles s'effectuent sans utiliser

de supports techniques tels qu'un téléphone, une radio, une messagerie électronique ou encore un convoyeur. Elles s'effectuent en transférant un support informationnel particulier, oralement ou manuellement. Par conséquent, elles sont manifestes surtout lorsque les postes de contrôle ne sont pas trop éloignés géographiquement. Dans le cas contraire, ces communications externes sont indirectes et utilisent des supports de travail spécifiques, tels qu'un clavier fonctionnel ou un téléphone. Elles transitent ensuite par des supports d'échange qui mettent en œuvre des protocoles de communication à partir de liaisons physiques interpostes, comme une ligne téléphonique ou un réseau local. Ces transferts d'informations s'effectuent avec les supports techniques de travail. Ils peuvent aussi se faire automatiquement à partir des outils d'assistance internes au poste de contrôle. Par exemple, à un instant donné, ces derniers peuvent transférer plusieurs informations par un réseau local via un écran, une imprimante ou un outil d'assistance appartenant à un autre poste de contrôle.

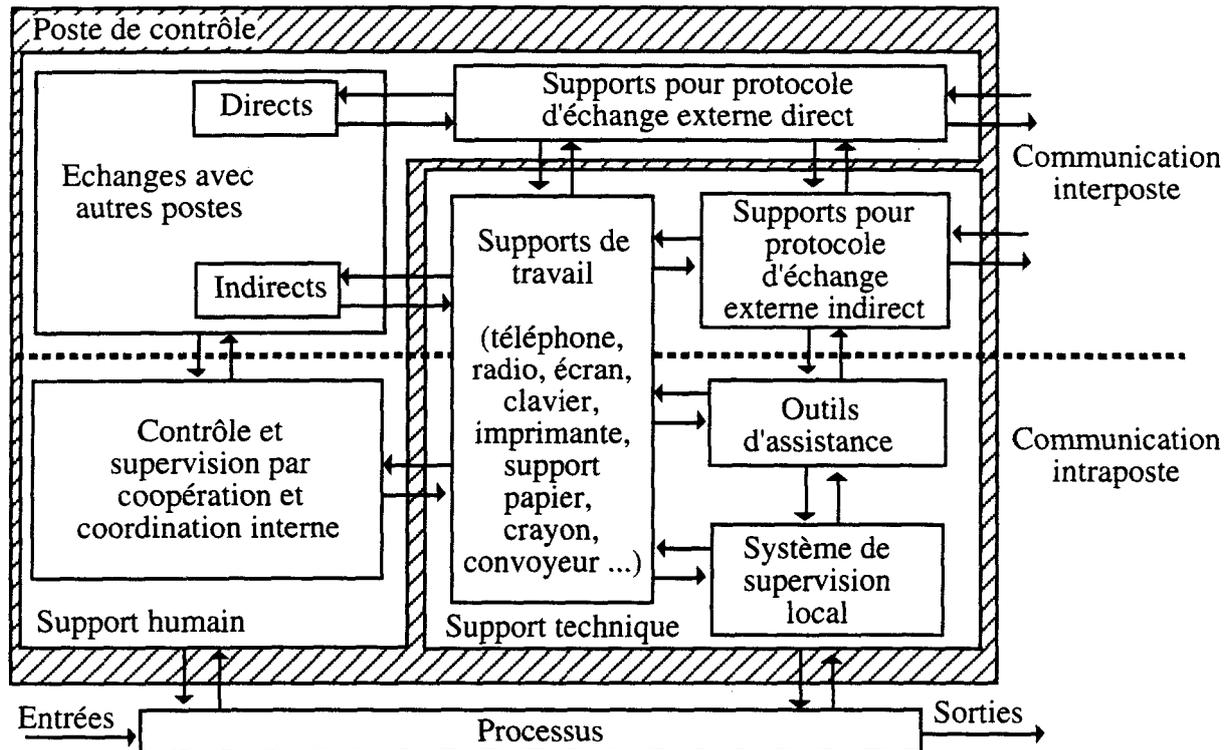


Figure II-2 : Structure d'un poste de contrôle.

Un poste de travail présente alors deux types de communications homme-machine. L'un est local. Il s'agit d'interfaces individuelles, mettant en jeu un opérateur humain et une machine. Par contre, l'autre concerne les interfaces propres aux systèmes collectifs, prenant en compte la composante collective dans le travail d'équipe.

### 1.2.2. Communications homme-machine

Aujourd'hui, la création d'interfaces homme-machine s'oriente vers des systèmes évolués et plus adaptés à chaque opérateur. Il s'agit par exemple d'interfaces personnalisées, dites flexibles, qui s'adaptent aux variations de l'environnement, et plus particulièrement aux caractéristiques de l'opérateur humain, /Coutaz, 90/. Si cette flexibilité est automatique, il s'agit d'interfaces adaptatives, si elle est manuelle, d'interfaces adaptables. Différentes possibilités pour adapter au mieux une interface aux besoins de la tâche, de l'utilisateur et de la machine sont alors envisageables, /Hancock et Chignel, 90/ :

- adaptation en fonction des capacités de l'opérateur humain ou de sa qualification,
- adaptation à l'utilisateur en changeant le style du dialogue,

- adaptation relative au concept "What you see is what you get" (ce que vous voyez est ce à quoi vous accédez),
- adaptation en fonction de la charge de travail mentale de l'utilisateur.

A titre d'exemple, nous pouvons citer le MDI (Module Décisionnel d'Imagerie) qui a pour objectif de résoudre un ensemble de problèmes propres aux interactions entre l'homme et la machine, /Tendjaoui, 92/. En effet, cette interface dite "intelligente" vise à choisir automatiquement le contenu informationnel qu'elle affiche en répondant aux trois questions suivantes : "quoi" présenter à l'opérateur ; "quand" lui présenter l'information ; "comment" la lui présenter. Bisson et al /92/ proposent des interfaces homme-machine multimodales et adaptatives, basées sur les interfaces adaptatives intégrant différents types de dialogues. A cet effet, les auteurs présentent différents postes de travail utilisant un écran tactile et/ou une commande vocale, et/ou la synthèse de la parole.

Quant au contexte collectif, de nouveaux concepts d'interfaces se développent actuellement. Globalement, ils s'orientent vers les **systèmes collecticiels** ("Groupware"), définis comme des systèmes informatiques qui offrent un environnement partagé entre plusieurs utilisateurs engagés dans une tâche commune, /Beaudouin-Lafon, 92/. A titre d'exemple, Martensson et Stahre /92/ rappellent les concepts des Systèmes de Production Anthropocentriques ("Anthropocentric Production Systems"). Ces systèmes se veulent être transparents, ajustables pour des niveaux d'expérience différents et fiables. Ils prennent en considération les différentes interactions entre les individus en fonction de l'organisation de travail initiale. Nous pouvons également citer les interfaces de support au travail coopératif ("Computer-Supported Cooperative Work"), /Hellman, 92/, ou encore les systèmes d'aide à la décision de groupe ("Group Decision Support Systems"), /Eden, 92/. Le but de ces interfaces est de faciliter les communications et le partage des informations entre les équipiers, de manière à améliorer la productivité de ces derniers. En fait, les systèmes collecticiels peuvent être classés en fonction des exigences temporelles propres à l'accès à l'information et/ou selon l'éloignement des différents individus :

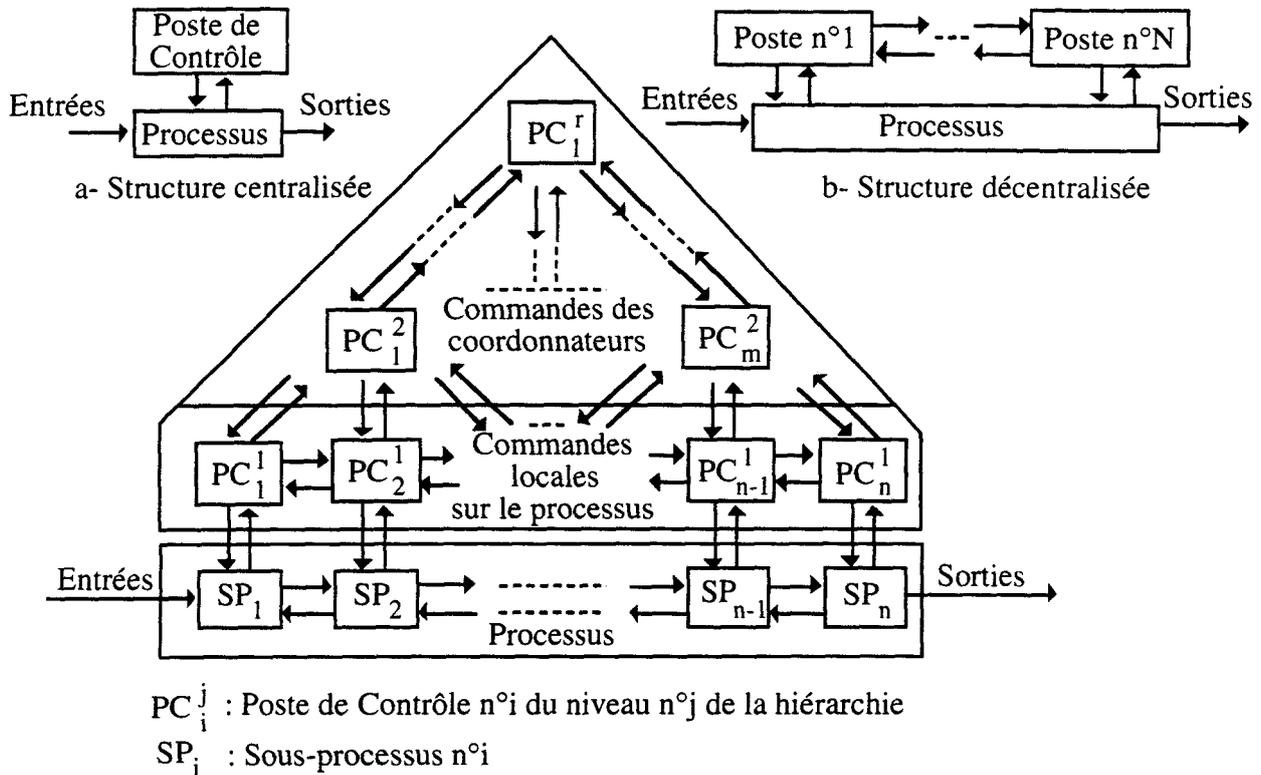
- D'une part, les **outils synchrones** permettent à plusieurs opérateurs d'agir simultanément sur un document, chacun d'eux étant informé en temps réel sur ce que font les autres. Par contre, les **outils asynchrones** exigent une intervention séquentielle des utilisateurs.
- D'autre part, les **systèmes locaux** sont prévus pour fonctionner quand les opérateurs sont physiquement présents dans la même pièce, alors que les **systèmes à distance** permettent la coopération entre individus physiquement distants.

Par conséquent, l'objectif de tels systèmes est de s'affranchir du temps et/ou de l'espace en utilisant les avantages des systèmes multimédias. Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, diverses communications peuvent être mises en œuvre dans un système homme-machine. De la même façon, une organisation multiposte, en fonction de sa décomposition structurelle et fonctionnelle, peut présenter divers types de liaisons.

### 1.2.3. Structures organisationnelles globales

Un poste de contrôle reste une organisation locale spécifique. De plus, il permet de constituer toutes les structures organisationnelles citées dans le chapitre précédent. Quelques exemples illustrent ici les principales structures envisageables pour constituer une organisation globale, figure II-3. Dans la structure centralisée, figure II-3-a, un seul poste de contrôle prend en charge la commande du processus. Les supports d'échange externe sont inutiles. En revanche, la structure décentralisée, figure II-3-b, est décomposée en unités de commande prises en charge par différents postes de contrôle. C'est pourquoi, une communication entre les postes est souvent nécessaire. Enfin, dans le dernier exemple, la structure est hiérarchisée et décomposée en plusieurs niveaux décisionnels, figure II-3-c. Dans une telle structure, plusieurs niveaux de communication peuvent être nécessaires.

Par ailleurs, le transfert automatique ou manuel des informations s'effectue conformément aux différents protocoles d'échange. Les communications interpostes sont alors sélectives ou transmises à tous, non sollicitées ou à la demande, avec ou sans accusé de réception, répétées ou émises une seule fois, /Chaib-Draa, 90/. Ainsi, l'ensemble des liaisons qui caractérisent le réseau de communication interposte permet, d'une part une coordination en série ou en parallèle de l'activité, et d'autre part une coopération relative à la localisation des postes de travail, à la chronologie des actions, aux moyens de communication, et aux fonctions de chaque poste (cf chapitre I, §2.3.).



c- Structure hiérarchisée

Figure II-3 : Exemple de structures organisationnelles.

Différents sous-processus dépendants, affectés à plusieurs postes de contrôle, nécessitent une coordination en série. Par contre, si les tâches ou sous-tâches effectuées par divers postes sont indépendantes, elle peut être effectuée en parallèle. Or, lorsque plusieurs postes peuvent avoir la responsabilité d'un même processus, des problèmes de coopération interposte, liés surtout aux capacités intrinsèques des décideurs humains et techniques, peuvent survenir. Ce qui nous amène à développer les caractéristiques d'un système collecticiel particulier qui met en œuvre une coopération homme-machine multiniveau.

### 1.3. Principes d'une coopération homme-machine multiniveau

A partir de ces structures de base, la coopération interposte peut être de type verticale ou horizontale (cf chapitre I, §3.2.). Les principes de coopération homme-machine sont applicables aussi bien dans une organisation monoposte que multiposte. Cependant, les problèmes dus à l'autonomie des postes de travail, ainsi que les difficultés d'affectation des tâches entre l'homme et la machine complexifient la répartition des tâches. Les carences d'une régulation en ligne, par les modes explicite ou implicite, dans un poste de contrôle, peuvent alors être contrecarrées par une coopération multiniveau, dans laquelle un poste de contrôle assiste ou gère directement la répartition des tâches de contrôle et de surveillance d'un autre poste.

### 1.3.1. Affectation des tâches dans une organisation multiposte

Selon les objectifs de chaque poste de travail, les types de coopération interposte et intraposte doivent être déterminés lors de la conception du système homme-machine. Dans une organisation monoposte, peut être mise en œuvre, soit une coopération homme-machine verticale dans laquelle le support humain reste maître des actions à effectuer sur le procédé, soit une coopération homme-machine horizontale qui consiste à partager dynamiquement l'ensemble des tâches entre les opérateurs du support humain et les agents du support technique. La coopération homme-machine peut être hybride dans la mesure où l'environnement multitâche d'un poste nécessite l'assistance d'outils de type contrôleurs et/ou consultants et/ou agents. De même, un poste de contrôle peut intervenir auprès d'un autre poste, en tant que système d'aide à la décision, au diagnostic et/ou à l'action. En effet, un poste peut coopérer avec d'autres postes d'un niveau hiérarchique identique ou différent, à la fois verticalement pour s'aider ou se conseiller mutuellement, et horizontalement pour le partage effectif statique ou dynamique des tâches.

Quand une tâche quelconque est à réaliser, son affectation dépend à la fois de son niveau de décomposition, de ses exigences fonctionnelles et temporelles. Dans une organisation multiposte, la répartition des tâches consiste alors à répartir, selon un ou plusieurs critères, un ensemble de tâches entre plusieurs ressources humaines et techniques, de manière statique ou dynamique. En effet, elle s'effectue non seulement entre les différents postes, mais aussi entre le support humain et le support technique de chacun des postes, et entre les différents décideurs d'un même support, le support technique étant doté d'outils d'assistance de type agent. L'organisation multiposte peut ainsi mettre en œuvre plusieurs filtres consécutifs en amont et en aval de chaque poste, non seulement entre les divers postes de l'organisation, mais aussi au sein d'un même poste, pour effectuer le partage des tâches.

Un poste de contrôle assimilé à une Cellule Dynamique de Travail, assistée par un support technique, est évolutif dans le temps. De plus, il modifie ses modes de coopération ou de coordination initiaux en fonction du contexte du travail et de ses compétences spécifiques, identiques, ou complémentaires à d'autres postes. Par exemple, lors de la mise en œuvre d'une répartition dynamique intraposte, les compétences des décideurs humains et techniques sont mises en jeu, figure II-4-a.

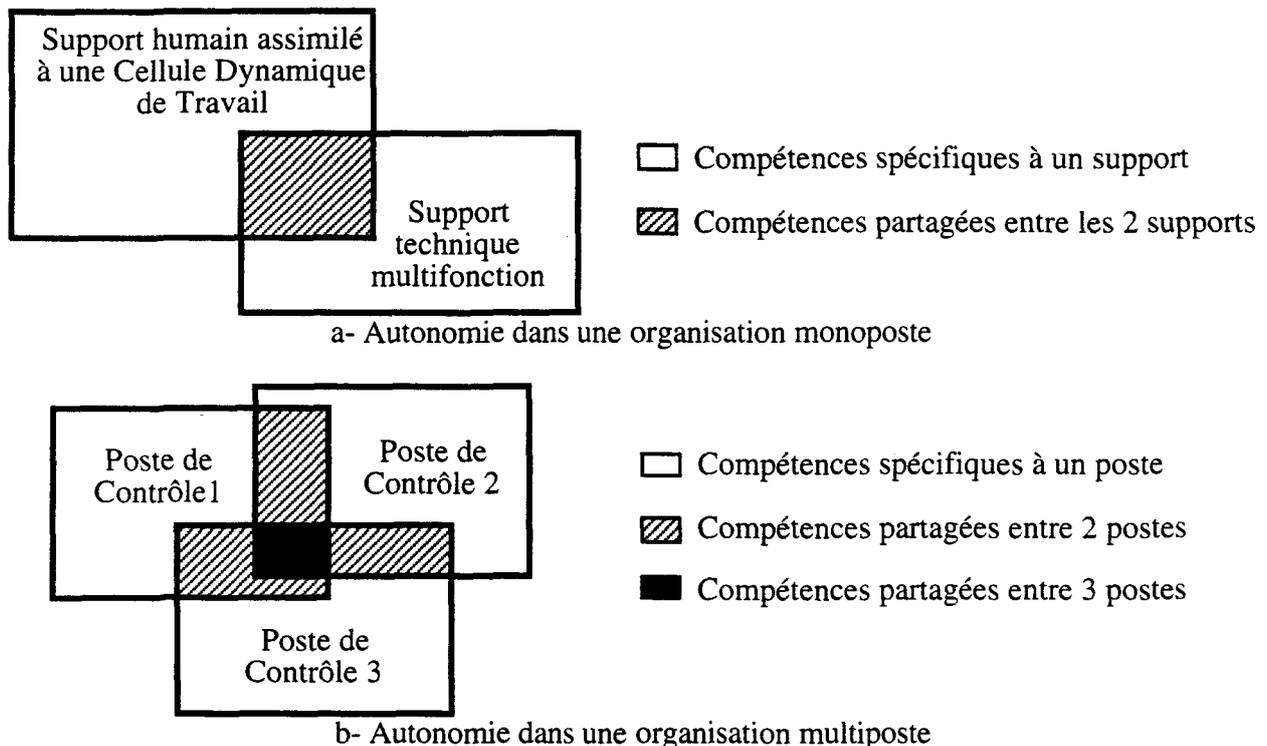


Figure II-4 : Compétences des décideurs d'une organisation multiposte.

Les fonctions spécifiques entraînent une affectation rigide, alors que les fonctions partageables permettent une affectation flexible. Une organisation monoposte possède donc un niveau de compétence locale, issu des supports techniques et humains. Ce degré de compétence, dans une organisation multiposte, se décompose encore une fois pour déterminer les compétences spécifiques à chaque poste et celles partagées entre les postes, figure II-4-b.

Dans ces dernières, il faut différencier, d'une part les connaissances similaires qui permettent à plusieurs postes d'effectuer indépendamment une même tâche, et d'autre part les ressources communes utilisées par plusieurs postes différents. Par exemple, pour un même niveau décisionnel, il se peut que les compétences d'un opérateur humain ou d'un outil d'assistance ou que l'utilisation d'un même support informationnel, comme un écran ou une imprimante, soient communes à plusieurs postes différents.

Toutefois, les compétences dynamiques des postes de contrôle compliquent cette affectation statique ou dynamique.

### **1.3.2. Incomplétude statique et dynamique de la partageabilité**

La variabilité des compétences et des disponibilités des composants techniques et humains d'un même poste entraîne une variabilité de la partageabilité des tâches, appelée **incomplétude de la partageabilité**.

A l'origine, au sein d'un même poste de contrôle, les problèmes d'affectation entre un opérateur humain et un agent, liés à la capacité de ces deux décideurs pour exécuter une tâche, s'expriment selon deux formes d'incomplétudes, l'**incomplétude statique** et l'**incomplétude dynamique de la partageabilité**, /Debernard, 93/ :

- L'incomplétude est dite statique lorsque l'ensemble des sous-tâches correspondantes est réalisable par un même décideur sauf au moins une. Ainsi, à titre d'exemple, pour un système d'aide de type agent, elle se traduit lors d'une automatisation partielle, c'est-à-dire quand toutes les sous-tâches issues de la décomposition d'une même tâche globale sont automatisables sauf au moins une. Il faut ici souligner que, dans le cadre d'une répartition dynamique des tâches entre un opérateur humain et un système d'aide, pour qu'une sous-tâche soit automatisable, l'agent doit être capable d'effectuer toutes les activités correspondantes. Dans le cas contraire, l'outil ne serait pas de type agent et la répartition de la tâche serait incomplète.
- L'incomplétude est dite dynamique quand la capacité de l'agent ou de l'opérateur humain pour résoudre une même sous-tâche varie suivant le contexte. Par exemple, un opérateur humain peut être temporairement inapte à effectuer une sous-tâche en raison d'une surcharge de travail.

De plus, l'allocation des sous-tâches d'une même tâche globale à deux décideurs différents (un opérateur humain et un agent) est à éviter car elle peut nécessiter une communication supplémentaire, ou compromettre l'intégrité de la tâche globale, /Debernard, 93/. Pour que la coopération soit efficace, une communication minimale est toutefois nécessaire. Le problème est alors de savoir qui fait quoi et comment il le fait. Ceci permet d'une part de résoudre des conflits de coordination lorsqu'un des deux décideurs tente de s'allouer une tâche dédiée à l'autre, et d'autre part d'éviter les conflits décisionnels lorsque, par exemple, deux tâches fortement dépendantes sont affectées à deux décideurs différents.

D'une manière plus générale, ces problèmes relatifs à l'incomplétude de la partageabilité se retrouvent également au sein d'une Cellule Dynamique de Travail, et dans une organisation multiposte. Les compétences spécifiques déterminent l'incomplétude statique, par rapport aux exigences de la tâche à réaliser. Par contre, l'incomplétude dynamique dépend de la disponibilité des ressources humaines et/ou techniques.

L'incapacité fonctionnelle d'un poste de contrôle peut se produire lors d'une augmentation de sa charge de travail, ou lors de l'apparition d'une nouvelle tâche beaucoup plus prioritaire, ou encore lorsqu'une ressource partageable n'est pas disponible. En effet, par exemple, un opérateur humain ayant toutes les compétences requises pour la commande du processus relative à son poste, peut, s'il est en état de surcharge de travail, requérir l'assistance du support technique, ou demander l'aide d'un autre opérateur humain. Or, à partir d'un certain seuil, les opérateurs d'un même poste risquent de ne plus pouvoir maîtriser la situation, même avec le support des outils d'assistance. C'est pourquoi, les tâches de contrôle et de surveillance sont réparties entre plusieurs postes, lorsque l'organisation multiposte mise en place le permet. Le processus est inversé quand la charge de travail diminue. Le nombre de postes de travail actifs, le nombre d'opérateurs humains par poste, la distribution des informations peuvent donc évoluer dans le temps.

La figure II-5 illustre ce principe de régulation de l'activité dans un poste de contrôle. Elle est basée sur la relation généralement admise entre la performance et la charge de travail. La zone A est l'activité optimale d'un opérateur qui maintient un niveau d'efficacité constant. Afin d'éviter de dégrader l'efficacité de l'opérateur, due à une activité trop intense où les informations à traiter deviennent trop importantes, les outils d'assistance et/ou l'intervention d'autres opérateurs humains permettent d'augmenter les capacités intrinsèques d'un même poste et de maintenir une performance optimale. Il s'agit de la zone B qui correspond au dépassement du seuil 1. A partir d'un autre seuil 2, un seul poste ne peut plus gérer l'ensemble des informations. C'est pourquoi, il transfère si possible une partie de celles-ci à un autre poste disponible.

Les communications interpostes, dues à ces limites, doivent être minimisées de manière à optimiser la polyvalence et l'efficacité de chaque poste de contrôle. Ces problèmes d'incomplétude peuvent se résoudre en prévoyant les tâches et en planifiant leur affectation. Par exemple, dans une organisation hiérarchisée, la répartition des tâches subit plusieurs filtres, allant d'une affectation prévisionnelle à une affectation en ligne. Ces filtres permettent de réguler à plus ou moins long terme l'activité des postes de contrôle et d'optimiser leur fonctionnement normal. Ce phénomène de régulation par niveau sera illustré dans la seconde partie de ce chapitre, avec l'exemple du contrôle aérien.

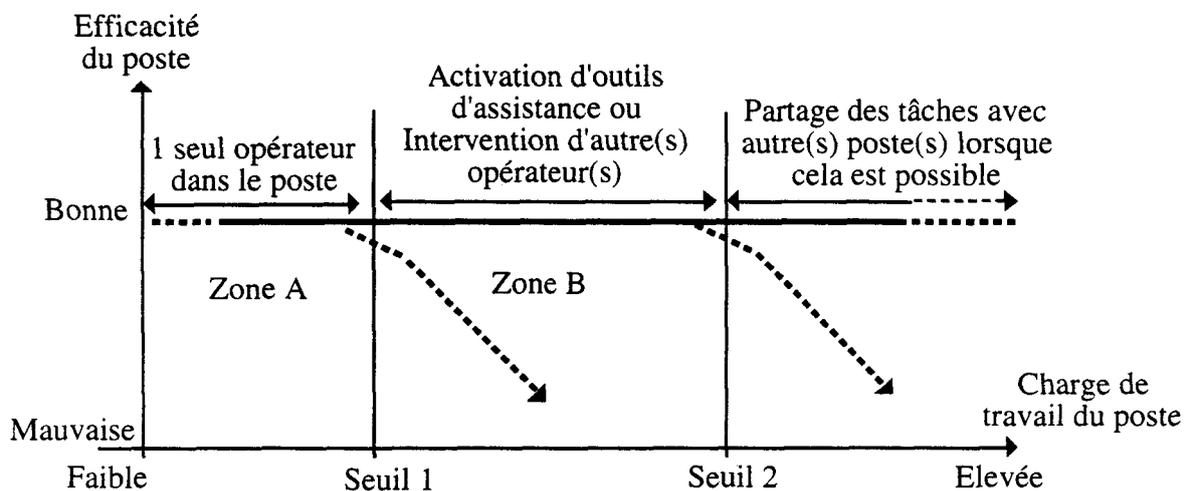


Figure II-5 : Régulation de l'activité dans un poste de contrôle.

Dans le cadre de notre étude, nous nous intéressons particulièrement à la répartition dynamique des tâches entre un opérateur humain et un système d'aide, afin d'optimiser la régulation de l'activité humaine en augmentant les capacités du poste concerné. C'est pourquoi, nous supposons ici l'existence d'une confiance mutuelle entre les opérateurs humains. Ainsi, les facteurs psychologiques ou organisationnels qui bloquent parfois la transmission de l'information, par exemple par la rétention des données pour des raisons stratégiques ou pour des raisons de conflits, ne sont pas pris en compte, /De Keyser, 90/. Nous nous limitons donc à d'autres

problèmes qui sont spécifiques à l'affectation des tâches entre l'homme et la machine, et qui augmentent les difficultés de mise en place d'une coopération homme-machine.

### 1.3.3. Autres problèmes d'affectation des tâches entre la machine et l'homme

La répartition dynamique des tâches de contrôle et de supervision est une forme d'automatisation permettant notamment de réguler l'activité monoposte par une régulation de la charge de travail. Cependant, plusieurs problèmes élémentaires soulèvent les difficultés de mise en œuvre d'une telle coopération. Le degré d'automatisation d'un système homme-machine pose non seulement des problèmes d'incomplétude de la partageabilité, mais aussi de confiance. En effet, l'opérateur humain peut réagir de deux manières opposées, /Debernard, 93/. D'une part, il peut rejeter totalement le système d'aide s'il se méfie des capacités de l'agent. Ce comportement est relatif à une **confiance active** dans laquelle les solutions de l'agent sont vérifiées ou rejetées en permanence. D'autre part, ces dernières peuvent être entièrement acceptées. C'est le cas de la **confiance aveugle ou passive** qui peut être dangereuse si l'agent n'est pas infallible. Le niveau de confiance accordé au système d'aide peut ainsi modifier l'efficacité de celui-ci.

En outre, un système homme-machine nécessite des relations complémentaires et non compétitives entre le support humain et le support technique, en fonction de leur compétence. A l'heure actuelle, la machine est supérieure à l'homme pour sa capacité de calcul, la diversité et la sensibilité de certains de ses capteurs, la stabilité de ses performances au cours du temps en fonctionnement normal et sa plus grande souplesse vis-à-vis de la quantité de travail à effectuer, /Debernard, 93/. Cependant, la capacité de raisonnement de l'opérateur humain, ses possibilités de reconnaissances de situation, sa capacité d'apprentissage, sa mémoire associative pratiquement illimitée font que la présence humaine dans le contrôle et la surveillance des systèmes complexes reste encore indispensable. Ainsi, l'homme reste irremplaçable pour ses capacités à résoudre des problèmes imprévisibles, alors que la machine est plus performante pour exécuter des tâches de routine entièrement automatisables. Cependant, si le degré d'automatisation est trop important, l'opérateur humain tend à perdre ses capacités fonctionnelles, telle que l'anticipation. C'est pourquoi, suivant les caractéristiques de la tâche, différents modes de répartition dynamique peuvent être considérés. En effet, elle peut être d'une part explicite ou implicite, et d'autre part préemptive ou non préemptive. Dans une **allocation préemptive**, le décideur qui gère la répartition des tâches, l'opérateur humain en mode explicite ou le calculateur en mode implicite, peut modifier en ligne sa répartition initiale. Ces divers modes dépendent de plusieurs facteurs, /Debernard, 93/ :

- Le premier facteur est relatif à la **capacité de la machine**. En effet, celle-ci peut être capable ou incapable de traiter partiellement ou entièrement une tâche.
- Le second est la **capacité humaine**. Celle-ci est fonction des capacités décisionnelles requises par une tâche et de la charge de travail nécessaire pour l'exécuter.
- Le **maintien de la mémoire opérationnelle** de l'opérateur est également un facteur à prendre en compte. En effet, il est important que le décideur humain continue à traiter des tâches qui lui permettent de maintenir sa mémoire opérationnelle, même si celles-ci sont automatisables.
- Il en est de même pour le **maintien des connaissances** de l'opérateur. En effet, les tâches qui permettent à ce dernier d'entretenir le modèle mental qu'il a du système doivent lui être allouées.
- Enfin, la mise en œuvre d'une répartition préemptive dépend de la **transférabilité** des tâches, définie par la possibilité et la qualité ergonomique de transfert d'une tâche d'un décideur à l'autre lors d'une répartition dynamique. Si cette transférabilité est bonne, la répartition pourra être préemptive, sinon elle sera non préemptive.

Cependant, le mode explicite implique une charge supplémentaire de gestion de la répartition des tâches pour l'opérateur humain. Celle-ci peut devenir contraignante surtout lorsque ses exigences sont élevées. Quant au mode implicite, l'algorithme de la répartition automatique peut présenter quelques failles, dues aux difficultés d'évaluation de la performance, de la charge de travail ou des exigences des tâches. Il peut donc parfois entraîner des conséquences dangereuses

pour la sécurité. De plus, même si la transférabilité des tâches est bonne, la répartition préemptive peut poser à terme des inconvénients dus à des va-et-vient dans l'affectation. Par exemple, cet aspect peut se produire quand la charge de travail varie énormément dans le temps ou quand la confiance active en mode explicite est trop importante.

Dans le cadre d'une coopération multiniveau, un filtrage initial de la répartition des tâches partageables d'un poste de contrôle, peut être pris en charge par un second poste. Cette démarche permet de résoudre certains des problèmes évoqués plus haut, et d'optimiser la régulation de l'activité monoposte, à partir de plusieurs modes.

### 1.3.4. Modes de gestion de la répartition des tâches dans un poste de contrôle

A chaque niveau décisionnel, nous considérons tout d'abord deux aspects. Le premier, correspondant aux choix stratégiques qui évalue une situation générale, gère les ressources humaines et/ou techniques à plus ou moins long terme. Le second relatif aux choix tactiques met en œuvre les décisions à court terme et permet de gérer la commande du processus en temps réel afin de résoudre au mieux une situation particulière. A partir de ces deux principes, diverses solutions sont envisageables pour la mise en œuvre d'une coopération homme-machine horizontale monoposte, figure II-6.

Celle-ci présente, en effet, au niveau stratégique un coordonnateur qui gère la commande du répartiteur des tâches tactiques de contrôle et de surveillance, entre l'opérateur humain et l'agent d'un même poste A. La **gestion interne** de la commande du répartiteur de tâches de celui-ci est effectuée par les composants qui le constituent : par l'opérateur humain en mode explicite ou par le calculateur en mode implicite. Dans l'un et l'autre cas, les fonctions stratégiques pour le partage des tâches tactiques sont donc prises en charge par un des deux supports du poste A. Par contre, la **gestion externe** est réalisée par un autre poste de contrôle, tandis que la **gestion mixte** est réalisée en amont par le poste B puis en aval par le poste A.

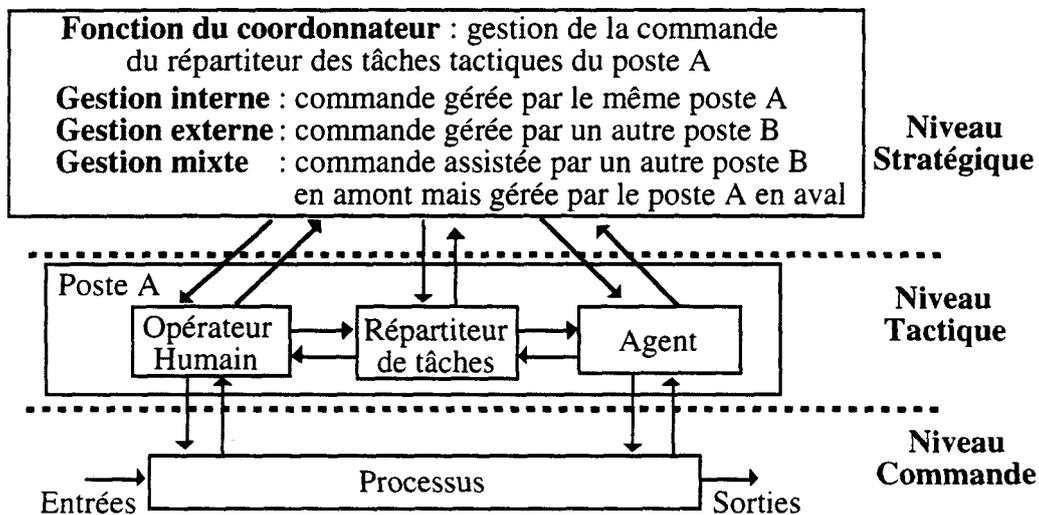


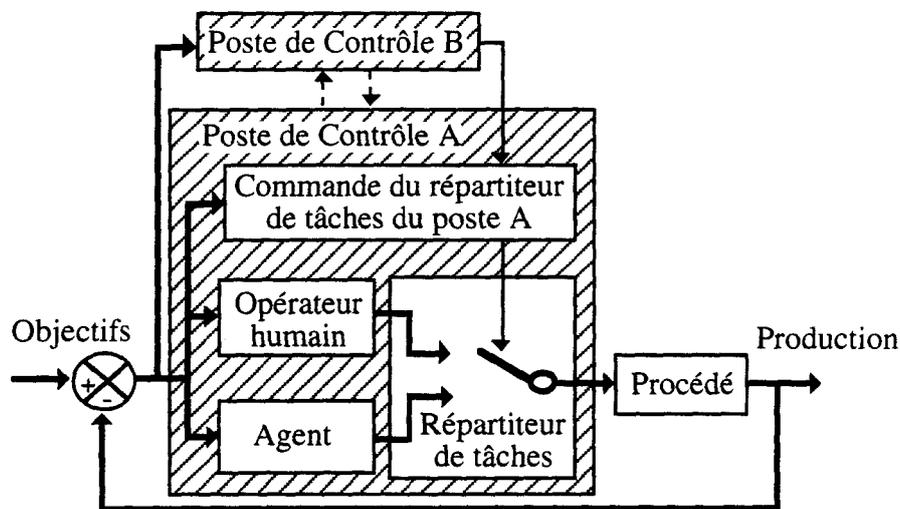
Figure II-6 : Niveaux décisionnels dans une coopération horizontale, pour un poste A.

Nous ne reviendrons pas sur la gestion interne qui a déjà été développée au chapitre I. Nous développerons celle gérée par un autre poste B à partir d'une gestion externe ou mixte. Dans la suite, pour simplifier, nous considérons que l'objectif de travail de ce poste est unique et concerne la gestion de la répartition des tâches de l'autre poste.

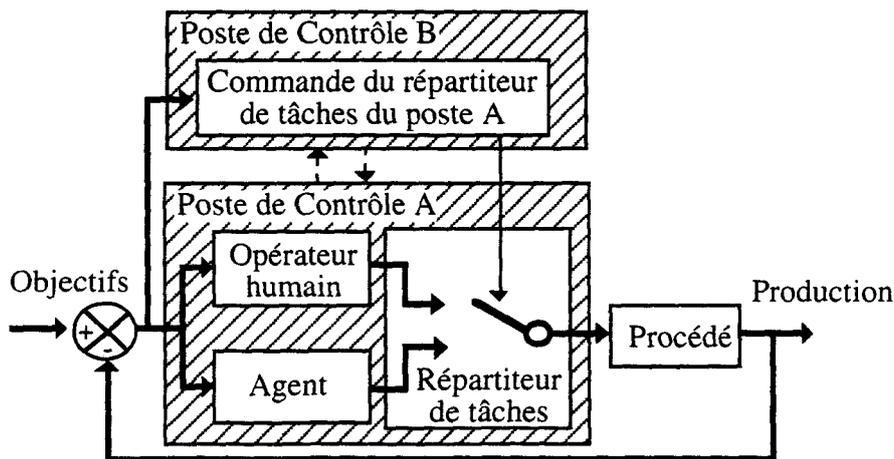
Le poste B peut alors piloter le répartiteur de tâches du poste A, soit indirectement, soit directement. Dans le premier cas, il assiste le gestionnaire du répartiteur des tâches du poste A (gestion mixte), figure II-7-a, dans le second il est le seul à effectuer cette commande (gestion externe), figure II-7-b.

En ce qui concerne la gestion mixte, le poste B transfère ses propositions au poste A, dans lequel le mode de répartition est soit explicite, soit implicite. Chaque proposition effectuée en amont doit être analysée en aval. Ces propositions peuvent être par défaut validées automatiquement par le poste B, puis modifiées ou acceptées par le poste A. Il s'agit d'une assistance active pour une coopération horizontale préemptive puisque le gestionnaire de la répartition du poste A peut remettre en cause l'affectation effectuée en amont. Dans le cas contraire où la validation n'est effectuée que par le poste A, l'assistance est passive.

Relativement aux objectifs du poste B, l'outil d'assistance de ce dernier est une aide à l'affectation en ligne ou à l'affectation prévisionnelle, des tâches du poste A. Dans le cas prévisionnel, il concerne certes un horizon à plus long terme que celui du poste A. C'est pourquoi, pour une gestion mixte par exemple, le poste B peut éventuellement valider ses propositions relatives à une charge de travail future et le poste A modifier en ligne les affectations initiales en fonction de sa charge réelle. Lorsque cela est possible, afin d'éviter de les remettre en cause, certaines décisions d'affectation peuvent être prises en accord avec les deux postes.



a- Répartition dynamique assistée par le poste B



b- Répartition dynamique gérée par le poste B

Figure II-7 : Rôle du poste B sur la répartition des tâches du poste A, dans une coopération multiniveau.

Ainsi, l'exemple d'une organisation biposte donne un aperçu d'application d'une coopération homme-machine multiniveau. Une des difficultés majeures concernant la mise en place

de ce type de système coopératif concerne les spécifications des outils d'aide adéquats, en fonction des objectifs temporels et fonctionnels de chacun des postes concernés. Une telle coopération peut cependant résoudre certains problèmes, surtout lorsque les opérateurs sont soumis à une charge de travail très variable qu'il est difficile, voir impossible, de prévoir à long terme. C'est le cas par exemple de la gestion du trafic aérien.

## 2. Coopération multiniveau dans le contrôle aérien

Pour les besoins de notre étude, nous allons dans un premier temps, présenter les caractéristiques principales du contrôle du trafic aérien, pour ensuite soulever le problème d'assistance dans les positions de contrôle qui contiennent chacune deux postes de travail.

### 2.1. Présentation du contrôle du trafic aérien

Nous développons d'une part, l'organisation globale pour la gestion du contrôle aérien, et d'autre part les fonctions générales assurées par les contrôleurs du trafic aérien. Ensuite, nous décrivons le fonctionnement général d'une unité de contrôle ou position de contrôle dans laquelle deux postes sont intégrés : un pour le "contrôleur radar" qui réalise les tâches tactiques et un autre pour le "contrôleur organique" qui effectue les tâches stratégiques. Les deux contrôleurs ont des compétences similaires. Ils travaillent ensemble et coordonnent leurs activités de contrôle avec les autres positions.

#### 2.1.1. Organisation globale du contrôle aérien

L'organisation globale du contrôle aérien est composée de plusieurs niveaux interdépendants, figure II-8. En effet, il s'agit de filtres successifs dont les objectifs concernent des horizons temporels décroissants, en adaptant au mieux l'offre à la demande prévisionnelle et la demande à l'offre effectivement disponible, /Garot, 92/.

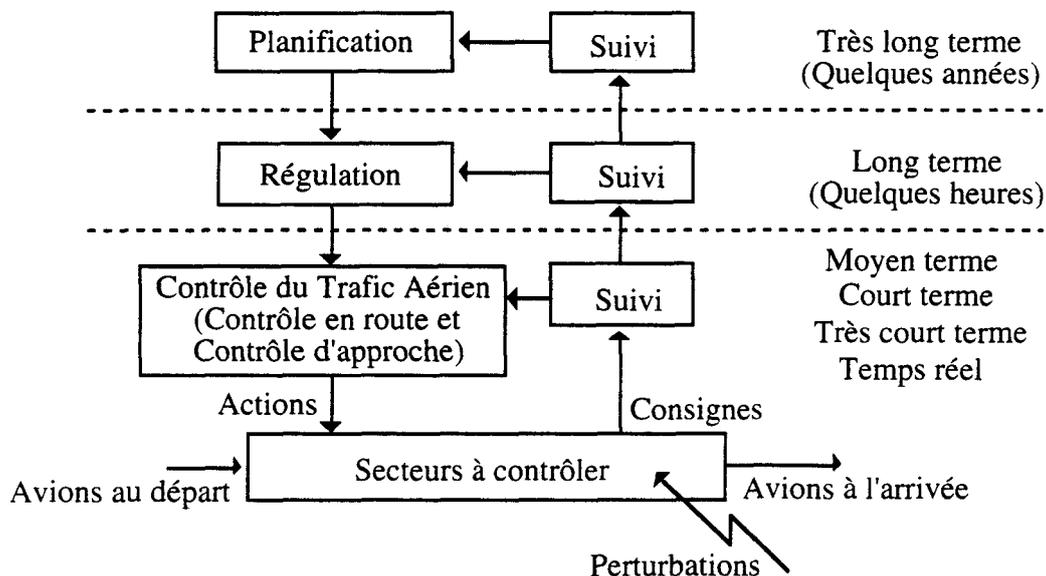


Figure II-8 : Organisation globale pour la gestion du contrôle aérien, adaptée de /Garot, 92/.

Les horizons temporels de la planification peuvent dépasser les 5 ans. Ils sont nécessaires du fait des délais de conception, de réalisation et de mise en œuvre des futurs systèmes.

La régulation pallie les aléas de la planification. Elle agit sur les heures de départ des avions. Son rôle est d'optimiser l'utilisation de l'espace aérien disponible, en évitant de surcharger l'activité des contrôleurs du trafic aérien. Elle constitue alors un filtrage stratégique et quantitatif puisque son but est de limiter le nombre d'avions qui vont évoluer à un horizon temporel donné dans une zone géographique prédéfinie.

Quant au contrôle du trafic aérien, il est géré par divers centres de contrôle, divisés en secteurs géographiques pris en charge par un ou plusieurs contrôleurs aériens humains, organisés en unités de contrôle. Ces dernières assurent le contrôle des avions qui survolent les secteurs dont elles ont la charge. Néanmoins, elles prennent également en compte d'une part les contraintes des autres positions qui contrôlent les secteurs adjacents aux siens, et d'autre part les objectifs généraux du contrôle aérien. Chaque centre de contrôle effectue le "contrôle en route" c'est-à-dire qu'il est responsable des avions en phase de croisière et utilisant des axes aériens prédéfinis. Le "contrôle d'approche" permet, quant à lui, de gouverner les avions à proximité des aéroports. Notre étude s'applique au contrôle "en route".

Cette organisation du contrôle s'effectue dans un espace aérien découpé verticalement et horizontalement en différentes zones et régions de contrôle, et composé de zones interdites au survol, de zones réglementées, de zones non surveillées et de zones contrôlées. Lorsque les conditions météorologiques sont très favorables, pour certains avions, les pilotes peuvent voler "à vue" et sont alors tenus de respecter des règles spécifiques.

Par contre, dans la plupart des cas, d'autres appareils, et en particulier les avions commerciaux sont gouvernés par les services des contrôleurs de la Navigation Aérienne. Brosselin /92/ définit ces derniers comme les "chorégraphes du ciel" où rien n'est fait au hasard, où chaque mouvement est prévu, ordonné, réglementé, et où la moindre perturbation remet en cause l'ordonnancement initial de leurs tâches. Le "ballet des avions" dans l'espace ne laisse, en effet, aucune place à l'improvisation. De plus, l'auteur considère le contrôle aérien comme étant, à l'échelle planétaire, le plus "grand mécanisme de synchronisation" conçu par l'homme.

En fait, cette organisation homme-machine complexe se caractérise, entre autres, par l'activité collective des contrôleurs du trafic aérien, /Spérandio, 92/ :

- La continuité du service nécessite des relèves d'équipes à intervalles réguliers. Elle implique donc des échanges d'informations et des consignes entre les personnes concernées.
- La prise en charge d'un même vol demande une synchronisation parfaite entre les différentes phases successives du contrôle. En effet, l'ensemble du contrôle d'un avion est partagé entre plusieurs positions de contrôle qui gèrent les secteurs géographiques entre lesquels un réseau de coordinations est établi au moyen de divers types de communications évoquées plus haut.
- Chaque unité de contrôle est constituée de un ou plusieurs contrôleurs entre lesquels la répartition des tâches est certes prédéfinie, mais également flexible. Ce degré de liberté varie selon les centres de contrôle, les secteurs, les contrôleurs eux-mêmes.

Comme notre travail s'applique plus particulièrement au contrôle en route, les principales fonctions des contrôleurs aériens des centres de contrôle sont à présent détaillées.

### **2.1.2. Fonctionnalités globales**

Les différentes structures générales qui composent le contrôle du trafic aérien sont organisées plutôt hiérarchiquement mais sont aussi très coordonnées, figure II-9.

Après la planification à long terme du trafic et la régulation de celui-ci en fonction d'aléas imprévisibles, au niveau le plus haut, le système CAUTRA (Coordonnateur AUTomatisé du TRafic Aérien) permet aux contrôleurs aériens d'assurer les différents services dont ils ont la responsabilité. Un de ses objectifs est de délivrer, d'une part les positions des avions sur l'image radar de chacune des positions de contrôle (ou unités de contrôle), et d'autre part les bandes en papier cartonné pour chacun des vols qui traversent les secteurs concernés.

Ces bandes sont appelées des strips. Sur chacun d'eux, toutes les informations relatives à un avion sont transcrites : l'indicatif de l'avion, son type, sa destination, son point de départ, le niveau de croisière demandé par le pilote, les noms des balises successives qui déterminent la trajectoire de l'appareil, les horaires estimés de passage par ces balises..., figure II-10.

L'ensemble de la gestion du trafic aérien est régi par des objectifs spécifiques relatifs au critère de sécurité de l'équipage et des passagers, au critère de régularité pour le respect des horaires de départ et d'arrivée des vols, au critère économique pour la minimisation de la consommation de carburant. Les trois critères sont très liés puisque lorsqu'un avion est en conflit avec un autre, c'est-à-dire que les normes de séparations verticales ou horizontales minimales entre aéronefs sont dépassées ou risquent de l'être, il s'agit pour le contrôleur de modifier les paramètres d'un ou de plusieurs vols, afin d'éviter l'accident, mais aussi en essayant de minimiser le retard de l'avion détourné et sa consommation.

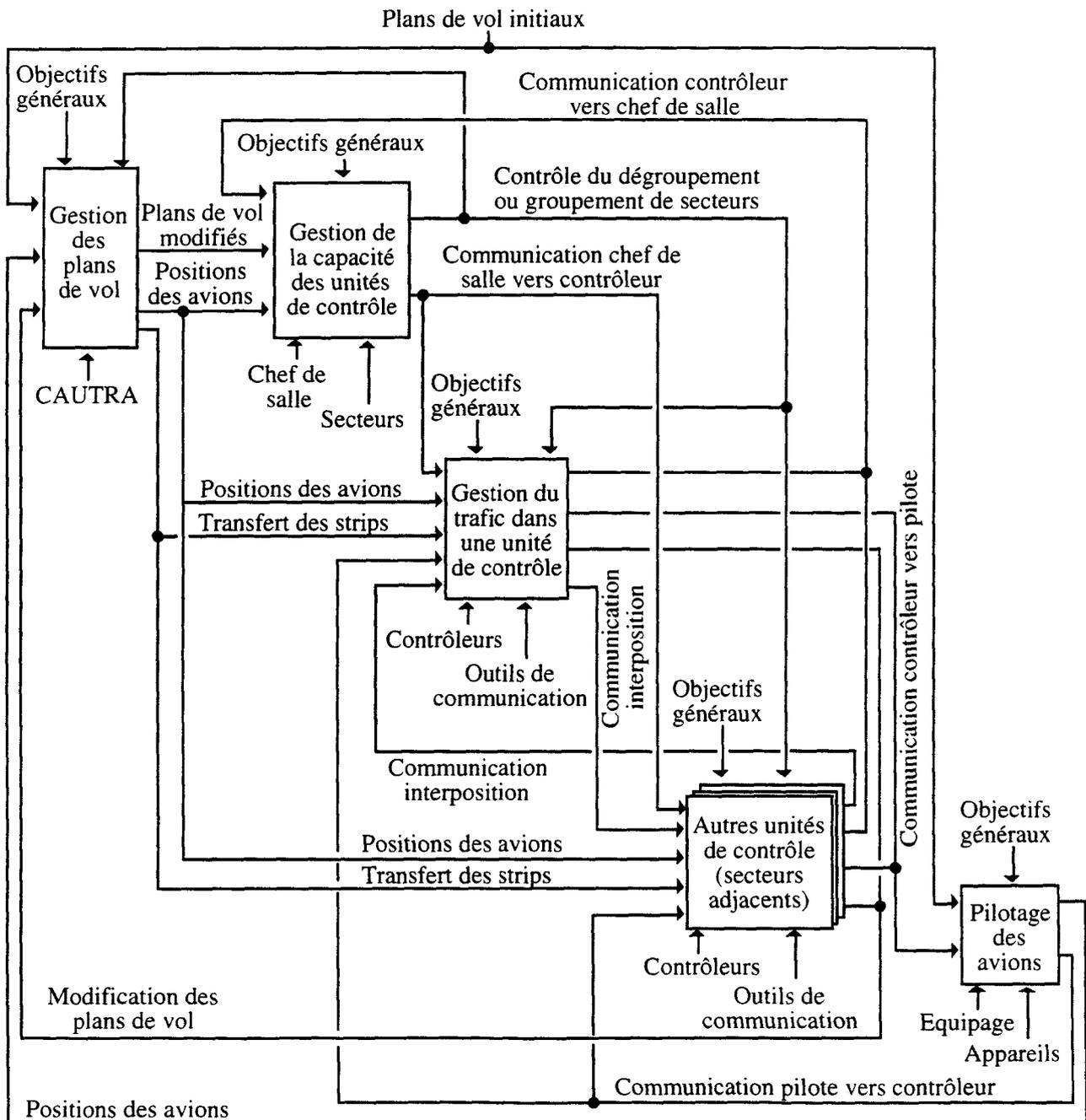


Figure II-9 : Gestion du contrôle du trafic aérien.

Dans le plan vertical, les avions évoluent à des niveaux standards, séparés de 1000 pieds jusqu'au niveau 290 (soit 29000 pieds) et de 2000 pieds au dessus. Dans le plan horizontal, cette séparation minimale est plus complexe et est exprimée dans certains cas en temps et dans d'autres cas en distance. De plus, il faut noter qu'un avion a son propre niveau de croisière optimal, et des taux de montée et de descente recommandés. Ces paramètres dépendent du type de l'appareil, ou des compagnies aériennes. Ainsi, à titre d'anecdote, Denis-Lempereur /81/ retrace le calcul extravagant de Air France qui détermine que, si elle faisait voler tous ses Boeing 727 à 600 mètres en dessous de leur niveau optimal, elle consommerait 6200 tonnes supplémentaires de carburant par an !

Les tâches principales du contrôle aérien au sein d'une position de contrôle sont la relève, la gestion de la position, la planification du trafic, la surveillance du trafic, la résolution des conflits, /El Farouki et al, 89/. La relève est une tâche ponctuelle, réglée par des horaires spécifiques et des changements d'équipe. Quant à la gestion de la position de contrôle, elle concerne la gestion de la capacité du secteur. Le contrôleur se doit de surveiller constamment l'évolution de la densité du trafic dont il a la charge ou dont il aura la charge dans un avenir proche. Cette tâche lui permet une gestion optimale de la capacité de chaque secteur qui correspond à un contrôle d'une douzaine d'avions simultanément, /Brosselin, 92/. Le secteur géré par un même contrôleur peut ainsi varier en fonction de la charge de travail de celui-ci.

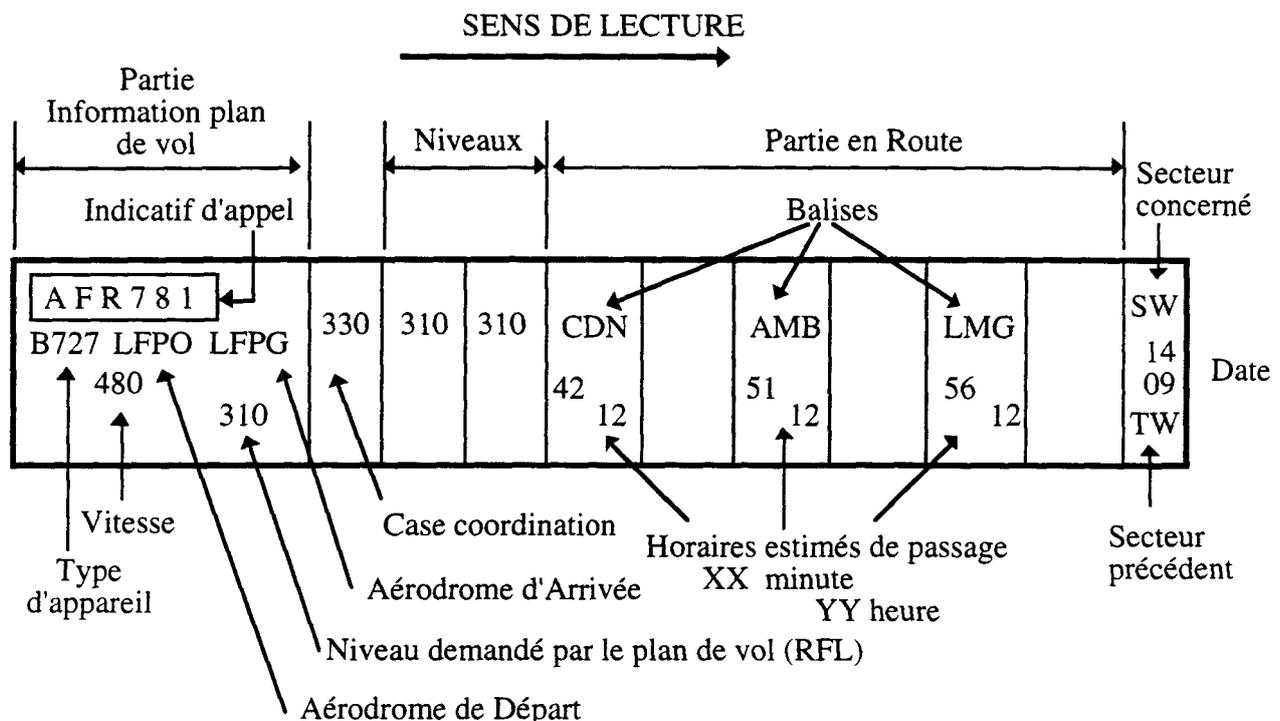


Figure II-10 : Exemple de Strip.

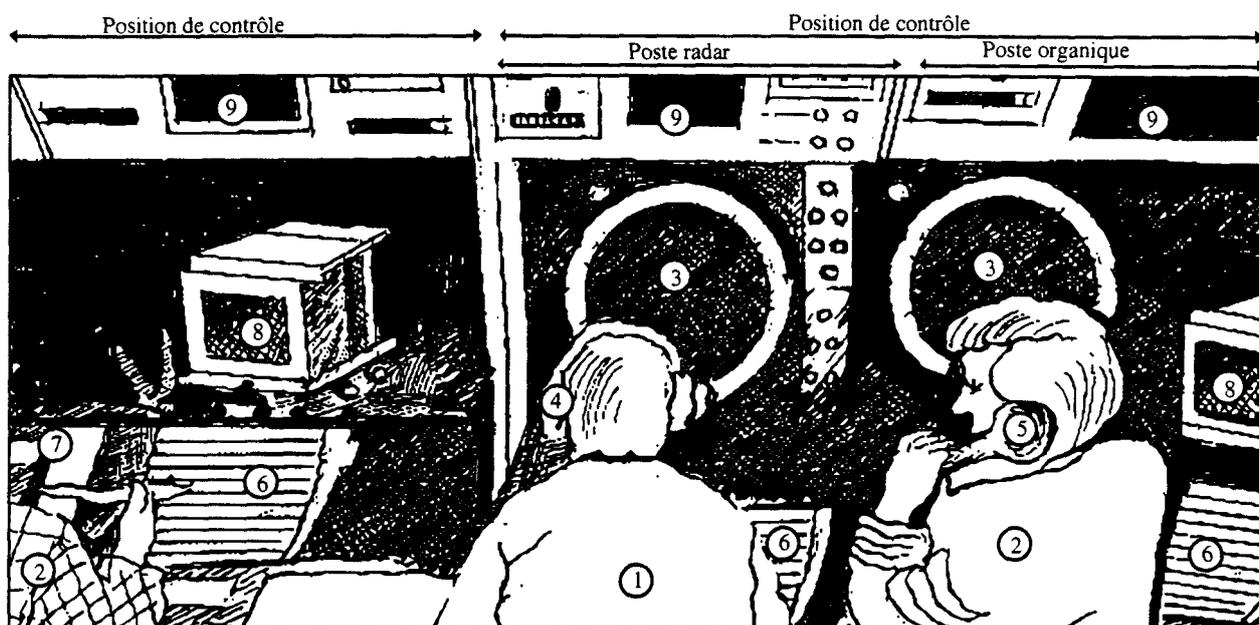
En trafic normal, dans une même unité de contrôle, deux contrôleurs interviennent : le contrôleur organique qui assure les tâches stratégiques et le contrôleur radar qui effectue les tâches tactiques. Leurs rôles respectifs sont détaillés au paragraphe suivant. Toutefois, un même contrôleur est capable d'effectuer les deux fonctions. Ainsi, les deux contrôleurs radar et organique sont censés avoir les mêmes compétences. C'est pourquoi, en trafic faible, un seul opérateur suffit pour gérer l'ensemble du trafic d'une même position de contrôle. Lorsque le trafic est chargé ou surchargé, le contrôleur organique peut éventuellement exécuter quelques-unes des tâches du contrôleur radar. Cependant, en règle générale, dans ce cas précis, celui-ci est assisté par une troisième personne. Dans les cas critiques, un secteur saturé, géré par une même position peut être divisé et une partie de son contrôle est attribuée à une autre position vacante ou moins chargée. Cette opération, appelé dégroupement, génère une communication avec le chef de salle qui valide le dégroupement (ou à l'inverse le groupement) des secteurs dans les positions de contrôle. Les autres fonctions qui concernent la gestion interne du trafic mettent en œuvre plusieurs types de

communications entre les unités de contrôle, entre les contrôleur et les pilotes. Elles sont développées dans la suite.

Les modes de coordination intraposition sont donc, soit inexistantes lorsqu'un seul contrôleur prend en charge l'ensemble de la position, soit en série lorsque le trafic est normal, soit en parallèle lorsqu'il est chargé, soit de type hybride lorsque la position contient plus de deux contrôleurs. Dans la suite de notre propos, nous considérons une unité de contrôle pour un trafic normal, c'est-à-dire dans laquelle les deux postes de contrôle sont actifs et gérés par deux contrôleurs radar et organique.

### 2.1.3. Caractéristiques d'une position de contrôle

Une position de contrôle, figure II-11, comporte donc deux postes de travail.



- 1 - Contrôleur radar    2 - Contrôleur organique
- 3 - Ecran radar        4 - Radio            5 - Téléphone
- 6 - Tablette des strips    7 - Imprimante strip    8 - Digitatron
- 9 - Chaîne TV pour affichage de données opérationnelles (météo, zone militaire...)

Figure II-11 : Position de contrôle comportant le poste radar et le poste organique.

Chacun des deux postes de travail est composé de plusieurs supports informationnels, ainsi que des liaisons spécifiques de communication externe. Le contenu de chaque poste de contrôle est détaillé, figure II-12.

Pour le poste radar, un écran radar permet de visualiser les évolutions en ligne des avions contrôlés, avec la possibilité à partir d'un clavier et d'une boule roulante de configurer les paramètres d'affichage, tels que le nombre de secteurs visualisés, le filtrage des avions affichés, figure II-12-a. Les communications avec les pilotes sont effectuées à l'aide d'une platine radio. De plus, une tablette sert de support pour le classement des strips, transférés par le contrôleur organique. Enfin, un autre écran fournit des informations complémentaires générales telles que des données météorologiques, les zones militaires actives interdites au survol.

Quant au poste de contrôle organique, il est constitué non seulement d'écrans similaires (écran radar et écran TV) et d'une tablette pour placer ses strips, mais aussi de deux platines téléphoniques pour communiquer avec les autres positions de contrôle, d'une imprimante pour recevoir les strips et de l'écran tactile du digitatron pour communiquer avec le système CAUTRA, figure II-12-b. En outre, le contrôleur organique agit indirectement sur le procédé

puisque toutes les modifications d'un paramètre de vol s'effectuent en collaboration avec les contrôleurs des secteurs adjacents par téléphone et le contrôleur radar de la même position. Toutefois, l'ordre final de changement de cap pour éviter un conflit par exemple, n'est communiqué aux pilotes que par le contrôleur radar.

Sur la figure II-12, ne sont pas indiqués les outils d'assistance. En effet, ces derniers sont pratiquement inexistant. Nous pouvons néanmoins citer le "filet de sauvegarde" qui est une aide ultime à la détection des conflits, délivrée par le système CAUTRA.

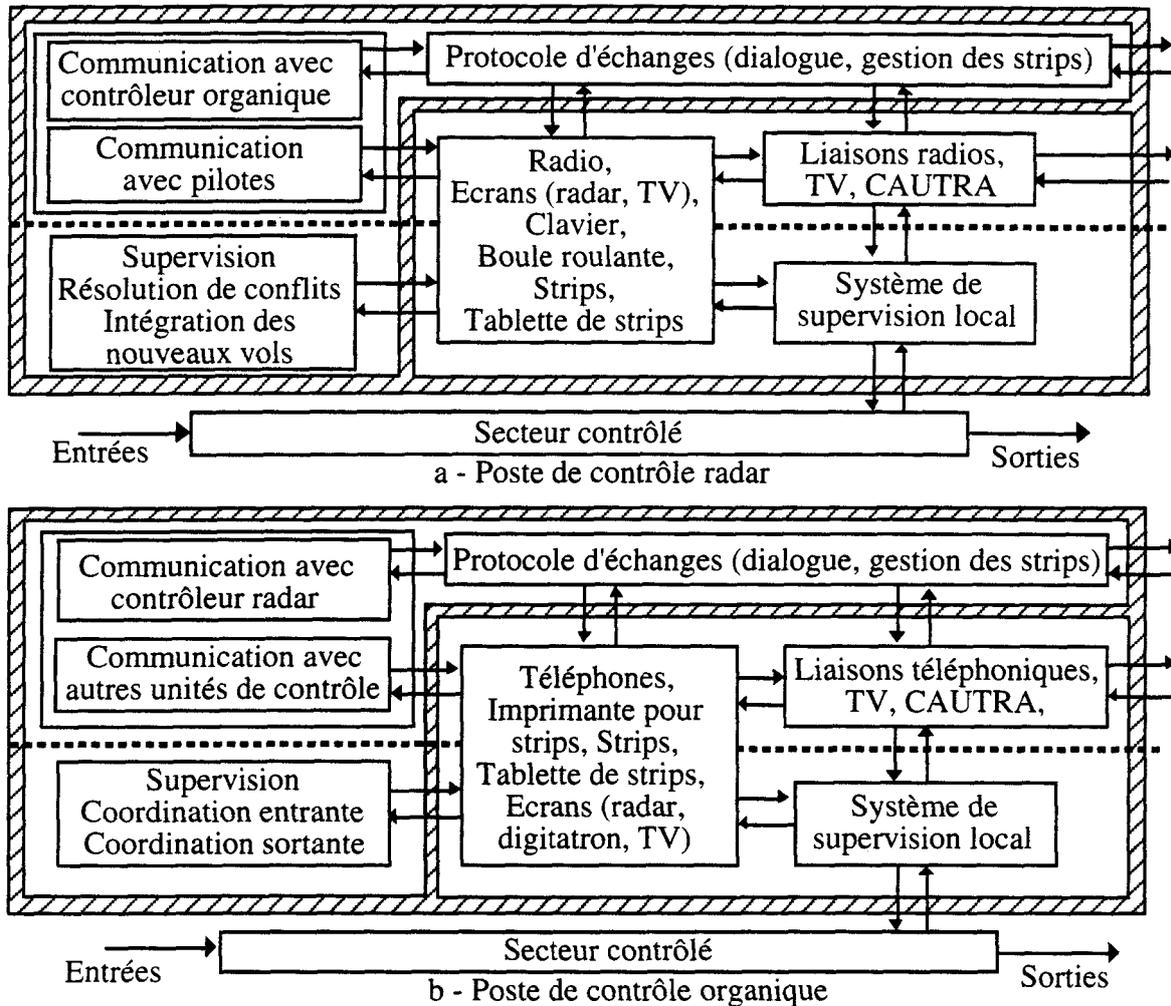


Figure II-12 : Postes de contrôle radar et organique actuels.

Les caractéristiques fonctionnelles générales des contrôleurs radar et organique, au sein d'une même unité de contrôle sont à présents abordées, en vue de soulever ensuite la problématique des besoins d'assistance dans le contrôle aérien.

#### 2.1.4. Le contrôleur radar et le contrôleur organique

Nous pouvons globalement dissocier une position de contrôle en deux niveaux fonctionnels : un niveau tactique pris en charge par le contrôleur radar, et un niveau stratégique géré par le contrôleur organique, figure II-13.

Plus précisément, le contrôleur radar effectue un travail tactique et qualitatif, /Garot, 92/. En effet, son objectif principal est soit d'éviter un conflit, soit de minimiser les risques à plus ou moins long terme de collision entre avions. Il agit donc sur les trajectoires des avions et non sur les horaires. Par contre, comme nous l'avons précisé plus haut, en amont du Contrôle du Trafic

Aérien, les modules de planification et de régulation à long terme du système CAUTRA réalisent les tâches de nature stratégique et quantitative. Entre ces deux niveaux, le contrôleur organique a principalement un rôle stratégique et qualitatif pour assurer le filtrage des informations vers le contrôleur radar en régulant le flux d'avions dans le secteur.

Les fonctionnalités les plus représentatives du **contrôleur radar** sont la surveillance continue du trafic dans le secteur, la détection des conflits entre avions par l'intégration des nouveaux paramètres de vol et leur résolution. La surveillance du trafic consiste globalement à vérifier qu'un avion suit correctement son plan de vol, sans poser de problème.

Plusieurs sous-tâches sont alors réalisées en parallèle : la surveillance sur l'écran radar pour détecter les conflits non encore détectés, la surveillance des trajectoires modifiées ou à modifier des avions conflictuels et la surveillance des avions en phase de sortie pour le transfert de fréquence lorsque l'avion s'apprête à quitter le secteur. Ce transfert de la fréquence d'appel est l'opération qui concrétise le transfert de la prise en charge de l'avion qui sort d'un secteur, et qui est sur le point d'entrer dans le secteur adjacent aval. Le pilote reçoit alors la fréquence radio de ce nouveau secteur.

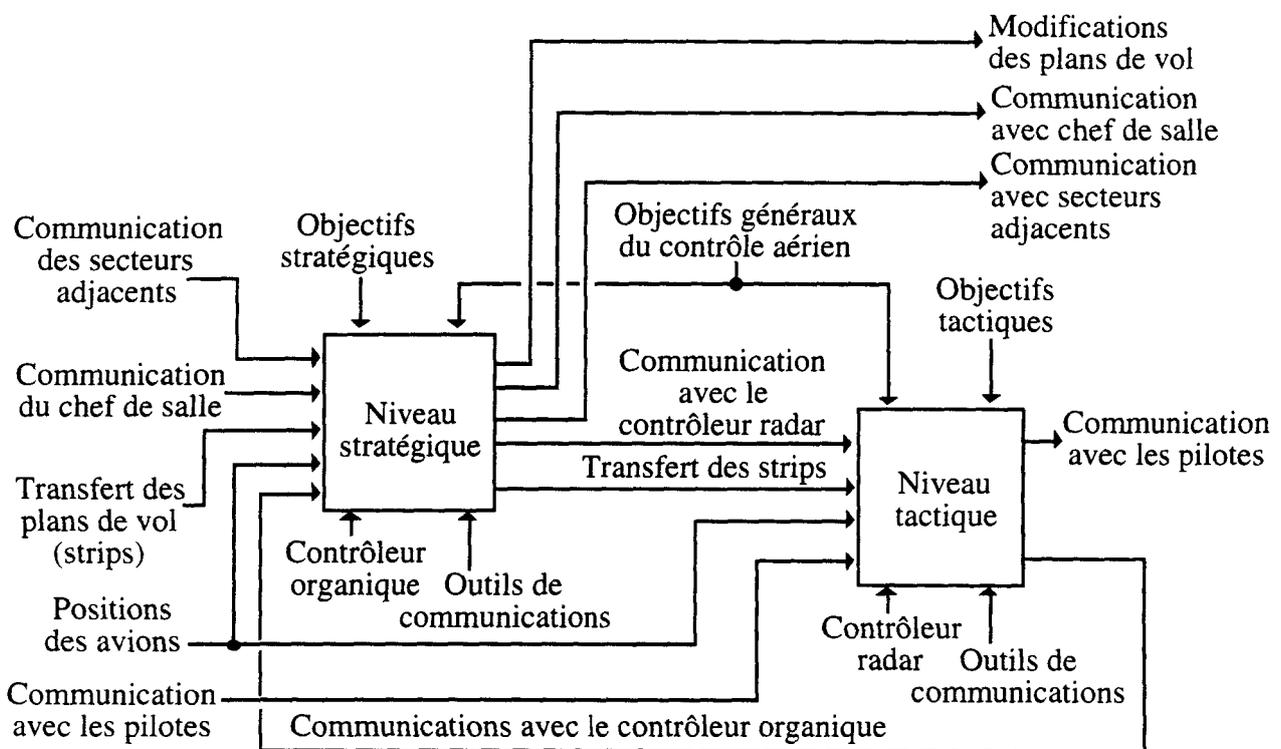


Figure II-13 : Fonctions tactiques et stratégiques dans une unité de contrôle.

Toutes les sous-tâches que nous venons de citer influencent le classement permanent des strips sur la tablette, et génèrent différents types de communication.

Les communications entre contrôleurs d'une même unité de contrôle permettent le transfert des strips et les échanges d'informations sur des avions problématiques, ou encore des échanges d'instructions pour modifier les paramètres d'entrée ou de sortie d'un vol du secteur. Les communications entre contrôleurs et pilotes permettent également d'échanger des informations ou des instructions. Il s'agit par exemple, du premier contact radio quand un contrôleur prend en charge un nouveau vol entrant dans son secteur, du transfert de fréquence radio propre au secteur adjacent suivant pour être pris en charge par le contrôleur radar d'une autre unité de contrôle, ou des communications propres aux modifications de trajectoire de l'appareil.

Cette tâche globale de surveillance permet de vérifier constamment les normes de séparations minimales verticales et horizontales entre les avions. Lorsque ces normes ne sont pas respectées, il

y a conflit. La résolution de ce conflit doit alors être optimisée en fonction des critères de performance globaux déjà évoqués, ainsi que des contraintes diverses. Celles-ci peuvent correspondre aux contraintes et limites des zones survolées, aux contraintes du plan de vol, aux contraintes du trafic futur, sachant que la résolution d'un conflit ne doit pas en générer un nouveau. A ceci s'ajoutent des contraintes relatives à la capacité de manœuvre des avions, des contraintes liées à la charge de travail du contrôleur qui utilise des stratégies de résolution plus économiques lorsque sa charge devient importante, /Debernard, 93/.

Quant au **contrôleur organique**, il évalue et prédit le flux du trafic afin d'éviter des risques de surcharge de travail du contrôleur radar. Il réalise la planification du trafic de son secteur qui est manifeste chaque fois que le contrôleur radar devra gérer un nouvel avion. Cette tâche consiste à préparer l'entrée du nouvel avion dans le secteur et à organiser le trafic en sortie. En effet, le contrôleur vérifie, d'une part, si cet avion ne va pas générer de problème quand il entrera dans le secteur et décide de l'accepter avec ou sans modification de son plan de vol. D'autre part, il s'assure qu'un avion en entrée de secteur pourra passer au secteur suivant sans poser de problèmes. Par conséquent, les tâches principales sont la supervision du trafic, la coordination entrante et la coordination sortante.

La supervision du trafic consiste à vérifier l'évolution normale du trafic et de prédire la charge de travail du contrôleur radar. Selon que le secteur contrôlé sur une même unité de contrôle est saturé ou sous-chargé, le contrôleur organique effectue une requête soit de dégroupement, soit de regroupement au du chef de salle.

La coordination entrante consiste à vérifier qu'un nouveau vol ne va pas interférer avec un autre. Une vingtaine de minutes avant l'arrivée de l'avion dans le secteur, le contrôleur organique reçoit le strip correspondant. Il prend alors connaissance de la trajectoire future de l'appareil dans son secteur. En cas de conflit en bordure de secteur, il contacte son collègue qui gère le secteur amont et qui contrôle actuellement le vol attendu pour négocier, par téléphone, un niveau de vol qui satisfasse les contraintes des deux secteurs. En cas de conflit éventuel à l'intérieur de son secteur, en accord avec le contrôleur radar, l'entrée de ce nouvel avion dans le secteur est acceptée ou refusée. Ce refus entraîne une modification de la configuration de l'avion concerné. Celle-ci doit être également négociée avec le contrôleur organique du secteur précédent. Lorsque le contrôleur radar est surchargé, ce conflit potentiel peut être alors résolu par l'intermédiaire des contrôleurs organiques.

Enfin, la coordination sortante permet de déterminer le niveau de sortie d'un appareil, soit à la demande du contrôleur radar afin de résoudre un conflit interne au secteur, soit à la demande des autres contrôleurs organiques des secteurs adjacents. La détermination finale du niveau de sortie est communiquée au contrôleur radar qui le transmet au pilote.

Ces fonctionnalités globales sont soumises à une charge de travail souvent importante et irrégulière, due à une densité du trafic croissante, malgré la planification et la régulation effectuées en amont. C'est pourquoi, il est urgent d'assister efficacement les contrôleurs, /Garot, 92/.

## **2.2. Besoins d'assistance dans une position de contrôle**

Ce paragraphe fait d'abord un bilan sur les besoins d'assistance dans une position de contrôle. Ensuite, à partir d'un nouveau découpage fonctionnel du contrôle du trafic aérien, nous ciblons les caractéristiques générales des outils d'aide pour chaque poste de contrôle, afin d'introduire l'approche multiniveau que nous proposons d'élaborer.

### **2.2.1. Besoins d'assistance dans le contrôle aérien**

A l'heure actuelle, il n'existe aucun processus de régulation correct du flux du trafic aérien, /Garot, 92/. En effet, celui-ci est soumis à des informations souvent incertaines, incomplètes et/ou imprécises qui remettent constamment en cause, d'une part sa planification à long terme, et d'autre

part son contrôle en temps réel. Néanmoins, le contrôleur aérien pallie ce manque d'information par l'expérience en évaluant les marges d'incertitude sur les positions futures des avions, afin de résoudre un éventuel problème.

En outre, même si les moyens techniques de contrôle se sont ou seront améliorés afin de diminuer l'incertitude des mesures des paramètres de vol des aéronefs, l'augmentation régulière du trafic provoque une saturation périodique des secteurs contrôlés. Suite à cette croissance, la taille de ces derniers est progressivement diminuée. Cependant, cette démarche a des conséquences non négligeables sur le contrôle, /Garot, 92/. En effet, la densité des avions par volume d'espace est de plus en plus grande et le nombre moyen des conflits potentiels par vol et par volume d'espace s'est accru. De plus, la marge de manœuvre spatiale et temporelle pour analyser et résoudre les conflits diminue parallèlement avec la réduction des secteurs, si bien qu'il devient pratiquement très difficile de les réduire davantage.

Le redécoupage des secteurs entraînerait, d'une part, une augmentation des coordinations entrantes et sortantes, un accroissement des communications contrôleurs-pilotes, et d'autre part, une impossibilité de résoudre efficacement les conflits intersecteurs par manque de temps. Du fait de ces contraintes temporelles contraignantes, les contrôleurs sont plus vulnérables aux erreurs et aux déficiences, même s'ils sont capables de réguler eux-mêmes leur activité. Par exemple, beaucoup d'études antérieures ont montré l'importance des messages de gestion des communications dans la régulation de l'activité du contrôleur radar. Falzon /89/ énumère l'ensemble des caractéristiques des communications entre les pilotes et les contrôleurs et relève les types de messages qui permettent de réguler leur activité. En effet, il distingue des messages pour la planification à long terme et d'autres pour la régulation à court terme des communications. De plus, en fonction de la situation de travail, les communications fonctionnelles varient, /Navarro, 87; Falzon 89/. En effet, l'augmentation du nombre d'avions contrôlés entraîne des modifications qualitatives, comme la diminution de la durée des messages et des transformations quantitatives telles que le regroupement de plusieurs communications en une seule ou l'élimination de messages secondaires ou encore la modification du codage de l'information.

Cependant, la capacité des contrôleurs n'est pas illimitée. C'est pourquoi, une des solutions est l'automatisation plus ou moins complète du niveau décisionnel du système tenu jusqu'alors par les contrôleurs.

Deux approches peuvent alors être envisagées : celle qui s'oriente vers une automatisation totale du contrôle aérien, ou celle qui maintient l'opérateur humain dans la boucle de supervision et de contrôle. La seconde solution est, de notre point de vue, la plus souhaitable, /Debernard, Vanderhaegen, Debbache, Millot, 90b; Hopkin, 91; Garot, 92/. En effet, pour des raisons déjà évoquées dans le chapitre précédent, la première approche est inconcevable dans la mesure où, d'une part la sécurité du système dépendrait uniquement de la fiabilité de la machine, et d'autre part, l'opérateur humain risquerait à long terme de perdre son apprentissage et ses capacités décisionnelles, et par conséquent d'être inefficace lors d'un dysfonctionnement. C'est pourquoi, la meilleure solution, à notre avis, consiste à assister le contrôleur par des outils d'aide à la décision et/ou à l'action.

Outre les systèmes embarqués d'assistance aux pilotes, comme l'aide à la détection de conflit tel que le système TCAS (Traffic alert and Collision Avoidance System), /Cazenave, 93/, plusieurs projets cherchent à déterminer les caractéristiques des futurs postes de travail des contrôleurs. Nous pouvons citer, par exemple, l'approche française PHIDIAS (périPHérique Intégré de Dialogue et d'ASsistance), /Phidias, 91/ ou son homologue européen SWIFT (Specifications for controller Working positions in the Future air Traffic control), /Dujardin, 93/, ou encore son homologue américain AERA (Automated En Route Air traffic control), /Simolunas et al, 91/. Leur objectif est de créer un système collectif permettant d'assurer, de manière optimale, les fonctions du contrôle du trafic aérien, en y intégrant les outils de dialogue et d'assistance adéquats. A ce propos, quelques études menées au Centre d'Etudes de la Navigation Aérienne, tels que les projets ERATO (En Route Air Traffic Organizer), /Leroux, 91/, PLATONS (Prototype Logique d'Aide au Transfert et à l'Organisation des Niveaux de Sortie), /Ly et al., 92/, ou encore notre projet

SPECTRA (Système de Partage Expérimental des tâches de Contrôle du Trafic Aérien), /Vanderhaegen et al, 92a/, ont pour but de concevoir et valider ce type d'outils d'aide aux contrôleurs.

Le système expert ERATO, cherche à modéliser le contrôleur radar. Son but est de comprendre les mécanismes de l'activité de planification dans le contrôle du trafic aérien afin de proposer une assistance coopérative active. A partir d'observations sur des situations opérationnelles, les premières expérimentations ont mis en évidence les fonctions principales du contrôleur radar, à savoir l'activité de mémorisation, l'activité d'anticipation, l'activité d'autorégulation, l'activité propre au travail collectif. Elles introduisent un nouveau concept : l'Assistant Contrôleur Electronique dont l'objectif à long terme est d'être un outil d'assistance coopératif entre le contrôleur radar et le contrôleur organique.

Quant à PLATONS, son objectif est d'assister le contrôleur organique dans l'organisation des niveaux de sortie des vols d'un même secteur. Cet outil est basé sur un système expert qui inclut une expertise minimale suffisante. D'après les résultats des premières expérimentations, PLATONS permet de calquer certaines stratégies standards du contrôleur organique malgré quelques imperfections de règles expertes et des interfaces.

Ces deux premiers exemples s'intègrent dans une coopération homme-machine verticale en tant qu'outils d'aide à la décision. Toutefois, on peut se demander si, en cas de trafic fort, ces aides seront suffisantes pour décharger les contrôleurs. Or, étant donnée la charge de travail importante et irrégulière que ces derniers ont à subir, il semble préférable d'exploiter les principes de coopération homme-machine horizontale. C'est pourquoi, notre étude s'oriente vers une coopération multiniveau, dans le cadre du projet SPECTRA, /Vanderhaegen et al, 92a/.

Mais, avant de décrire notre approche multiniveau appliquée au contrôle aérien, nous redéfinissons les fonctions de celui-ci en faisant un parallèle avec les systèmes de production afin de cerner les systèmes d'aide adéquats pour chacun des postes d'une position de contrôle.

### 2.2.2. Découpage fonctionnel du contrôle du trafic aérien

Les notions utilisées dans la gestion de production permettent, en effet, de proposer une interprétation originale pour le contrôle du trafic aérien, /Crévits, Vanderhaegen, Debernard, Millot, 92/. L'organisation globale du trafic aérien correspond en fait à une structure empirique à plusieurs niveaux, figure II-14. Chacun d'eux représente des objectifs temporels et fonctionnels différents du contrôle aérien. Il coopère et a sa propre capacité de réactivité lors de perturbations imprévues.

La "production" de chaque position de contrôle consiste à assurer le transit efficace des avions depuis l'entrée dans le secteur vers la sortie. Les fonctions globales qui régissent le contrôle du trafic aérien sont alors les suivantes :

- La **planification et la régulation** ont des objectifs à long terme. Elles permettent d'organiser le trafic, avant le décollage des avions.
- La **programmation ou la gestion prévisionnelle à moyen terme**, sur la base du plan de vol prédéfini par le niveau supérieur, organise le programme prévisionnel de "production" en fonction des capacités de production, c'est-à-dire des positions de contrôle. Toutefois, il peut modifier l'organisation initiale sur la demande des positions de contrôle.
- L'**ordonnement** essaie de respecter ce plan prévisionnel et optimise la régulation de l'activité du contrôleur radar qui est assimilé à l'unité de conduite en temps réel. Afin de réguler le flux du trafic dans le secteur, il évalue, plus ou moins approximativement, un calendrier d'organisation du travail, avec les dates de début et de fin de chaque tâche.

- La **conduite** réalise la production prévue. De plus, elle traite les problèmes non résolus par le niveau prévisionnel, en prenant en compte l'ensemble des contraintes du contrôle, et en réagissant aux aléas.
- La **commande** est directement en relation avec le système. Elle agit sur la trajectoire des avions, afin de maintenir les objectifs de sécurité, d'économie et de régularité. Il s'agit, par exemple, d'ordres communiqués aux pilotes lors de la résolution d'un conflit.

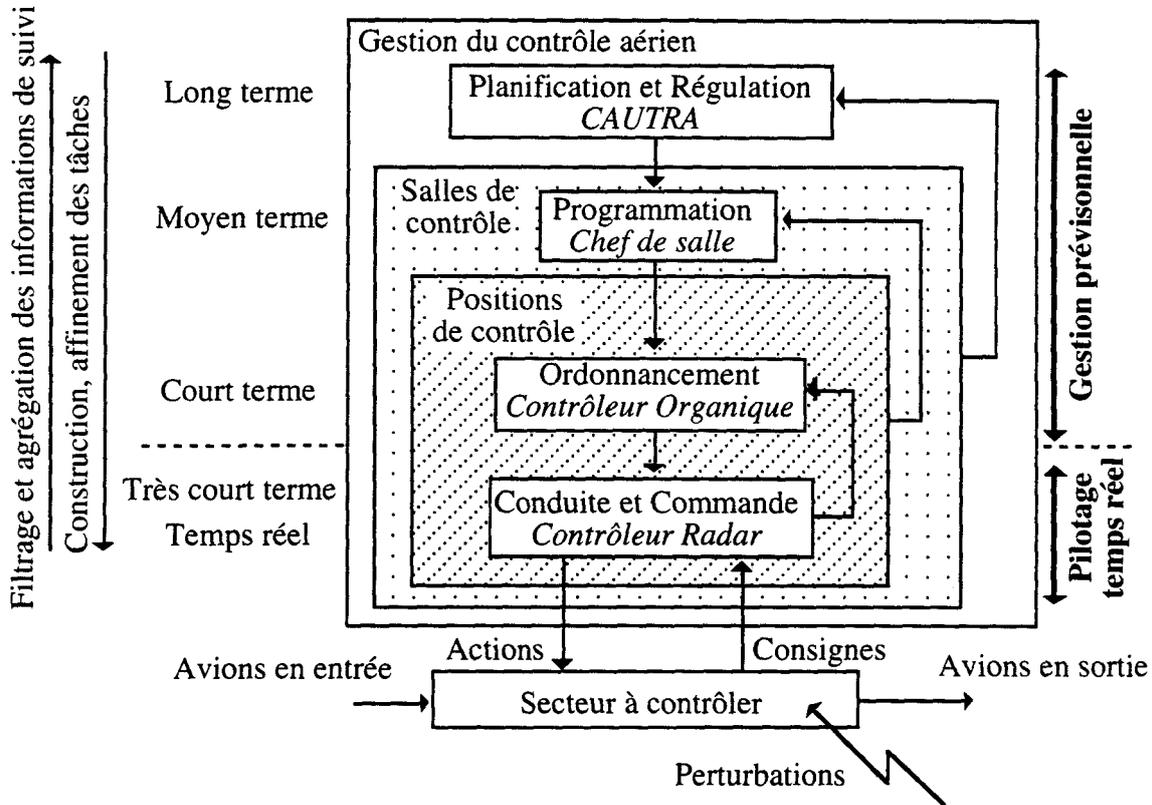


Figure II-14 : Structure fonctionnelle dans le contrôle du trafic aérien.

Ainsi, en règle générale, lors d'un trafic normal, le contrôleur organique assure les fonctions d'ordonnancement, alors que le contrôleur radar, celles de la conduite et de la commande. Notre travail concerne ces deux niveaux dans lesquels une coopération homme-machine entre les postes de contrôle radar et organique doit être intégrée. Celle-ci considère le poste organique comme une aide à la répartition des tâches du poste radar, entre deux ressources distinctes : le contrôleur radar et un système d'aide.

### 2.2.3. Coopération homme-machine multiniveau dans le contrôle du trafic aérien

Notre objectif est d'augmenter les capacités des secteurs en régulant l'activité des contrôleurs et en maintenant une performance globale optimale. Pour ce faire, l'idée consiste à introduire un agent pour assister le contrôleur radar, et à proposer une organisation efficace de la position de contrôle globale.

Ainsi, dans l'organisation du travail que nous proposons, les différentes interactions entre les niveaux tactique et stratégique sont intégrées. Toutefois, plusieurs modes de répartition dynamique de tâches peuvent y être implémentés, figure II-15.

En effet, la commande de la répartition dynamique des tâches entre le contrôleur radar et un agent peut être gérée soit par le poste radar lui-même selon une gestion interne du répartiteur, soit par le poste organique selon une gestion externe, soit par les deux selon une gestion mixte en considérant que les décisions d'affectation du contrôleur organique sont, par défaut, activées. Pour

ce dernier cas, un traitement particulier doit être intégré au niveau du répartiteur de tâches afin d'éviter des conflits décisionnels d'affectation entre le niveau stratégique et le niveau tactique.

Comme ces deux niveaux correspondent à des objectifs temporels différents, il est possible de bloquer la commande du répartiteur de chacun d'eux en fonction de butées temporelles prédéfinies. Par exemple, le niveau stratégique peut gérer la répartition des tâches tactiques pour les avions hors secteur. Par contre, le mécanisme d'adaptation du niveau tactique peut revoir cette affectation initiale une fois que les avions concernés sont entrés dans le secteur.

La répartition effective du contrôleur organique peut éventuellement s'effectuer en collaboration avec le contrôleur radar. De ce fait, dans une telle coopération multiniveau, la gestion interne peut sembler inutile, surtout en situation de surcharge de travail. Il conviendra néanmoins de s'en assurer.

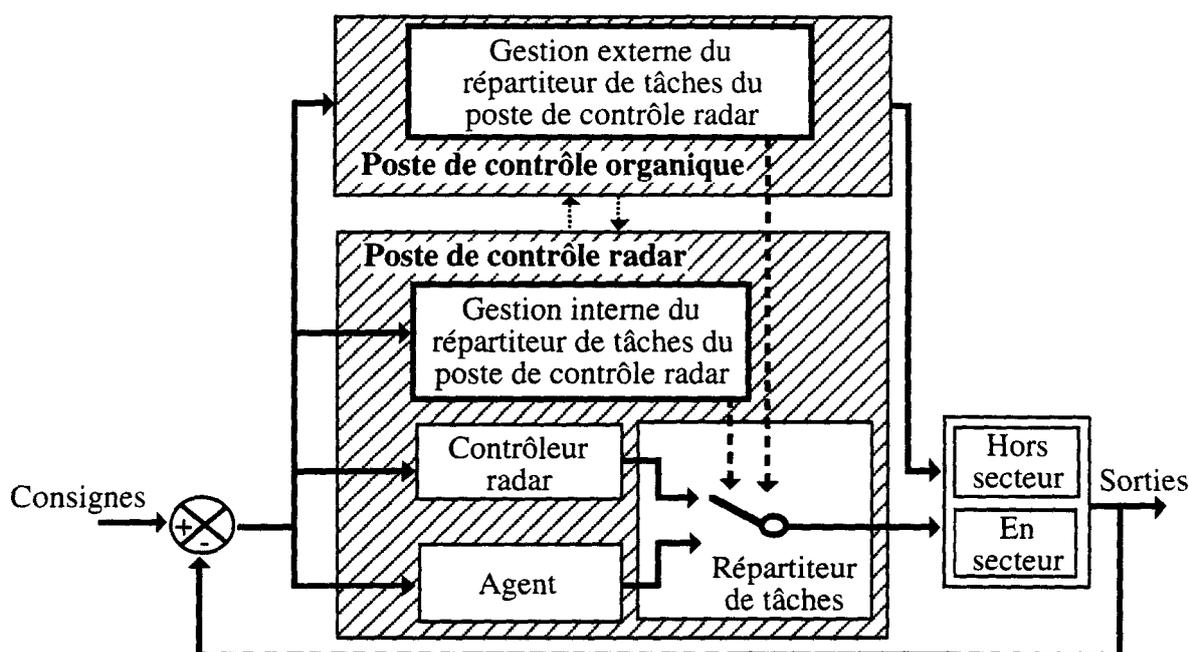


Figure II-15 : Coopération multiniveau dans une position de contrôle.

Notre recherche consiste à étudier ces différents modes de répartition afin de déterminer celui qui est le plus souhaitable dans un domaine aussi complexe que le contrôle du trafic aérien. La nouvelle organisation biposte que nous proposons se base sur des outils d'aide adaptés à chaque poste. Pour le poste organique, le système d'assistance s'oriente vers une aide à l'ordonnancement des tâches tactiques. Pour le contrôleur radar, c'est un système d'aide à la conduite et la commande. Sous la forme d'une coopération soit verticale, soit horizontale, le contrôleur organique est assisté par un outil d'aide adéquat afin d'établir un premier filtrage. Un de ses objectifs étant de réguler la charge de travail de son collègue, il doit optimiser la répartition des tâches tactiques.

Néanmoins, avant de mettre en œuvre l'intégralité de cette organisation, notre étude s'est d'abord focalisée sur le niveau tactique, par une gestion interne du répartiteur. En effet, elle s'est orientée vers une phase d'étude de faisabilité d'une répartition dynamique des tâches entre contrôleur radar et système expert, en établissant un protocole expérimental adapté, relatif à la première version d'une plate-forme appelée SPECTRA, Système de Partage Expérimental des tâches de Contrôle du TRafic Aérien, /Vanderhaegen et al, 91a/. Cette étude fera l'objet du chapitre suivant.

## Conclusion

Ce chapitre a établi les principes de base d'une coopération homme-machine multiniveau, en s'appuyant sur le concept de poste de contrôle, à partir duquel la coopération s'effectue entre les opérateurs humains et les outils d'assistance, ainsi qu'entre plusieurs postes. Un cas particulier est développé : l'organisation biposte dans laquelle la répartition des tâches entre un opérateur humain et un système d'aide d'un même poste, est gérée ou assistée par le deuxième poste. Cet exemple est appliqué au contrôle du trafic aérien. Il s'agit de l'élaboration d'un système collectif coopératif entre les postes de contrôle radar et de contrôle organique.

Les caractéristiques de la coopération multiniveau dans une organisation multiposte ont été présentées dans la première partie. D'une part, la conception des systèmes homme-machine met en œuvre plusieurs postes de travail, reliés entre eux par un réseau complexe de communications. Ces dernières permettent de mettre en place plusieurs modes de coopération interposte. Afin d'éviter les phénomènes d'incomplétude statique et dynamique de la partageabilité des tâches, plusieurs filtrages relatifs à différents horizons temporels peuvent être effectués afin d'optimiser l'affectation effective des tâches aux postes de contrôle.

Notre propos s'est orienté vers une organisation biposte. Le partage des tâches entre un opérateur humain et un agent d'un même poste, effectué par un autre niveau décisionnel supérieur, a été plus particulièrement développé. Cette nouvelle approche est basée sur les objectifs stratégiques et tactiques de travail. L'outil d'aide intégré dans le poste stratégique assiste l'opérateur humain dans la gestion de la répartition des tâches du poste tactique. Il effectue un filtrage en amont des tâches tactiques, afin d'établir un partage optimal de celles-ci entre l'opérateur humain et le système d'aide du poste de contrôle tactique correspondant. En aval, ce dernier peut éventuellement avoir la possibilité de corriger l'affectation initiale proposée ou validée par le niveau stratégique. Le système global doit aider la régulation de l'activité des opérateurs humains.

La seconde partie propose cette approche pour un domaine particulier d'application : le contrôle du trafic aérien. Elle présente globalement l'activité du contrôle aérien, et plus précisément celle d'une unité de contrôle gérée par deux contrôleurs radar et organique. Le premier s'occupe des tâches tactiques, et le second des tâches stratégiques. L'étude présentée ici vise à mettre en œuvre une coopération multiniveau biposte dans l'organisation de laquelle le contrôleur organique gèrerait en amont la répartition des tâches tactiques, et le contrôleur radar effectuerait en aval une mise à jour éventuelle qui modifierait l'allocation initiale.

Les fonctionnalités des niveaux décisionnels qui gèrent le contrôle du trafic aérien ont alors été redéfinies en termes de gestion de production. Ceci nous a permis de déterminer les différents systèmes d'assistance pour chaque poste. Un outil d'aide à l'ordonnancement des tâches tactiques correspondrait aux exigences des fonctions du contrôleur organique. Par contre, un système d'aide à la conduite et à la commande semble plus adéquat pour le contrôleur radar. La complexité du domaine ne nous permet pas d'effectuer dès maintenant les spécifications de cette nouvelle organisation. C'est pourquoi, dans un premier temps, notre recherche se focalise sur une étude de faisabilité d'une répartition dynamique des tâches de contrôle et de surveillance entre le contrôleur radar et un système d'aide adapté. Le chapitre suivant aborde cette étude.

---

## **CHAPITRE III - ETUDE DE FAISABILITE D'UNE REPARTITION DYNAMIQUE DES TACHES TACTIQUES DANS LE CONTROLE DU TRAFIC AERIEN**

---

### **Introduction**

La coopération homme-machine proposée dans le chapitre précédent, fait d'abord l'objet d'une étude de faisabilité d'une répartition dynamique des tâches de contrôle tactiques, dans un contexte monoposte et mono-utilisateur. L'étude porte sur la faisabilité d'une coopération de type explicite et implicite entre un seul contrôleur et un système expert, dans un même poste de contrôle. Ce chapitre présente cette première approche. Il détaille la mise en place d'une répartition dynamique dans la plate-forme expérimentale SPECTRA conçue à cet effet (Système de Partage Expérimental des tâches dans le Contrôle de TRafic Aérien, /Vanderhaegen et al, 91a/).

Le recensement des tâches tactiques permet de cibler les modes d'affectation qu'il est préférable d'intégrer dans SPECTRA, pour la répartition explicite et la répartition implicite. Dans cette dernière, du fait de la difficulté, voire l'impossibilité d'évaluer en ligne la charge de travail du contrôleur aérien, ainsi que la performance du système, le mécanisme d'adaptation concerne le plan intensif de régulation de l'activité. En effet, il se base sur une estimation des exigences des tâches principales de contrôle et de surveillance. L'opérateur humain est ainsi comparé à un régulateur ajustable dont la charge de travail doit être régulée pour éviter que sa performance ne se dégrade à terme. La première partie explique donc le protocole expérimental élaboré pour mener à bien cette étude de faisabilité. Elle détaille d'abord les principaux modules de la plate-forme expérimentale. Elle décrit ensuite le contexte expérimental correspondant. Celui-ci détermine, d'une part l'ensemble des données expérimentales nécessaires à la validation de l'étude, et d'autre part, le plan expérimental qui établit une série d'expérimentations avec deux classes de contrôleurs : des contrôleurs professionnels certifiés et des contrôleurs dits stagiaires qui sont en fait des ingénieurs de la Navigation Aérienne.

La seconde partie détaille l'ensemble des résultats objectifs et subjectifs, de ces expérimentations. Ils sont synthétisés de manière à éviter toute lourdeur de présentation. Tout d'abord, les résultats d'évaluation globale subjective sont analysés. Ensuite, l'ensemble des dépouillements relatifs à la charge de travail des opérateurs humains est présenté. Enfin, une comparaison des performances globales permet de renforcer les premières conclusions issues des résultats précédents. L'analyse des données subjectives et objectives nous indiquera donc si la répartition dynamique des tâches, telle que nous l'avons définie pour notre plate-forme, est acceptable ou non, dans un domaine aussi complexe que le contrôle du trafic aérien. De plus, elle permettra de comparer les conséquences du mode explicite et du mode implicite, sur le travail de contrôleurs ayant des niveaux de qualification différents.

## 1. Mise en œuvre d'une répartition dynamique des tâches entre contrôleur radar et agent

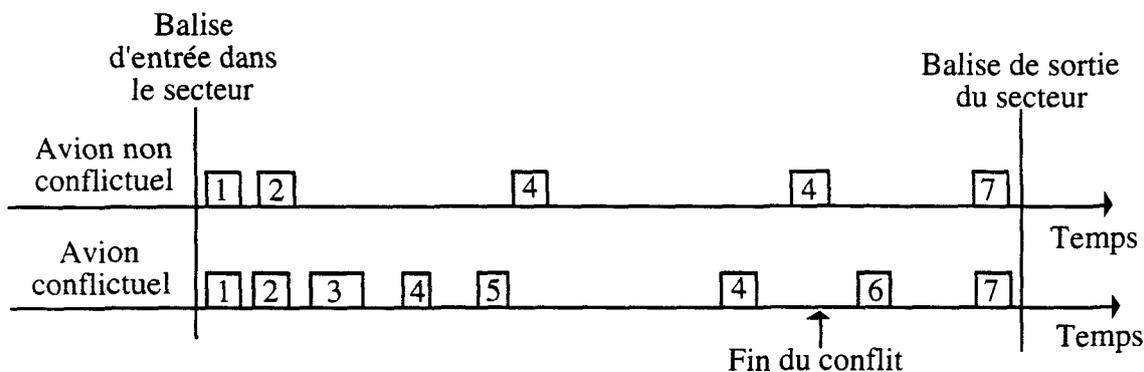
Pour éviter de compliquer inutilement la lecture, ce paragraphe ne détaillera pas tous les modules de SPECTRA, mais se limitera à l'essentiel, c'est-à-dire aux principes de répartitions dynamiques implantés dans la plate-forme. Ensuite, un plan expérimental, mis en œuvre pour des contrôleurs ayant un niveau d'expérience différent, sera proposé. Il permettra d'établir une comparaison des différents résultats, par classe de contrôleur et par type d'expérimentation.

### 1.1. Plate-forme expérimentale SPECTRA

Les principes de la répartition dynamique des tâches tactiques implantés dans SPECTRA sont d'abord décrits, en particulier, la définition du degré d'automatisation par rapport à un système d'aide adéquat et la caractérisation des modes d'allocation des tâches. L'estimateur d'exigences sur lequel se base la commande du répartiteur de tâches, dans le mode implicite, est ensuite présenté. Enfin, les interfaces spécifiques intégrées dans le poste de contrôle radar, qui permettent d'appliquer, en ligne, l'allocation dynamique des tâches, sont détaillées. Il s'agit d'un écran radar et d'une interface de dialogue contenant un "stripping électronique".

#### 1.1.1. Degré d'automatisation dans SPECTRA

Les principales tâches tactiques concernent d'une part les étapes de cheminement d'un avion non conflictuel dans le secteur : intégration du vol, recherche d'un conflit éventuel, surveillance générale, transfert de fréquence par lequel le contrôleur radar communique au pilote de l'avion la fréquence de la position de contrôle du secteur aval, figure III-1. D'autre part, elles intègrent l'ensemble des étapes successives, nécessaires pour gérer un conflit : intégration du vol, détection d'un conflit, recherche d'une solution, surveillance du conflit, modification de la trajectoire pour replacer l'avion dévié sur sa direction initiale quand le conflit est terminé, transfert de fréquence, figure III-1.



- 1 - Intégration d'un nouveau vol dans le secteur
- 2 - Recherche d'un conflit ou détection d'un conflit
- 3 - Recherche d'une solution pour résoudre le conflit
- 4 - Surveillance
- 5 - Résolution du conflit
- 6 - Remise en directe
- 7 - Transfert de fréquence à la sortie du secteur

Figure III-1 : Exemple d'enchaînement des tâches de contrôle d'un avion dans un secteur.

Avec la technologie actuelle, certaines de ces étapes, comme l'intégration d'un nouveau vol, ou le transfert de fréquence, sont totalement automatisables. Toutefois, elles sont nécessaires au maintien de la mémoire opérationnelle et/ou des connaissances du contrôleur aérien. C'est pourquoi, il est préférable de les lui affecter de manière statique afin de prendre en compte les interférences éventuelles générées par les avions. Cependant, le but de notre recherche est

d'augmenter les capacités de travail d'un secteur. En effet, lorsque le contrôleur est soumis à une charge de travail excessive qui risquerait de nuire à la sécurité du trafic, il s'agit de le décharger de certaines tâches par une répartition dynamique, en exploitant les compétences d'un système expert, SAINTEX (Système de contrôle AutomatIque de NuiT EXpérimental).

SAINTEX a été conçu par le Centre d'Etude de la Navigation Aérienne, /Mordchelles et al, 89/, et est capable de prendre en compte les données d'un nouveau vol, de détecter tous les conflits, de résoudre certains d'entre eux, de les surveiller et de remettre les avions déviés sur leur route initiale. Il sait par conséquent gérer les tâches numérotées de 1 à 6 de la figure III-1, avec néanmoins certaines limites dans ses capacités, particulièrement dans les types de conflit à résoudre.

En effet, il sait détecter tous les conflits par une extrapolation linéaire des trajectoires des avions, mais n'est capable que de résoudre les conflits entre deux avions stables en niveau et en cap, et seulement lorsqu'il a le temps nécessaire pour les traiter. De plus, sa stratégie de résolution s'effectue simplement par modification du cap d'un avion. L'ensemble des conflits que SAINTEX sait résoudre représente donc un sous-ensemble de tâches que le contrôleur est lui-même capable de résoudre. De ce fait, cet ensemble constitue l'ensemble des tâches partageables. En outre, SAINTEX est spécifique au trafic de nuit et ce contexte est simplificateur puisque, d'une part certaines contraintes d'espace sont réduites, le survol des zones militaires étant en général autorisé, et d'autre part, chaque avion suit systématiquement une route directe entre le point d'entrée et le point de sortie du secteur survolé.

L'architecture globale de SAINTEX, figure III-2, a été réadaptée pour les besoins de l'étude.

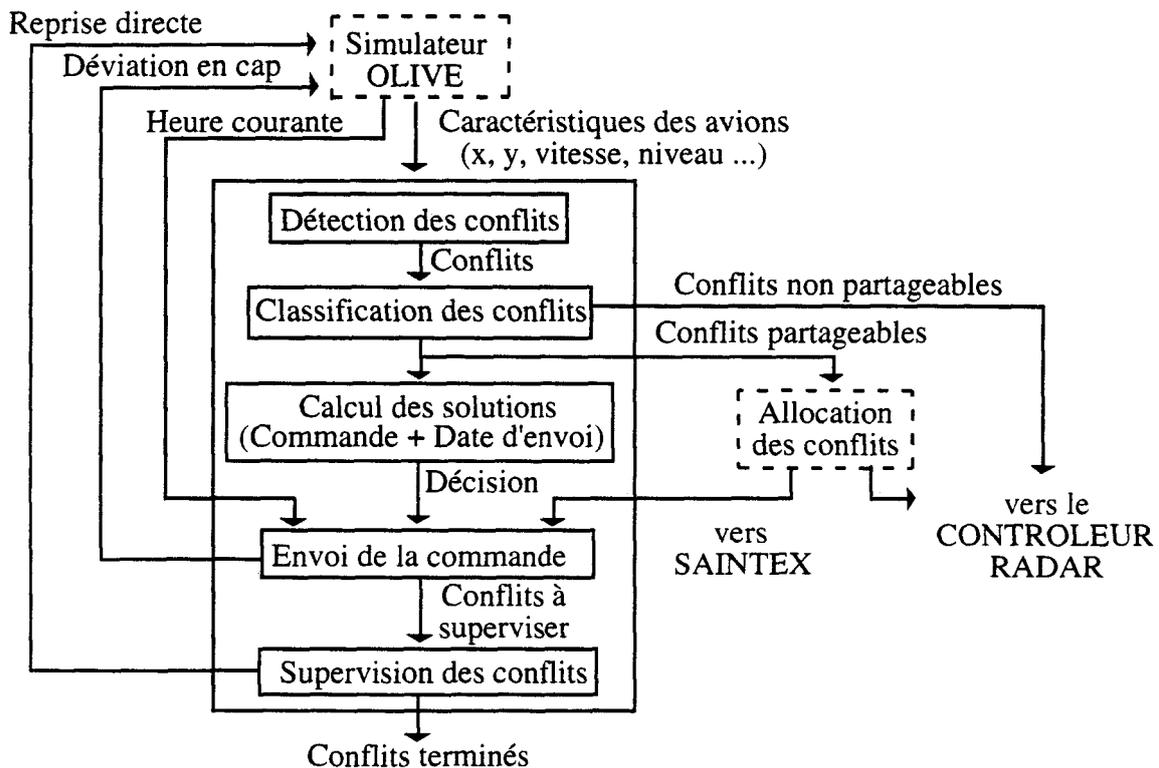


Figure III-2 : Description de SAINTEX.

Les différentes phases décisionnelles de SAINTEX se basent sur les données fournies par un simulateur de trafic aérien, appelé OLIVE. Celui-ci simule, de manière assez réaliste, l'évolution des avions en fonction du plan de vol établi préalablement et des instructions envoyées par les deux décideurs, le contrôleur aérien et SAINTEX. Pour certains conflits, seules les tâches de résolution et de suivi, ainsi que le remplacement d'un avion sur sa trajectoire initiale

sont partageables. Dans ce cas la décision de les allouer soit à SAINTEX, soit au contrôleur radar humain est prise selon des critères de charge de travail du contrôleur humain. Si celui-ci est surchargé, des tâches sont affectées à SAINTEX. Comme ces tâches partageables présentent une mauvaise transférabilité car d'une part, elles sont dépendantes les unes des autres, et d'autre part SAINTEX ne sait résoudre l'une que s'il a traité la précédente, la politique de répartition dynamique semble devoir être non préemptive (selon la définition donnée au §1.3.3. du chapitre II). Les tâches non partageables sont, en revanche, affectées systématiquement au contrôleur radar.

A partir des capacités intrinsèques de SAINTEX, deux modes de répartition ont été mis en place dans SPECTRA : le mode implicite non préemptif basé sur un algorithme d'évaluation d'exigences de tâches et le mode explicite préemptif qui autorise le contrôleur à remettre en cause l'affectation initiale des tâches qu'il a déjà faite, suivant certaines conditions.

### 1.1.2. Principes de répartition dynamique dans SPECTRA

SPECTRA, figure III-3, intègre le simulateur de trafic OLIVE, SAINTEX, le système de répartition dynamique, et les interfaces de surveillance du trafic et de commande correspondant aux deux modes de répartition. Cette plate-forme permet de mettre en œuvre plusieurs types d'environnements : un environnement sans aide où le contrôleur humain effectue le contrôle seul, sans aucune assistance, et deux environnements mettant en œuvre l'assistance de SAINTEX selon le mode explicite d'une part et implicite d'autre part, pour l'étude de la faisabilité d'une répartition dynamique des tâches.

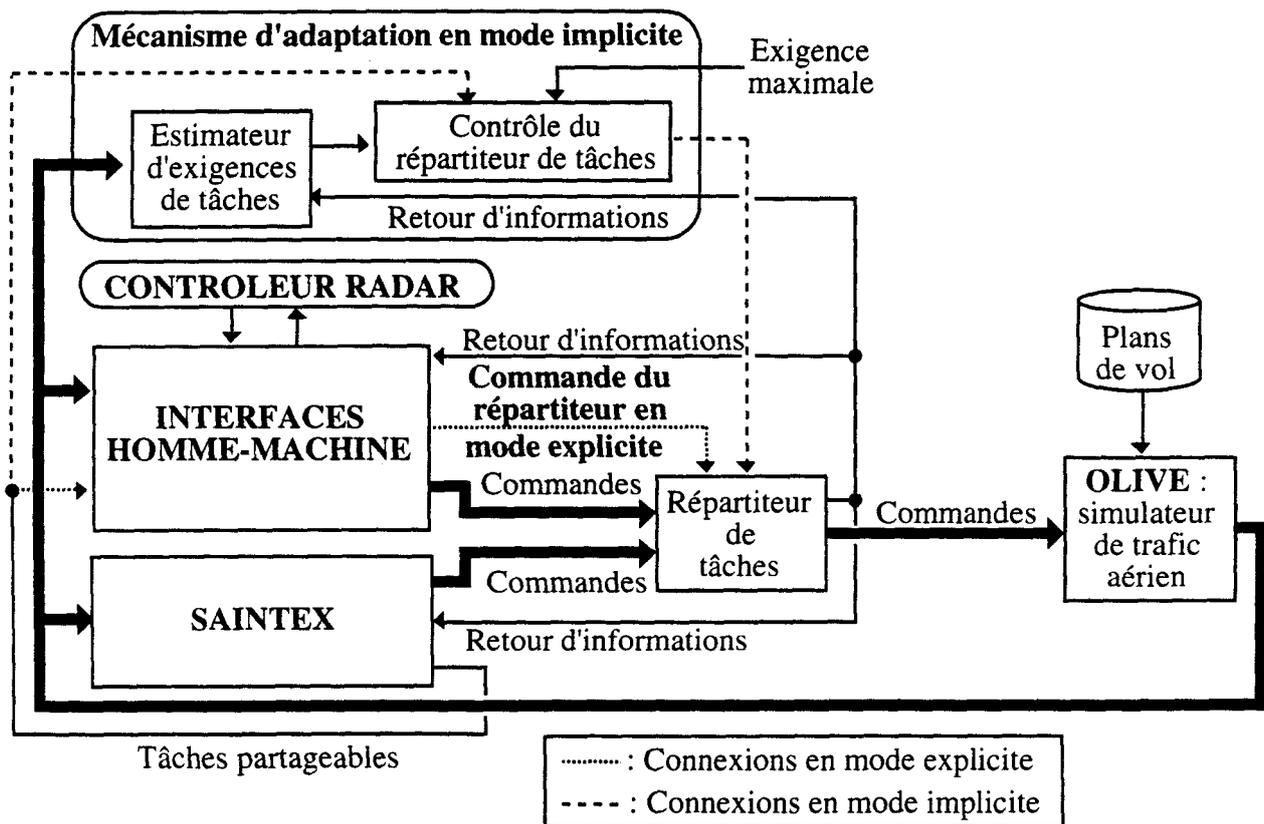


Figure III-3 : Structures de commande intégrées dans SPECTRA.

Dans le mode explicite, la gestion de la répartition est effectuée par le contrôleur lui-même, au moyen d'une interface de dialogue, en fonction de sa propre évaluation de charge de travail et de performance. Sur les interfaces, les conflits que SAINTEX sait résoudre sont indiqués par un marquage coloré spécial. De plus, la date avant laquelle le conflit reste attribuable à SAINTEX ainsi que l'ordre de déviation sont affichés sur les strips des avions concernés. Par défaut, tous les conflits sont alloués au contrôleur. Si celui-ci se sent surchargé, il

peut sélectionner un conflit et l'affecter à SAINTEX. Comme il est responsable de la gestion de la répartition des tâches partageables, il peut reprendre un conflit qu'il avait alloué préalablement à SAINTEX (mode explicite préemptif). A ce moment, si la date de l'envoi de l'ordre proposé par celui-ci est dépassée, ce conflit n'est plus partageable et reste définitivement sous la responsabilité du contrôleur.

Dans le mode implicite, la répartition des tâches est contrôlée en ligne par un système de gestion automatique implanté dans le calculateur dont le principe repose sur l'estimateur des exigences de tâches du contrôleur humain, présenté ci-après. Lorsque celles-ci sont supérieures à un seuil maximum, le système décharge le contrôleur en affectant, quand c'est possible, un ou plusieurs conflits à SAINTEX.

Cet estimateur d'exigences de tâches est la base du mécanisme d'affectation en mode implicite. Par contre, en mode explicite, il n'a pas de rôle opérationnel, mais il est utile pour comparer les différentes expérimentations effectuées sur SPECTRA. Il est désormais détaillé.

### 1.1.3. Estimateurs d'exigence de tâches

A cause de la complexité et de la spécificité de l'activité du contrôleur aérien, il est difficile d'estimer en ligne la charge de travail de celui-ci, /Hopkin, 91/. C'est pourquoi, nous avons opté pour une solution plus simple. En effet, nous avons implanté dans SPECTRA un estimateur d'exigences de tâche qui consiste à affecter un poids d'exigence à chaque événement qui se présente dans le secteur contrôlé, figure III-4, /Vanderhaegen et al, 91a/. L'exigence de tâche globale, à un instant donné, est la somme de ces poids d'exigences fonctionnels et calque le niveau de difficulté d'une situation donnée. Elle prend en compte, à la fois les états de chaque avion, de chaque conflit, ainsi que la densité globale du trafic. Pour cette dernière, les coefficients ont été choisis de manière à assimiler le niveau d'exigence impliqué par la surveillance d'un certain nombre d'avions à celui d'un certain nombre de conflits. Ainsi, par exemple, un trafic d'une densité de 15 avions représente un poids d'exigence identique à la détection ou la résolution d'un conflit à deux avions, alors qu'une densité de 30 avions est assimilée aux exigences de 3 conflits. De ce fait, l'unité d'exigence, notée NEA, peut être considérée comme le Nombre Equivalent d'Avions puisque les différentes interférences entre avions se basent sur les exigences d'un avion non problématique pour quantifier la difficulté d'une situation donnée.

	Type d'événement	Poids d'exigence affecté
Etat d'un avion	Nouvel avion non assumé (avion en entrée de secteur non pris en charge)	Nombre d'avions au même niveau + 1
	Remise en directe d'un avion (suite à un conflit résolu)	8
	Avion pas à son niveau demandé	8
Etat d'un conflit	Faux conflit (Distance de croisement entre 2 avions comprise entre 10 et 25 milles nautiques)	2
	Détection d'un conflit à 2 avions stables ou non stables en niveau ou en cap	10
	Résolution d'un conflit	10
	Détection d'un conflit à 3 avions quelconques	15
Etat général du trafic	Recherche des informations (N = nombre d'avion présents sur l'écran radar)	$\frac{1}{45} N^2 + \frac{1}{3} N$

Figure III-4 : Détermination des exigences de tâches.

La figure III-5 illustre l'évolution des exigences pour deux avions stables conflictuels, sans tenir compte des exigences engendrées par le nombre d'avions présents sur l'écran radar.

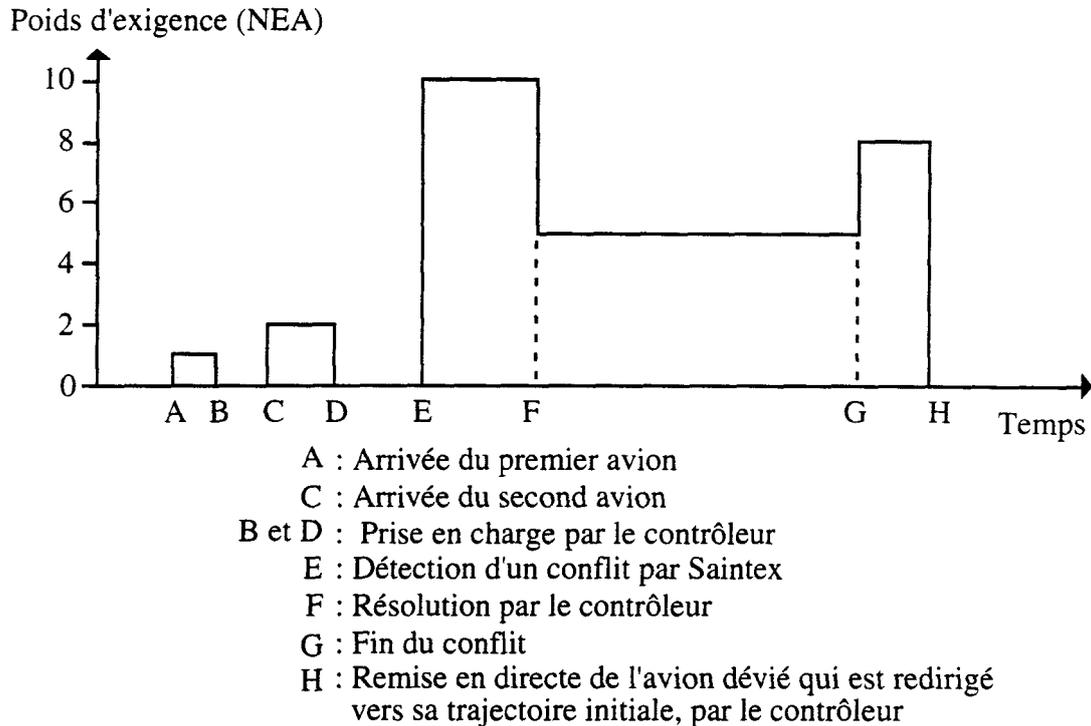


Figure III-5 : Exemple d'évolution des exigences de tâches en fonction du temps.

L'ensemble de ces niveaux d'exigences a été déterminé empiriquement avec l'aide de contrôleurs professionnels. C'est pourquoi, afin de valider cet estimateur, un module a été ajouté dans SPECTRA. Il concerne l'évaluation subjective de la charge de travail par le contrôleur aérien pendant les expérimentations à partir d'une échelle graduée. Celle-ci est affichée automatiquement toutes les 5 minutes et est graduée de 1 (niveau de charge de travail le plus bas) à 10 (niveau de charge le plus élevé). A la vue de celle-ci, l'opérateur doit évaluer sa propre charge de travail. Dès que sa réponse est validée, l'échelle disparaît. Cette tâche ne gêne en aucun cas le contrôle aérien puisque le contrôleur ne répond que lorsqu'il le désire. Cette échelle graduée est indiquée sur la partie inférieure droite de la figure III-7 du paragraphe suivant.

Ces exigences sont censées représenter le niveau de difficulté des tâches de contrôle et de surveillance du trafic aérien. Ces tâches s'effectuent à partir des interfaces homme-machine spécifiques implantées dans le poste de contrôle radar. Il s'agit d'une vue radar, et d'une interface de dialogue qui intègre, entre autres, un "stripping électronique".

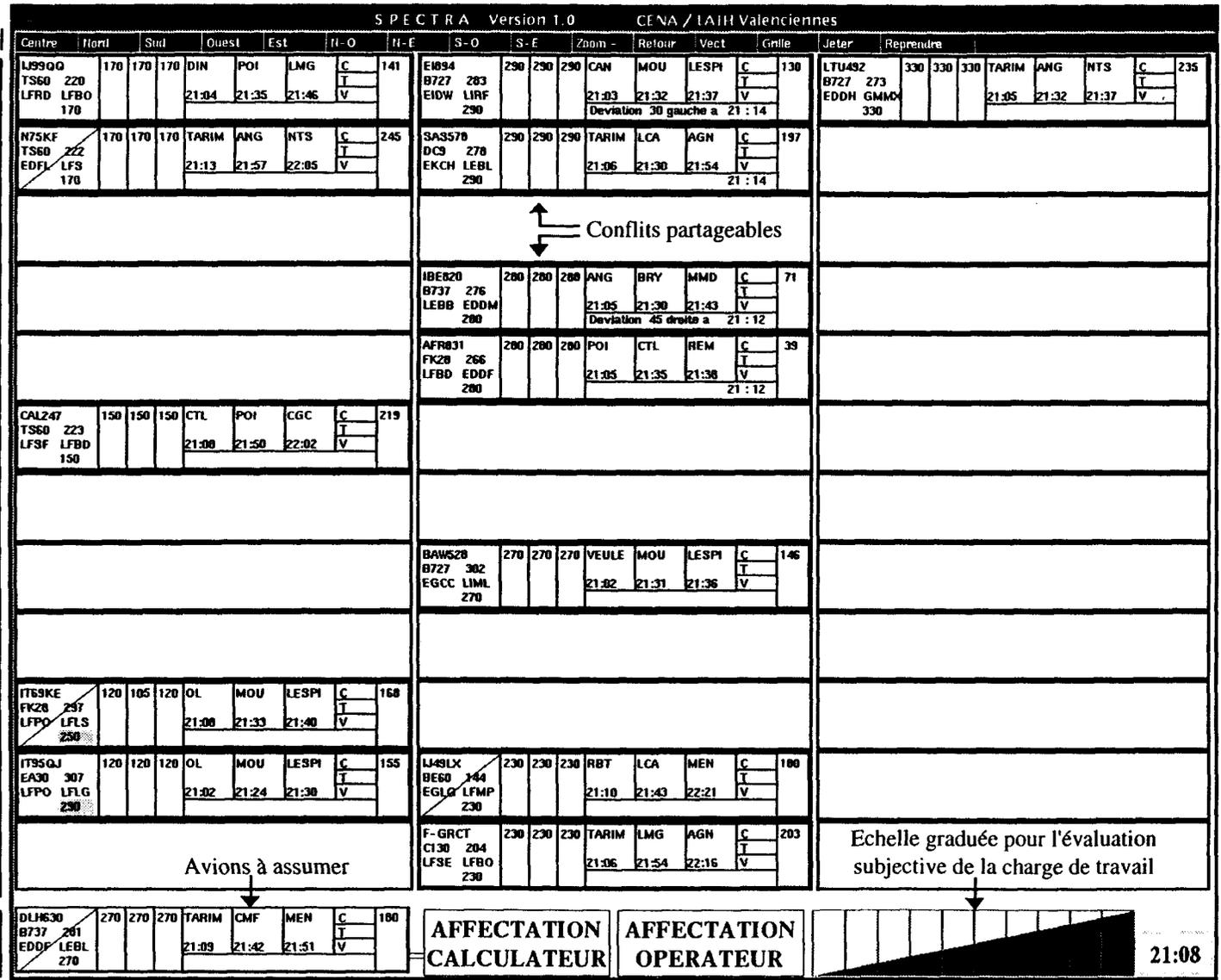
#### 1.1.4. Interfaces homme-machine de SPECTRA

Sur l'écran radar, un avion est modélisé à partir d'un triangle qui est sa position courante, et de plusieurs cercles pour ses positions antérieures. Les routes aériennes sont symbolisées par des balises marquées par leur code, comme par exemple CMB (Cambrai) ou AMB (Amboise). Quant au secteur, il est délimité par des segments de droite, figure III-6. La tache grisâtre représente la zone terminale de contrôle de Paris. En considérant les aéroports de cette région, nous n'avons, pour des raisons techniques, pris en compte que les avions qui décollent.

Une étiquette comprenant l'indicatif de l'avion, son niveau, sa vitesse, l'état d'évolution de son niveau (avion en montée, en descente ou stable) permet d'identifier l'avion sur l'interface opérateur qui est l'écran du stripping électronique, figure III-7. Celui-ci affiche les strips qui comportent le plan de vol de chaque appareil transitant par le secteur. Une souris permet au



Partie supérieure  
 Partie centrale  
 Partie inférieure  
 Figure III-7 : Stripping électronique de SPECTRA.



↑  
Zones pour l'affectation des conflits en mode explicite

↑  
Heure de la simulation

autour de chacun d'entre eux, un cadre rouge ou vert pour mémoriser le type de route utilisée par les appareils, comme cela se fait en réalité par l'utilisation de support de strip sur la tablette.

- La partie inférieure du stripping électronique contient plusieurs zones. A gauche, une zone de réception des nouveaux strips affiche, de façon automatique, le strip d'un appareil qui s'apprête à rentrer dans le secteur. Le déplacement, au moyen de la souris, des strips de cette zone vers la zone centrale réalise leur prise en compte effective, c'est-à-dire l'"assume". La partie droite contient, d'une part l'heure de la simulation, et d'autre part l'échelle permettant l'évaluation subjective de la charge de travail des contrôleurs au cours d'une expérimentation. Enfin, la partie inférieure contient également deux zones permettant de commander les affectations des conflits partageables soit à SAINTEX, soit au contrôleur radar humain, en mode de répartition explicite.

En outre, quand un avion sort du secteur, le strip correspondant est barré entièrement. Ce marquage indique que l'avion n'est plus sous la responsabilité du secteur simulé, et que par conséquent, le contrôleur radar, s'il ne l'a pas déjà fait, peut se débarrasser du strip correspondant. Nous pouvons également considérer que cette gestion des strips comprend une tâche fictive supplémentaire de communication avec le pilote de l'avion sortant, relative au transfert de fréquence.

Pour résoudre certains problèmes de détection par SAINTEX, la modification en cap est rendue impossible avant le passage des appareils sur leur première balise. Une diagonale est alors affichée sur la partie gauche du strip, pour prévenir le contrôleur qu'il ne peut pas modifier ce paramètre de vol. Néanmoins, il lui est toujours possible de modifier le niveau des appareils qui le désirent.

Un codage homogène a été défini entre la vue radar et le stripping électronique afin de déterminer à chaque instant l'état de chaque avion :

- La couleur bleue caractérise les avions non assumés, c'est-à-dire non encore pris en charge par le contrôleur (c'est la cas, par exemple de l'avion dont l'indicatif est DLH630, figure III-7).
- La couleur orange correspond aux avions pris en charge par celui-ci. Lorsque les informations sont affichées en couleur bistre, il s'agit d'avions conflictuels que SAINTEX est capable de traiter, mais qui restent encore à la charge du contrôleur. Cette couleur est active seulement en mode explicite.
- Le gris est utilisé lorsqu'un conflit est traité par SAINTEX. Par exemple, sur la figure III-7, apparaissent deux conflits partageables : le conflit entre les avions EI894 et SAS578 et le conflit entre les avions IBE820 et AFR831. SAINTEX propose de dévier le vol EI894 de 30 degrés sur la gauche, à 21 heures 14, et le vol IBE820 de 45 degrés sur la droite, à 21 heures 12.
- Le jaune indique qu'un avion a été dévié depuis 6 minutes. Cette indication simule une requête du pilote pour retourner sur sa trajectoire initiale.

De plus, sur la vue radar, lorsque les avions sont sous la responsabilité du contrôleur humain, les symboles sont entièrement colorés, même ceux des conflits partageables en mode explicite. Dans les exemples des figures III-6 et III-7, aucun conflit n'est donc affecté à SAINTEX. Enfin, quand les normes de séparation ne sont pas respectées entre ces avions, une alarme est déclenchée et affiche les triangles correspondants en rouge plein.

Sur le stripping électronique, d'autres couleurs, non détaillées ici, permettent de simuler un dialogue avec les pilotes des avions, comme par exemple un changement de niveau demandé par le pilote, ou une modification en cours de traitement.

Excepté OLIVE, écrit en langage PL1 par le CENA, tous les traitements de SPECTRA ont été développés au LAIH en langage ADA, sous l'environnement X11 pour les aspects graphiques et sous forme de tâches informatiques exécutées en temps partagé. Ces dernières

peuvent accéder, par sémaphores, à des données communes comprenant l'ensemble des données relatives aux avions et celles relatives aux conflits. A partir des modules principaux de SPECTRA, et après sa validation technique par un contrôleur aérien, un contexte expérimental déterminant les paramètres nécessaires pour valider notre étude a pu être mis en œuvre.

## 1.2. Contexte expérimental

Ce protocole expérimental établit l'ensemble des paramètres expérimentaux nécessaires à la validation de l'étude, figure III-8, /Vanderhaegen et al, 91b/.

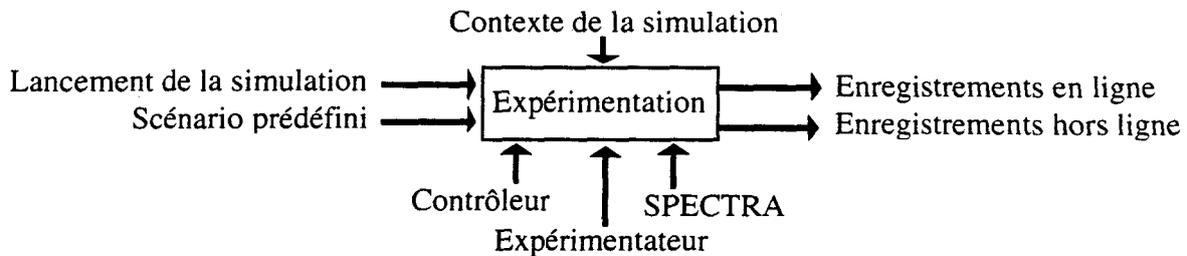


Figure III-8 : Démarche expérimentale pour la validation de SPECTRA.

Il propose donc un plan expérimental mettant en jeu deux classes de contrôleurs : des contrôleurs certifiés et des ingénieurs de la navigation aérienne. En fonction d'un contexte particulier qui détermine les paramètres d'entrée d'une expérimentation, chaque contrôleur effectue une série de simulations au cours desquelles plusieurs données ont été enregistrées en ligne. Ensuite, après chaque expérimentation, divers types de questionnaires lui ont été proposés. Il s'agit d'enregistrements hors ligne qui comprennent d'une part une méthode subjective d'évaluation de la charge de travail, et d'autre part une série de questionnaires portant sur divers points particuliers. Ces diverses données enregistrées soit directement, soit en différé sont présentées avant de proposer le plan expérimental qui détermine les démarches suivies pour réaliser les expérimentations.

### 1.2.1. Données enregistrées en ligne

Parmi les données enregistrées en ligne, l'ensemble des évolutions des exigences de tâches, ainsi que les évaluations subjectives de la charge de travail du contrôleur sur l'échelle graduée sont sauvegardées pour chacune des expérimentations. De plus, afin de pouvoir rejouer une simulation de celles-ci a posteriori, tous les événements relatifs à chaque avion d'un scénario sont également sauvegardés. En outre, ils permettront d'évaluer la performance globale du système. Celle-ci doit être sensible à la qualité et à la sécurité du trafic, relatives aux actions du contrôleur et de SAINTEX.

C'est pourquoi, le critère de performance globale que nous avons choisi, est basé sur un critère économique et sur un critère d'insécurité. Le critère économique est déterminé à partir de la consommation de carburant des aéronefs et est le rapport entre la consommation réelle totale pour l'ensemble des avions d'une expérimentation, et la consommation théorique totale pour les mêmes avions s'ils effectuaient la traversée directe du secteur depuis leur balise d'entrée jusqu'à leur balise de sortie. Le calcul de la consommation de carburant pour un avion, entre deux points A et B est défini par la formule suivante, délivrée par le CENA :

$$C_i(A,B) = \frac{d(A,B).1000}{d_s(A,B)}$$

- où  $C_i(A,B)$  est la consommation de l'avion i entre les points A et B et est exprimée en kg de carburant;  
 $d(A,B)$  est la distance en milles nautiques entre les points A et B;  
 $d_s(A,B)$  est la distance spécifique de l'appareil, c'est-à-dire la distance qu'il peut franchir avec une tonne de carburant.

La distance spécifique,  $d_s(A,B)$ , dépend donc du type d'appareil, mais aussi de son niveau de vol, de sa vitesse et de sa variation de niveau. Lorsque l'appareil est stable en niveau, elle est fonction des coefficients de pondération  $a_0$ ,  $a_1$  et  $a_2$ , propres au type et au niveau de l'appareil, et de sa vitesse  $V$  :

$$d_s(A,B) = a_0 + a_1.V + a_2.V^2$$

Lorsque l'appareil n'est pas stable en niveau, les coefficients de pondération,  $b_1$  et  $b_0$  sont différents et la distance spécifique est de la forme :

$$d_s(A,B) = \frac{b_1(B) - b_1(A)}{b_0(B) - b_0(A)} \cdot 1000$$

où  $b_0(A)$  et  $b_0(B)$  sont les distances parcourues depuis le sol jusqu'au niveau respectif des points A et B,  
 $b_1(A)$  et  $b_1(B)$  sont les consommations respectives en kilogramme.

Cette formule est donc utilisée pour calculer la consommation réelle, relative à la trajectoire réelle des avions entre les balises d'entrée et de sortie, et leur consommation théorique, relative à leur plan de vol.

Quant au critère d'insécurité, il prend en compte les avions en conflit qui n'ont pas respecté les normes de séparation, c'est-à-dire qui ont généré une alarme (ou un "air-miss"). Il s'agit donc du rapport entre le nombre d'air-miss au cours d'une expérimentation et le nombre de conflits théoriques, propres au scénario utilisé. Ainsi, la meilleure performance globale correspond à une expérimentation dans laquelle la consommation réelle est la même que la consommation théorique et au cours de laquelle aucune alarme n'a été générée.

Ces deux critères de performance seront comparés séparément car leur agrégation est difficile, voire impossible à réaliser. En effet, lorsque la charge de travail est élevée, le contrôleur a tendance à résoudre immédiatement les conflits afin de s'en décharger. Par contre, quand elle est faible, il attend le dernier moment, d'une part pour être sûr qu'il y ait conflit en laissant les avions dans leur trajectoire initiale optimale, et d'autre part pour affiner sa solution. Cependant, dans le premier cas, la performance reste effectivement optimale tant que la date limite pour résoudre un conflit éventuel n'est pas dépassée. Au delà de celle-ci, l'air-miss est inévitable et le niveau de sécurité n'est plus optimal. La performance calculée jusque-là n'est donc plus représentative. Ces deux critères antagonistes seront donc calculés indépendamment et a posteriori, de manière à comparer les expérimentations.

Les données obtenues par ces enregistrements sont complétées avec les réponses subjectives hors ligne des contrôleurs à plusieurs types de questionnaires. Les résultats issus de ces derniers détermineront les avis des contrôleurs, à propos des expérimentations et de SPECTRA. Il s'agit d'une part d'une méthode permettant de déduire la charge de travail subjective globale ressentie par les contrôleurs, et d'autre part, de plusieurs séries de questions spécifiques.

### 1.2.2. Questionnaires TLX

Chaque contrôleur est soumis à une série de questionnaires, après chaque expérimentation. Le premier type de questionnaire concerne la méthode subjective d'estimation de la charge de travail TLX (Task Load index) qui est basée sur six descripteurs sémantiques : exigence temporelle, exigence physique, exigence mentale, effort, performance et stress, /Hart et al, 88/. La méthode TLX présente deux phases. Dans la première, le contrôleur transcrit le degré plus ou moins élevé de son sentiment relatif à chaque descripteur, pour l'expérimentation qu'il vient de subir, figure III-9-a, en portant une marque sur l'échelle correspondant au descripteur. Pour le descripteur  $i$ , le niveau de difficulté est alors quantifié par  $D_i/L_i$ .

Pour l'évaluation de l'Exigence Mentale, il s'agit d'évaluer le niveau d'exigence des activités de perception et de cognition, c'est-à-dire quantifier les difficultés dues au travail de recherche de l'information, de traitement de cette information et de prise de décision. L'Exigence Physique est relative au nombre des activités physiques réalisées et à la difficulté musculaire. Quant à l'Exigence Temporelle, elle met en avant l'influence plus ou moins importante des contraintes temporelles pour exécuter les tâches. La Performance retrace la satisfaction personnelle du contrôleur et l'Effort permet de quantifier la difficulté du travail pour atteindre ce niveau de performance. Enfin, le dernier descripteur correspond au Stress subi par l'opérateur, dû par exemple au niveau de risque auquel il a du faire face dans son travail de contrôle.

Dans la seconde phase, les descripteurs sont appariés, ce qui donne quinze paires de descripteurs distinctes. Ces dernières sont présentées au contrôleur qui indique pour chacune d'elles, le descripteur de la paire qui a influencé le plus son niveau de charge de travail, figure III-9-b.

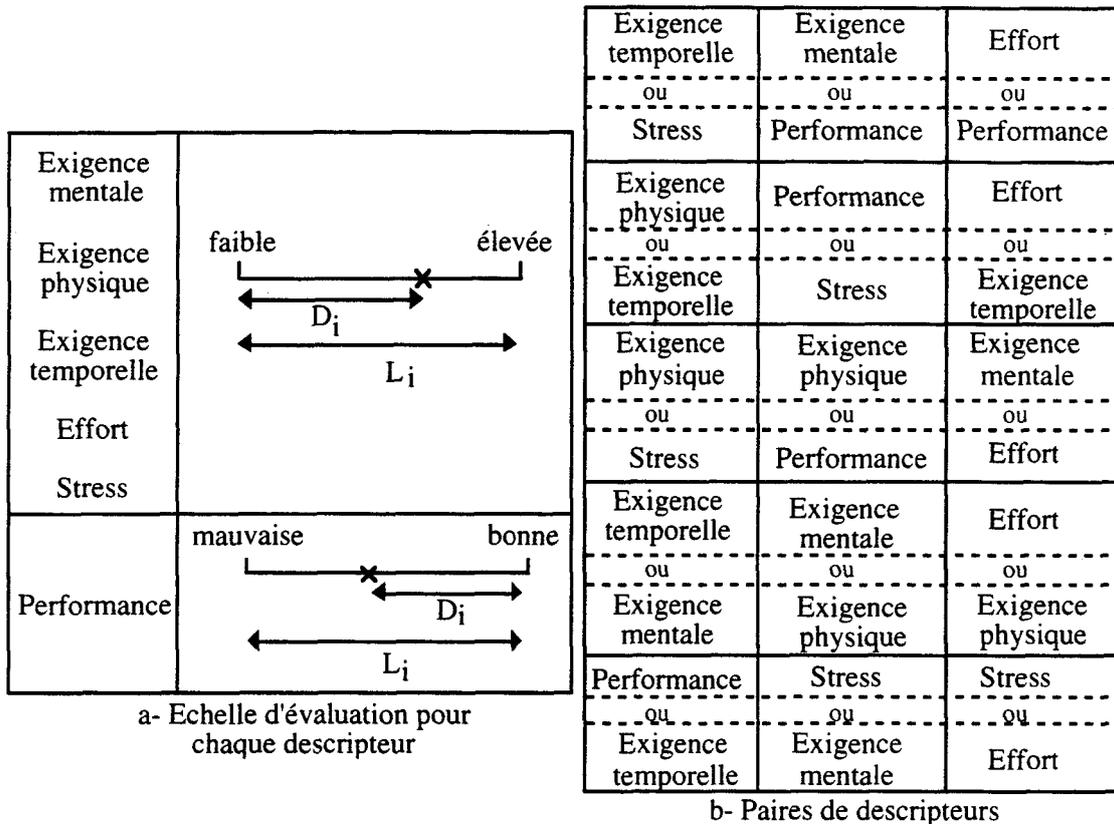


Figure III-9 : Méthode TLX.

Ceci permet ensuite de comptabiliser le nombre  $C_i$  de fois que le descripteur a été mentionné par l'opérateur.  $C_i$  est donc le paramètre d'agrégation associé au descripteur  $i$  pour obtenir la charge de travail globale, comprise entre 0 et 1 :

$$\text{Charge de travail globale} = \frac{1}{15} \sum_{i=1}^6 \frac{D_i}{L_i} \cdot C_i$$

où :  $D_i$  est l'évaluation pour le descripteur  $n^o i$  sur l'échelle de longueur  $L_i$ ,  
 $C_i$  est le nombre de fois qu'un même descripteur  $n^o i$  a été choisi dans le tableau des paires de descripteur. Lorsque le contrôleur n'a pas pu choisir, l'incrémentation est de 0,5 au lieu de 1 pour les descripteurs correspondants.

Dans un second temps, d'autres questionnaires sont posés afin d'obtenir des informations subjectives complémentaires.

### 1.2.3. Autres questionnaires

Une première série porte sur des aspects généraux à propos des interfaces de SPECTRA, des scénarios et des stratégies utilisées par les contrôleurs pour gérer les strips :

- Que pensez-vous des scénarios ? (nombre d'avions, déstructuration du trafic)
- Que pensez-vous de l'interface radar ? (quantité d'information, informations inutiles, informations manquantes...)
- Que pensez-vous de l'interface strip ? (Quantité d'informations, informations inutiles, informations manquantes, utilisation de la souris, difficultés d'utilisation...)
- Que pensez-vous de l'interface globalement ? vous aide-t-elle ? est-elle une contrainte pour construire vos stratégies de résolution ? est-elle une contrainte pour les appliquer ?
- Utilisez-vous plutôt le radar ou plutôt le strip ? (pour la détection, pour la résolution, pour le suivi d'un conflit ...)
- Quelle stratégie de résolution utilisez-vous ? (résolution immédiate ou non, pourquoi ?)

Un deuxième type de questions s'oriente plus particulièrement sur la charge de travail et la performance des contrôleurs :

- Au cours du scénario, il vous est demandé d'évaluer votre charge de travail. A cet instant, donnez-vous la priorité au contrôle aérien ou négligez-vous le trafic pour répondre immédiatement au questionnaire ?
- Etes-vous satisfait de votre propre estimation de charge de travail au cours de l'expérimentation ? Pourquoi ?
- Etes-vous satisfait de votre performance globale ? Pourquoi ?
- Quels sont les facteurs qui augmentent le plus votre charge de travail ? (nombre d'avions, nombre de conflits, avion à assumer, avions évolutifs, gestion du placement des strips, jet des strips, envoi des ordres, quantité d'informations...)
- Si une alarme s'est déclenchée entre deux avions : le conflit a-t-il été vu ? (oui mais trop tard, oui mais mal résolu, non ). A quoi l'alarme est-elle due ? (charge de travail trop forte, trop d'avions, avions mal assumés...)

D'autres séries de questions portent sur la répartition explicite et sur la répartition implicite. Les questions sont similaires pour chaque mode de répartition :

- Ce mode de répartition vous gêne-t-il ?
- Ce mode de répartition vous semble-t-il efficace ? Apporte-t-il une aide réelle ?
- Diminue-t-il réellement votre charge de travail ?
- Surveillez-vous les conflits alloués à SAINTEX ? (oui autant que les miens, oui si j'ai le temps, pas vraiment, non pas du tout)

Pour le mode explicite, d'autres questions permettent de connaître les stratégies d'allocation des tâches partageables :

- Quand affectez-vous les conflits à SAINTEX ? Pourquoi ?
- Avez-vous repris les conflits à SAINTEX ? Pourquoi ?

Enfin, le dernier questionnaire permet, après toutes les expérimentations subies par le contrôleur, de comparer les deux modes de répartition.

- Quel mode de répartition préférez-vous ? (implicite, explicite, aucun...)
- Quel mode de répartition vous semble le plus efficace ? (implicite, explicite, aucun...)
- Quel mode de répartition diminue le plus votre charge de travail ? (implicite, explicite, aucun...)
- En contrôle réel, aimeriez-vous disposer d'une répartition ? (oui l'implicite, oui l'explicite, oui mais sous une autre forme...)

Lors de cette étude de faisabilité, plusieurs contrôleurs ont été sollicités pour effectuer ces expérimentations sur SPECTRA. Un plan expérimental a donc été mis en œuvre à partir de deux classes de contrôleurs. Celles-ci correspondent à des niveaux de qualifications différents : une classe est représentée par des contrôleurs certifiés, et une autre classe par des ingénieurs de la navigation aérienne, considérés comme des contrôleurs stagiaires.

#### 1.2.4. Plan expérimental

Plusieurs scénarios ont été créés pour mener à bien les expérimentations. Un scénario d'entraînement, d'une durée de deux heures, a permis aux contrôleurs de s'habituer, en mode explicite, aux interfaces de SPECTRA pour envoyer des ordres et manipuler les strips, de comprendre les mécanismes de SAINTEX et la philosophie de la répartition dynamique des tâches. Trois autres scénarios d'une heure et demie environ ont été utilisés pour les expérimentations sans aucune aide, en mode explicite et en mode implicite. Ils font intervenir une cinquantaine d'avions provoquant plus d'une dizaine de conflits de types différents, figure III-10-a. Suffisamment de conflits partageables ont été intégrés dans chacun des scénarios afin de pouvoir appliquer les principes de répartition dynamique des tâches dans SPECTRA. De plus, des conflits non partageables affectés directement au contrôleur permettent d'éviter, en mode explicite, d'utiliser SAINTEX comme un simple détecteur de conflits.

Neuf contrôleurs certifiés (repérés par les numéros de 01 à 09) et six ingénieurs de la navigation aérienne (repérés par les numéros de 10 à 15) ont participé à cette campagne d'expérimentations. La première classe de contrôleurs est constituée de contrôleurs experts alors que la seconde est représentée par des ingénieurs ayant effectué une formation de trois mois au minimum, en salle de contrôle. Afin de pouvoir comparer au mieux les résultats, et pour éviter l'effet d'apprentissage des scénarios, un plan de vol différent est utilisé pour chaque expérimentation. C'est pourquoi, l'ordre de passage selon le mode de répartition a été prédéfini, sous forme de contextes globaux, figure III-10-b. Par conséquent, pour chacun d'entre eux, trois contrôleurs certifiés et deux ingénieurs ont subi les mêmes conditions expérimentales. De plus, pour la répartition implicite, le seuil d'exigence maximum est identique pour tous les contrôleurs et a été fixé de façon expérimentale à 45.

Numéro de scénario	1	2	3
Nombre d'avions	49	46	50
Nombre d'avions conflictuels	39	34	40
Nombre de conflits partageables	16	12	16
Nombre de conflits total	17	17	20

a- Description des scénarios.

		Contexte global 1	Contexte global 2	Contexte global 3
Numéro scénario sans aide		2	3	1
Numéro scénario en explicite		1	2	3
Numéro scénario en implicite		3	1	2
Numéro de contrôleur	Certifiés	01, 05, 07	02, 04, 08	03, 06, 09
	Ingénieurs	10, 15	11, 13	12, 14

b- Contexte expérimental.

Figure III-10 : Description du plan expérimental.

Lors des expérimentations effectuées au centre de contrôle d'Athis-Mons, au CENA, l'ensemble du logiciel de SPECTRA a été réparti physiquement sur deux machines : une Vax Station 3100 et un calculateur central Vax 6410. La Vax Station 3100, connectée par réseau Ethernet par lequel transitent les informations pour l'écran radar, permet ici de décharger le calculateur central Vax 6410 dans lequel le reste du logiciel est implanté. Les contraintes de temps réel relatives à notre application peuvent ainsi être respectées. Enfin, une troisième machine, un Terminal X VT1300, est utilisée comme terminal graphique pour l'interface de dialogue, intégrant le stripping électronique.

Les dépouillements des résultats obtenus avec les contrôleurs certifiés et ceux obtenus avec les ingénieurs de la navigation aérienne permettent de mettre en évidence des comportements différents pour ces deux classes de contrôleurs.

## **2. Dépouillements des données expérimentales**

Les réponses des contrôleurs ont été synthétisées et ont permis une étude comparative des deux classes testées, /Vanderhaegen et al, 92b/. Nous rappelons ici les différentes analyses effectuées : résultats globaux dus aux différents questionnaires, analyse des données liées à la charge de travail, analyse des données liées à la performance. Dans la suite de ce mémoire, les ingénieurs de la navigation aérienne seront désignés comme contrôleurs stagiaires. Les expérimentations effectuées par les contrôleurs certifiés (de 01 à 09) sont désignées par les lettres CC et celles effectuées par les contrôleurs stagiaires (de 10 à 15) par CS.

### **2.1. Réponses aux questionnaires**

L'ensemble des réponses subjectives globales est présenté ci-après. Il prend en compte les résultats des questionnaires sur le contexte expérimental, sur la charge de travail et la performance, sur le mode explicite, puis le mode implicite, et enfin sur la comparaison de ces deux modes.

#### **2.1.1. Réponses générales sur le contexte expérimental**

Bien que les contrôleurs pensent que le nombre d'avions n'est pas trop important, la déstructuration du trafic est considérée comme gênante pour 70 % des CC contre 22 % des CS. Il semble donc que les contrôleurs stagiaires se soient mieux adaptés aux interfaces radar et strip. En effet, 78 % et 89 % des CS contre 33 % et 59 % des CC pensent que ces interfaces sont correctes. Globalement, l'interface de SPECTRA ne pose cependant aucun problème pour 61 % des CS et 74 % des CC et n'engendre pas de contrainte sur le contrôle du trafic pour 39 % des CS et 44 % des CC. Du fait de la grande dimension du secteur, le manque de repère par rapport à des secteurs connus est en fait ressenti comme une gêne par les certifiés.

On peut ajouter que SPECTRA ne modifie pas trop les stratégies habituelles des contrôleurs puisque, comme en contrôle normal, la détection est faite avec les strips (50 % pour CS et 74 % pour CC), la résolution (67 % pour CS et 96 % pour CC) et le suivi des conflits (67 % pour CS et 100 % pour CC) avec la vue radar. Parce que les scénarios comportent un grand nombre d'avions, les contrôleurs ont résolu les conflits le plus tôt possible (44 % pour les CS et 85 % pour les CC), afin de ne pas se retrouver en situation de surcharge de travail. Habituellement, cette caractéristique se retrouve en contrôle de jour avec un trafic structuré, plutôt qu'en contrôle de nuit.

La deuxième série de questions permet aux contrôleurs de justifier leur charge de travail et leur performance.

### 2.1.2. Réponses aux questions sur la charge de travail et la performance

Globalement, les tendances pour les deux classes de contrôleurs testés sont similaires. Les résultats sont cependant plus explicites avec les contrôleurs certifiés. En ce qui concerne les facteurs qui augmentent le plus la charge de travail, la classification est la suivante :

- le nombre d'avions pour 72 % des CS et 85 % des CC,
- le nombre de conflits pour 50 % des CS et 70 % des CC,
- la gestion du placement des strips pour 33 % des CS et 48 % des CC,
- les avions évolutifs pour 39 % des CS et 26 % des CC.

Les réponses pour les autres facteurs ne permettent pas de conclure. De plus, au cours des expérimentations, les contrôleurs devaient évaluer toutes les 5 minutes leur propre charge de travail sur une échelle graduée de 1 (charge minimale) à 10 (charge maximale). Pour 50 % des CS et 78 % des CC, ils ont donné la priorité à la gestion du trafic plutôt qu'à la réponse immédiate sur leur sentiment de charge avec cette échelle. Néanmoins, nous ne pouvons pas prendre en compte le délai entre l'instant d'affichage de celle-ci et l'instant de la réponse car il n'est pas représentatif du niveau d'activité des contrôleurs. Dans la majorité des cas, les contrôleurs finissent la tâche qu'ils sont en train d'effectuer, répondent au questionnaire, puis traitent une autre tâche. Par contre, la plupart d'entre eux (50 % des CS et 78 % des CC) pensent avoir répondu correctement, ce qui veut dire qu'ils situent correctement leur niveau de charge par rapport à la plage proposée. Ainsi, nous pouvons retenir les valeurs données par les contrôleurs comme indices de charge.

La performance est estimée comme satisfaisante pour 50 % des CS et 70 % des CC. Néanmoins, au cours des expérimentations, des alarmes sont apparues (83 % des CS et 78 % des CC). Celles-ci correspondent à des air-miss dangereux ou non dangereux, la distinction n'ayant pas été faite. Ce nombre important d'alarmes est dû, d'une part au fait que les scénarios comportent beaucoup d'avions, et d'autre part que les contrôleurs étaient seuls pour gérer le trafic. De plus, la moitié de ces alarmes est apparue suite à une mauvaise résolution résultant d'une mauvaise appréciation des distances sur la vue radar de la part des contrôleurs.

L'ensemble des remarques subjectives sur la charge de travail et la performance des contrôleurs est complété par les réponses aux questionnaires des expérimentations réalisées avec SAINTEX, en mode explicite, puis en mode implicite.

### 2.1.3. Réponses concernant le mode explicite

Suite aux expérimentations en contexte explicite, les contrôleurs ont estimé à l'unanimité (100 % pour les deux classes) que cette répartition leur apporte une aide réelle et ont constaté qu'elle diminue leur charge de travail (83 % des CS et 100 % des CC). De plus, ils n'ont pas ressenti de gêne dans leur travail (67 % des CS et 89 % des CC).

S'il est évident que la répartition des tâches en mode explicite semble apporter une aide, il est par contre difficile d'établir une politique d'utilisation de SAINTEX commune à tous les contrôleurs :

- trois contrôleurs (03-06-13) affectent les conflits à SAINTEX lorsque leur charge de travail est trop élevée et qu'il y a trop de conflits,
- trois contrôleurs (01-07-15) utilisent uniquement leur charge de travail comme critère d'affectation,
- deux contrôleurs (02-14) affectent les conflits quand ils sont trop nombreux,
- deux contrôleurs (04-10) affectent les conflits à SAINTEX si le délai avant l'échéance donnée par celui-ci pour résoudre un conflit est faible,
- un contrôleur (08) utilise le système comme un outil de coopération vertical, c'est à dire qu'il attend que SAINTEX donne une solution puis il la reprend en l'affinant,

- pour un contrôleur (11), l'affectation d'un conflit à SAINTEX est fonction de sa complexité,
- un contrôleur (09) donne un conflit à SAINTEX si la solution proposée par celui-ci lui paraît satisfaisante,
- un contrôleur (12) affecte systématiquement tous les conflits partageables à SAINTEX pour ne s'occuper que des tâches non partageables,
- un contrôleur (05) affecte systématiquement à SAINTEX, un conflit sur deux.

En ce qui concerne la surveillance des conflits affectés à SAINTEX, nous pouvons noter que 22 % des contrôleurs certifiés continuent à les surveiller autant que les leurs et 33 % s'ils ont le temps. En fait, en mode explicite, les contrôleurs certifiés se sentent maître de la situation et l'affectation des conflits à SAINTEX est réfléchie. Ainsi, ils surveillent plus ou moins les conflits qu'ils ont affectés à SAINTEX et les reprennent éventuellement.

Par contre, les contrôleurs stagiaires ne les surveillent pas vraiment (50 % des CS), voire pas du tout (33 % des CS). De plus, ils n'ont jamais repris de conflit à SAINTEX, contrairement aux contrôleurs certifiés. Sans aucune aide, ils sont débordés. Cependant, avec l'intégration d'une aide de type explicite, ils sont contraints d'affecter un certain nombre de conflits au système afin de réguler leur propre charge de travail et de maîtriser au mieux le contrôle.

Pour le mode implicite, le questionnaire est pratiquement le même et les réponses, sur la charge de travail par exemple, sont également satisfaisantes pour la plupart des expérimentations.

#### **2.1.4. Réponses concernant le mode implicite**

Pour 67 % des CS et 89 % des CC, les contrôleurs ont estimé que la répartition dynamique implicite ne les gêne pas au cours des expérimentations. Ils considèrent qu'elle apporte une aide et qu'elle fait baisser leur charge de travail (pour 83 % des CS et 78 % des CC). Contrairement au mode explicite, les contrôleurs certifiés surveillent davantage les conflits alloués à SAINTEX (plus de 60 % des CC) bien qu'ils ne puissent pas les reprendre. Par contre, les contrôleurs stagiaires ne les surveillent pas du tout (pour 67 % des CS).

Le mode implicite génère une charge supplémentaire de surveillance qui s'explique par le fait que les contrôleurs certifiés ont plus de temps pour le faire, qu'ils se sentent malgré tout responsables de l'ensemble du trafic et qu'ils ont moins confiance en SAINTEX. Par contre, avec ce mode de répartition, les contrôleurs stagiaires ne se préoccupent que des conflits que le système leur laisse afin de ne pas en oublier. En fait, ils ne surveillent pas ceux que SAINTEX traite parce qu'ils n'en ont pas vraiment le temps.

La dernière série de questions est la comparaison des deux modes. Elle permet de faire une brève étude comparative entre ces derniers.

#### **2.1.5. Comparaison des deux modes**

Les contrôleurs certifiés préfèrent plutôt le mode explicite, contrairement aux contrôleurs stagiaires qui préfèrent le mode implicite. Pour les certifiés, la tâche de surveillance des conflits affectés à SAINTEX génère une charge de travail plus importante en mode implicite qu'en mode explicite alors que dans ce dernier, la gestion de la répartition des tâches partageables induit une charge supplémentaire. Pour les autres, c'est le contraire : cette affectation de tâches et ce suivi des conflits en mode explicite génèrent une charge de travail plus gênante que ce suivi seul en mode implicite.

Néanmoins, les contrôleurs estiment que la répartition dynamique implicite est plus efficace que l'explicite (50 % des CS et 78 % des CC) et qu'elle diminue davantage la charge de travail (67 % des CS et 78 % des CC).

Comme les contrôleurs stagiaires n'ont pas l'habitude de contrôler le trafic aérien, ils ne savent pas si, en situation réelle, ils seraient satisfaits de ces types d'aide. Par contre, les avis sont partagés pour les contrôleurs certifiés. Certains préfèrent le mode implicite mais n'ont pas confiance en SAINTEX ou en un futur étage décisionnel. Ils réclament la possibilité de reprendre les conflits à la machine. Cependant, ils reconnaissent qu'ils ont plus de temps pour affiner la résolution des conflits. Ceux qui préfèrent globalement le mode explicite pensent mieux maîtriser la situation et sont donc moins stressés. Néanmoins, ils trouvent ce mode de répartition plus dangereux.

Ces premiers résultats sont encourageants puisqu'ils semblent confirmer la faisabilité d'une répartition dynamique des tâches, et d'une certaine manière valider les interfaces de SPECTRA. Ces premières réponses qualitatives doivent cependant être complétées par les autres données subjectives et objectives, afin de vérifier la baisse effective de la charge de travail avec les deux modes de répartition.

## 2.2. Résultats sur la charge de travail

Les résultats complémentaires sur la charge de travail globale subjective, calculée à partir de la méthode TLX, ainsi que l'évolution des exigences de tâches au cours des expérimentations sont maintenant évalués.

### 2.2.1. Données TLX

A partir des questionnaires TLX, la charge de travail globale a été calculée pour chaque contrôleur, pour les trois modes étudiés (sans aide, explicite, implicite). Les contrôleurs ont subi chacun trois expérimentations différentes avec trois scénarios différents afin d'éviter les effets d'apprentissage. Ceux qui ont vécu le même contexte expérimental, c'est-à-dire ceux qui ont subi les mêmes scénarios pour les trois expérimentations sont regroupés dans l'histogramme de la figure III-11.

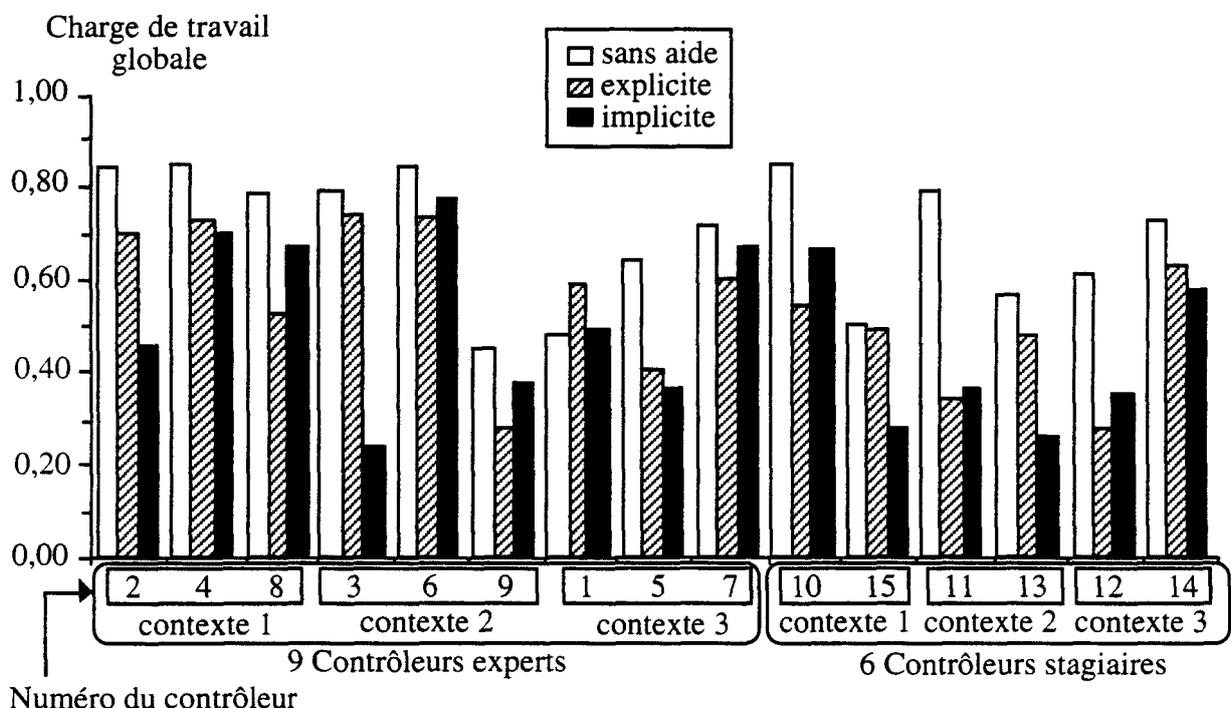


Figure III-11 : Charge de travail globale par la méthode TLX.

Pour des conditions expérimentales identiques, les résultats sont différents. Par conséquent, chaque contexte global ne reflète pas une difficulté particulière. Néanmoins, il est

intéressant de constater que les tendances sont similaires pour les deux classes de contrôleurs, même si leurs niveaux de qualification ne sont pas comparables, et même si, pour des exigences identiques, chaque opérateur humain ne les ressent pas de la même manière. En effet, globalement, tous les contrôleurs (excepté le contrôleur 01) ont ressenti le contexte sans aide comme étant le plus éprouvant. Pour sept contrôleurs (02, 03, 04, 05, 13, 14 et 15), le mode implicite engendre une charge de travail moins importante qu'en mode explicite. Pour les autres (06, 07, 08, 09, 10, 11 et 12), c'est le contraire : le mode explicite engendre une charge de travail moins importante que le mode implicite.

Par conséquent, les impressions des contrôleurs, à travers la méthode TLX, confirment l'intérêt d'une intégration d'un mode de répartition qui permet la diminution de la charge de travail globale, sans néanmoins discriminer mode implicite et mode explicite. Elles sont renforcées par les évaluations, détaillées ci-après, d'une part des exigences de tâches par le modèle, et d'autre part de la charge de travail subjective des contrôleurs sur l'échelle graduée. Nous pouvons, en outre, exploiter ces valeurs subjectives puisque les contrôleurs pensent avoir répondu correctement.

### 2.2.2. Exigences mesurées et charge de travail subjective

Afin de pouvoir comparer les trois contextes par contrôleur, les exigences mesurées par le modèle et les évaluations subjectives de la charge de travail, malgré leur différence sémantique, ont été regroupées sur les mêmes graphiques. La figure III-12 est un exemple de l'évolution, au cours du temps, d'une part des exigences de tâches, et d'autre part des réponses de quelques contrôleurs sur l'échelle d'évaluation de la charge de travail. Les échelles des deux mesures sont mises en correspondance artificiellement afin que les deux courbes se suivent au mieux. Rappelons que selon les principes du modèle d'exigence, l'unité d'exigence est le NEA (Nombre Equivalent d'Avions, cf §1.1.3.), et que la charge de travail subjective est sans unité. Globalement, pour l'ensemble des contrôleurs, les expérimentations sans aide ont généré une charge de travail et des exigences de tâches plus importantes. La comparaison des résultats en modes explicite et implicite ne fait pas apparaître de différence significative.

Dans la majorité des expérimentations, l'évolution de la charge de travail subjective suit assez fidèlement l'évolution des exigences mesurées par le modèle. En effet, les exigences les plus élevées ont tendance à correspondre à une charge de travail subjective élevée. De la même façon, les exigences les plus faibles ont tendance à correspondre à une charge de travail subjective faible.

Il semble ainsi exister une certaine corrélation entre ces deux types de variables, corrélation que nous avons cherchée à vérifier. Or les exigences mesurées sont des valeurs continues, contrairement aux évaluations subjectives de la charge de travail qui représentent des valeurs discrètes, évaluées à une date précise. Par conséquent, l'exigence mesurée à la même date a été moyennée avec celles enregistrées à plus ou moins 2,5 minutes à partir de cette référence temporelle. Avec cette discrétisation, nous obtenons alors plusieurs couples de points qui nous permettent de vérifier, par le test de dépendance monotone de Kendall, /Lebart et al, 82/, si cette dépendance entre les deux mesures est réelle.

Ce test non paramétrique cherche à détecter une dépendance monotone entre deux variables X et Y, au vu de N couples d'observations  $(x_i, y_i)$ . La statistique K de Kendall est définie de la façon suivante : pour chacun des  $C_2^n$  couples  $(y_i, y_j)$ , on compte une concordance si  $(x_i, x_j)$  sont rangés dans le même sens, sinon il s'agit d'une discordance. K est alors la différence entre le nombre de concordances C, et le nombre de discordances D. Lorsque la concordance est complète, K est égal à C. Lorsqu'il n'y a pas de dépendance monotone, il y a compensation du nombre de concordances par le nombre de discordances, et K tend vers 0. La table associée au test donne, pour N et pour le risque choisi, la valeur qui ne doit pas être atteinte pour que l'on puisse conclure au rejet de l'hypothèse  $H_0$  qu'il n'y a pas de dépendance monotone entre les deux variables.

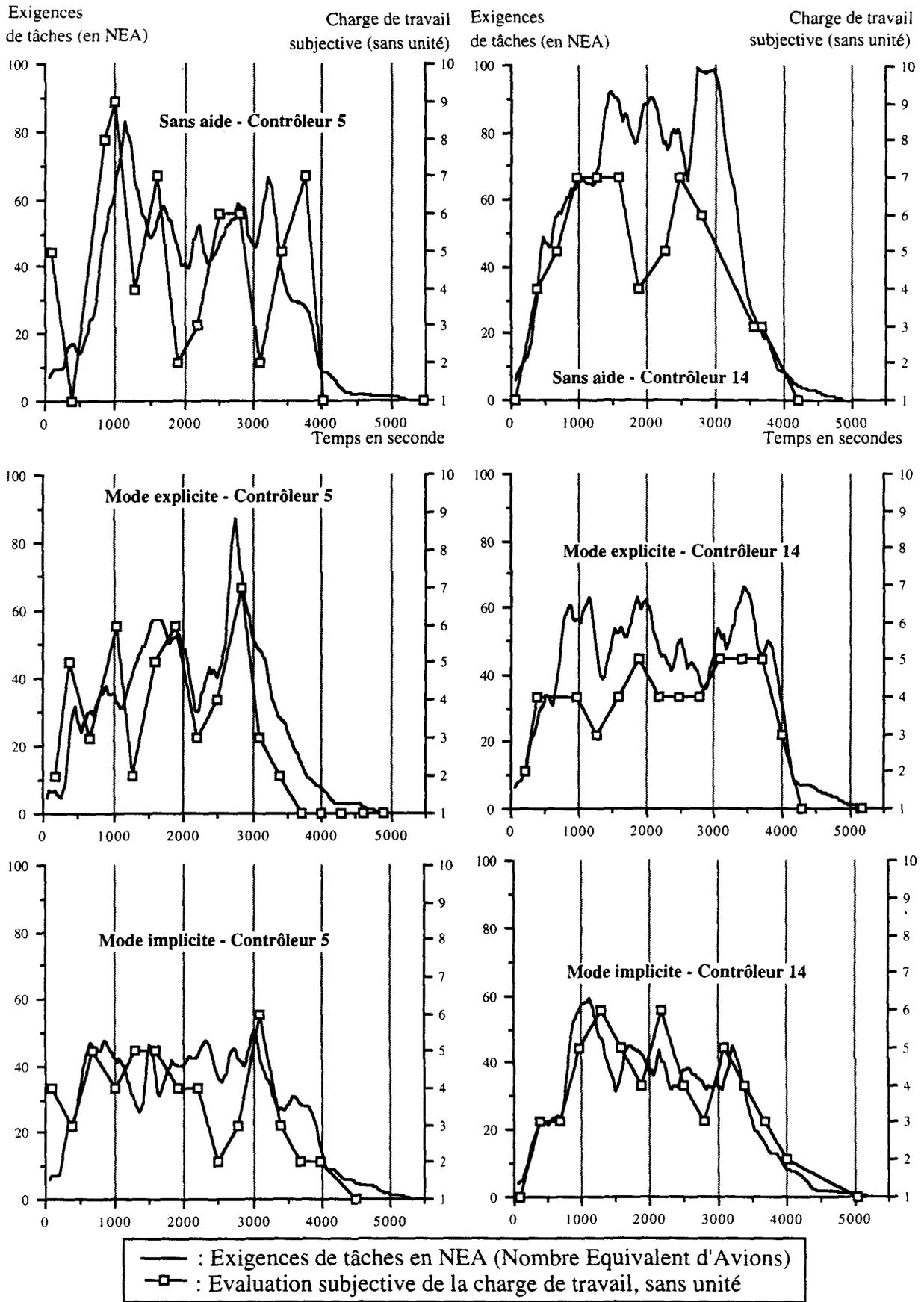


Figure III-12 : Comparaison entre exigences de tâches mesurées et charge de travail subjective pour les contrôleurs 5 et 14

Ainsi, sur les 45 expérimentations, c'est-à-dire (15 sujets) x (3 modes), 44 d'entre-elles conduisent, au risque de 0,5%, à rejeter l'hypothèse H0 qu'il n'y a pas de dépendance monotone entre les deux types de mesure. Ce résultat montre sans équivoque que le critère d'exigences de tâche, tel que nous l'avons défini, caractérise relativement bien les difficultés réelles du trafic.

Par conséquent, l'estimateur d'exigences de tâches que nous avons déterminé, reflète assez bien la complexité du trafic, à un instant donné. C'est pourquoi, nous pouvons encore l'utiliser dans la dernière phase de nos dépouillements pour l'étude de la performance.

### 2.3. Résultats concernant la performance

De la même manière que pour la charge de travail, il est possible d'étudier en détail la performance pour chaque expérimentation, à partir des conclusions fournies par des mesures objectives enregistrées. Celles-ci nous permettent d'étudier le critère économique et le critère d'insécurité, puis de les comparer avec le niveau de coopération homme-machine et les exigences de tâches.

#### 2.3.1. Critère économique et critère d'insécurité

La performance globale, caractérisée par le critère économique et le critère d'insécurité, définis plus haut dans la présentation du protocole expérimental, a été calculée pour toutes les expérimentations, d'une part pour les contrôleurs stagiaires, et d'autre part pour les contrôleurs certifiés, figure III-13.

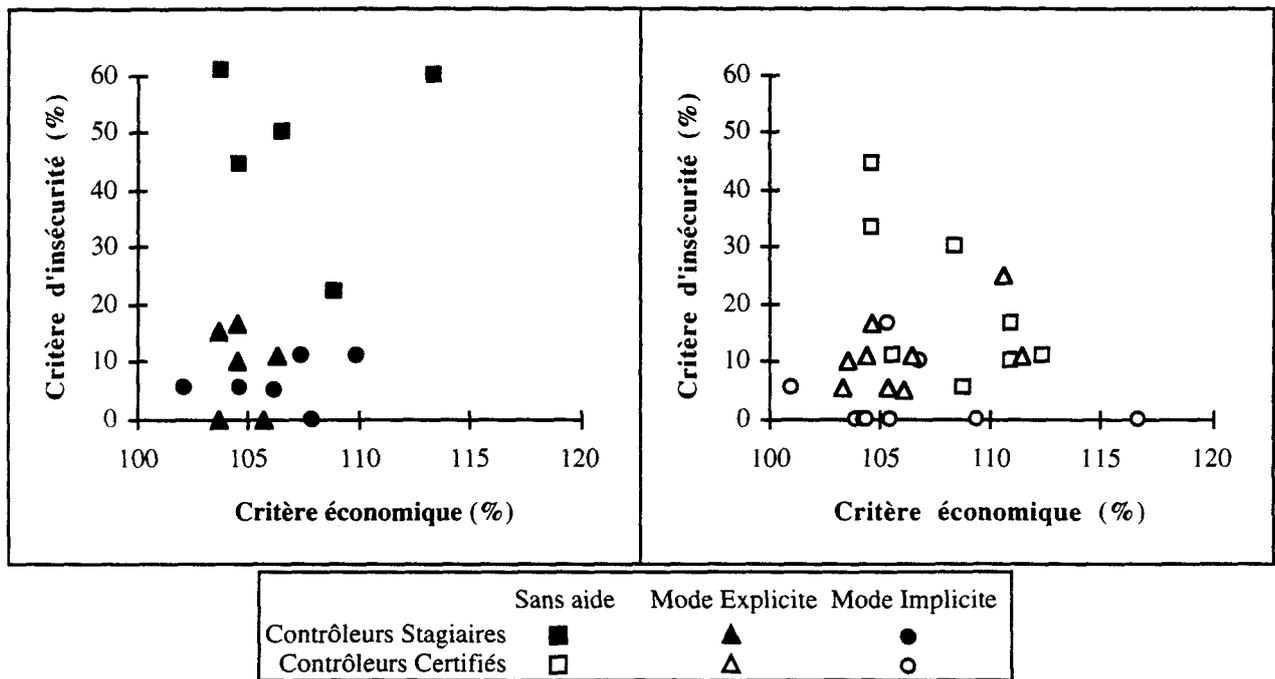


Figure III-13 : Critère de performance globale.

Il est intéressant de noter que les expérimentations qui se sont déroulées sans alarme, et donc avec un niveau d'insécurité nul, correspondent au mode de répartition de type implicite pour un contrôleur stagiaire et six contrôleurs certifiés, et au mode explicite pour deux contrôleurs stagiaires. De plus, cette figure permet de constater que les contrôleurs stagiaires ont réellement été débordés pour les expérimentations effectuées sans aide. Par contre, les résultats sont homogènes avec l'apport d'une coopération avec SAINTEX. Ceux correspondant au mode explicite présentent un nuage de points proches les uns des autres, c'est-à-dire que globalement le mode explicite permet d'obtenir une performance globale homogène. Quant au mode

implicite, il est plus efficace dans un certain sens puisque c'est le mode de répartition qui permet d'obtenir le meilleur niveau de sécurité.

Ces résultats plutôt homogènes s'expliquent peut-être par le niveau avec lequel les compétences de SAINTEX ont été utilisées. Nous avons traduit ce critère par le niveau de coopération contrôleur-SAINTEX. Nous étudions maintenant l'effet de ce niveau de coopération dans chaque mode de répartition.

### 2.3.2. Influence du niveau de coopération sur la performance globale

Nous avons défini un niveau de coopération qui est le rapport du nombre de conflits affectés à SAINTEX sur le nombre de conflits total. Ce calcul nous permet d'étudier l'influence de la coopération homme-machine sur les critères de performance, figure III-14.

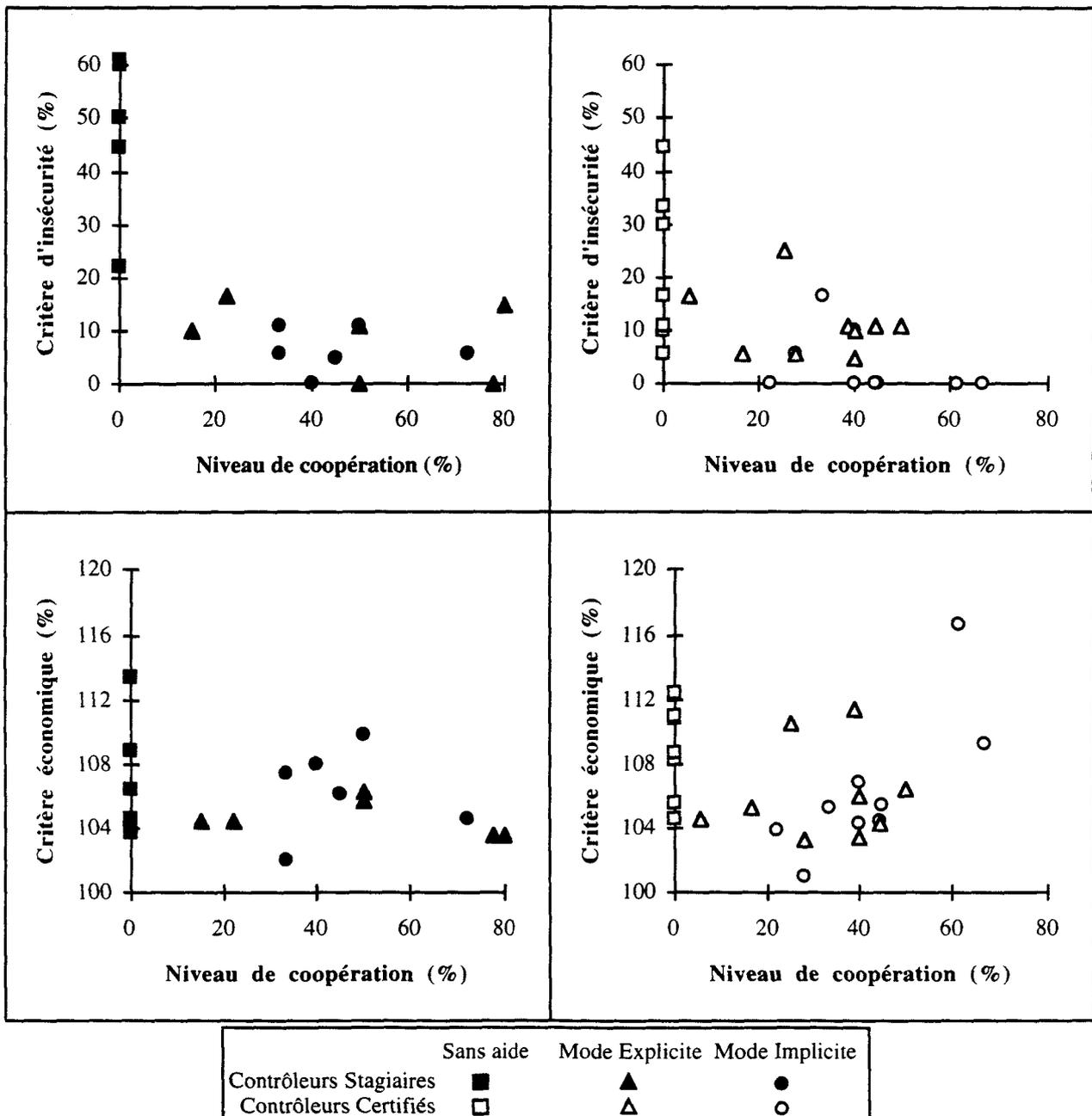


Figure III-14 : Influence du niveau de coopération sur la performance globale.

Dans un premier temps, la diversité des résultats est liée aux différences de comportement des contrôleurs. L'apport d'une coopération ne pénalise en aucun cas le critère économique basé sur la consommation de carburant. Ceci s'explique par le fait que SAINTEX résout les conflits au plus tard avec un grand angle de déviation, contrairement aux contrôleurs qui les résolvent immédiatement (de manière à s'en décharger au plus vite) avec un plus petit angle. Par contre, il est évident que l'intégration d'une coopération de type explicite ou implicite dans le contrôle aérien, permet d'obtenir un niveau de sécurité plus appréciable.

En mode explicite, chaque contrôleur doit évaluer sa propre performance et sa propre charge de travail. En fonction de cette évaluation, il répartit les tâches partageables à sa guise. Globalement, dans ce mode, les résultats, tant au niveau économique qu'au niveau sécurité sont meilleurs pour les contrôleurs stagiaires que pour les contrôleurs certifiés. Les premiers ont confié en moyenne 49 % des conflits à SAINTEX, alors que les seconds ne lui en ont alloué que 30 %. Il faut ajouter également que seulement deux expérimentations en mode explicite n'ont engendré aucune alarme. Celles-ci ont été réalisées avec deux contrôleurs stagiaires dont les niveaux de coopération sont de 50 % et 80 %. Néanmoins, il faut noter que la capacité des contrôleurs stagiaires à gérer plusieurs conflits à la fois est plus limitée que celle des contrôleurs certifiés qui sont souvent moins satisfaits des solutions proposées par SAINTEX. De ce fait, les contrôleurs stagiaires se sont plus facilement adaptés au système et ont réussi à se décharger sur SAINTEX afin d'optimiser leur performance.

En mode implicite, la capacité des contrôleurs est déterminée automatiquement. Cette évaluation est identique pour tous les contrôleurs puisqu'elle dépend d'un même seuil d'exigence maximum à partir duquel ils sont considérés comme surchargés. Par conséquent, pour l'ensemble des expérimentations, plus de 40 % des conflits ont été donnés à SAINTEX. Cette politique d'allocation a permis à la plupart des contrôleurs certifiés de ne générer aucune alarme (6 expérimentations sur 9). Elle les a forcés à prendre en charge moins de conflits et leur a permis de les résoudre plus finement et de mieux les surveiller. Par contre, elle a été moins efficace pour les contrôleurs stagiaires parce qu'il ont eu, en moyenne, plus de conflit à gérer en mode implicite qu'en mode explicite. Enfin, il reste à noter que malgré cette répartition automatique des tâches partageables, le niveau de coopération n'est pas similaire pour tous les contrôleurs. Ceci est dû en fait aux différences de comportement de ces derniers face aux situations de contrôle engendrées par les scénarios.

En conséquence, on peut résumer ces résultats en remarquant que le niveau de coopération homme-SAINTEX accroît la performance globale du trafic. Même si les exigences de tâches ont été irrégulières au cours des expérimentations, leur moyenne permet d'effectuer un dernier point d'analyse des critères de performance.

### **2.3.3. Liaison entre exigences de tâches et performance globale**

La figure III-15 présente l'influence des moyennes des exigences de tâche par rapport au critère d'insécurité et au critère économique. Deux zones distinctes peuvent être mises en évidence : une pour les expérimentations effectuées sans aucune aide et une pour les autres. Dans la première, plus les exigences sont élevées, plus l'insécurité et/ou la consommation sont importantes. Dans la seconde, correspondant aux expérimentations réalisées en mode explicite et implicite, on retrouve un nuage de points comparable à celui de la figure III-13.

Néanmoins, il faut signaler que pour le mode explicite, deux contrôleurs certifiés et un contrôleur stagiaire ont eu des exigences de tâches plus importantes que les autres car ils ont affecté très peu de conflit à SAINTEX (respectivement 25 %, 5 % et 15 % des conflits). Cette relation entre les exigences de tâches et la performance globale existe aussi bien pour les contrôleurs stagiaires que pour les contrôleurs certifiés. Même si les premiers ont été beaucoup plus débordés lors des expérimentations sans aide, ils présentent des résultats similaires aux seconds pour les autres expérimentations.

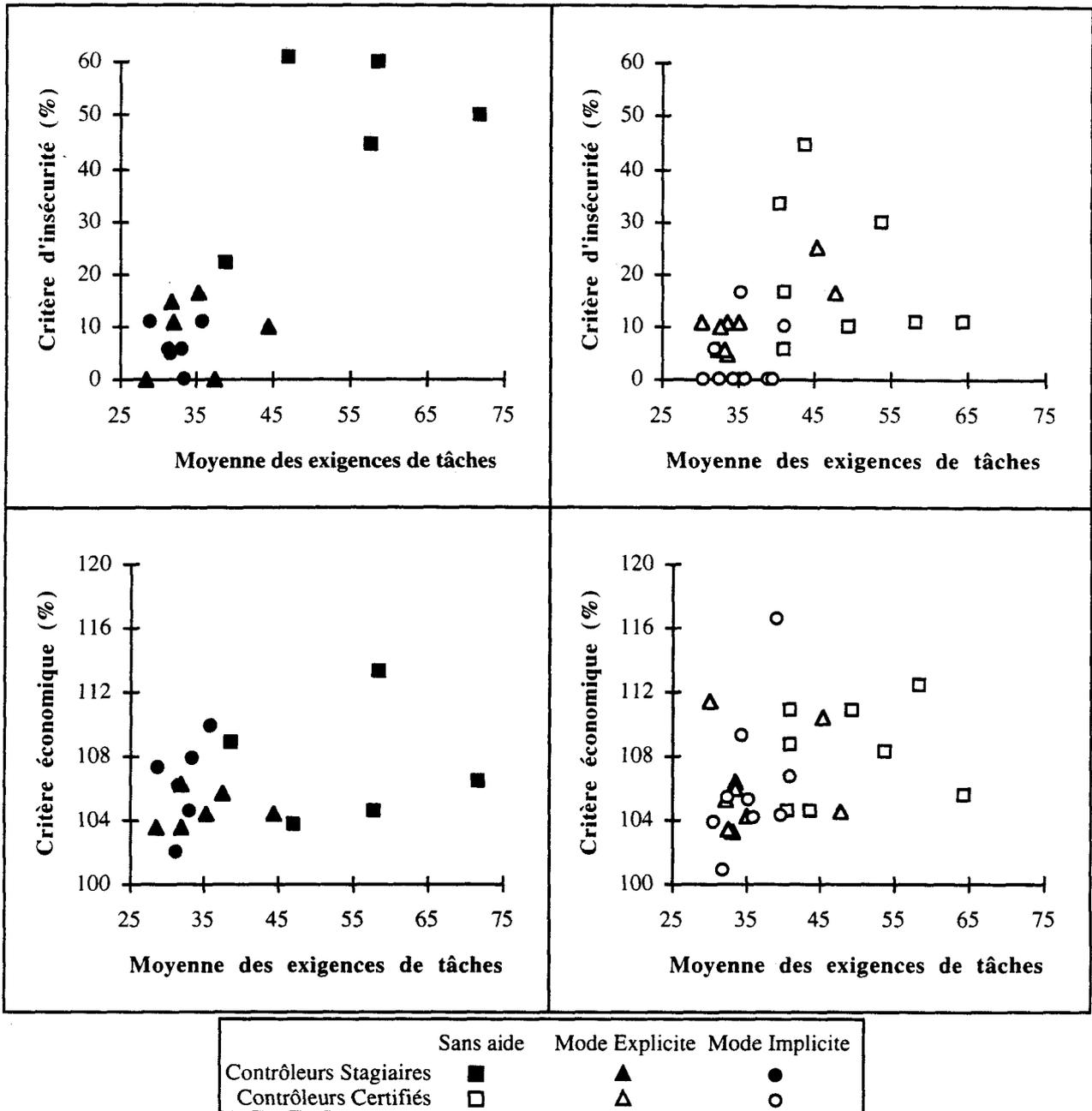


Figure III-15 : Liaison entre exigences de tâches et performance globale.

Par rapport à la performance globale, les exigences de tâches générées lors des expérimentations en mode explicite sont similaires à celles générées lors des expérimentations en mode implicite. Or, pour les premières, la répartition des tâches partageables est effectuée par les contrôleurs en fonction de leur propre évaluation de charge de travail et de performance, alors que pour les seconds, elle est automatique. Ainsi, pour le mode explicite, en fonction de son niveau de compétence, chaque contrôleur utilise différemment SAINTEX afin de maintenir une exigence de tâche moyenne acceptable. De même, pour le mode implicite, en fonction du comportement de chaque contrôleur, le système répartit les tâches partageables de manière différente, malgré un seuil d'exigence maximum identique, mais en maintenant une exigence de tâche moyenne comparable à celles des autres expérimentations réalisées avec les deux modes de répartition.

## Conclusion

L'étude présentée ici s'inspire des idées du chapitre précédent. En effet, il s'agit de mettre en œuvre une coopération multiniveau biposte dans laquelle le contrôleur organique gèrerait en amont la répartition des tâches tactiques, et le contrôleur radar effectuerait en aval une mise à jour éventuelle qui modifierait l'allocation initiale. Cependant, du fait de la complexité du domaine, nous avons mené, dans un premier temps, à une étude de faisabilité d'une répartition dynamique des tâches monoposte, à partir d'une plate-forme expérimentale SPECTRA qui intègre deux décideurs : le contrôleur radar et un système expert SAINTEX.

Celle-ci nous a permis de réaliser d'une part un protocole expérimental, détaillé dans la première partie. Avec la participation de neuf contrôleurs qualifiés et de six ingénieurs de la navigation aérienne, des expérimentations ont été effectuées et les résultats présentés dans la seconde partie sont intéressants. Cette étude apporte certains éléments de réponse satisfaisants.

En effet, ces derniers montrent l'utilité d'un outil d'aide comme SPECTRA pour le contrôle d'un trafic dense, surtout en mode implicite qui est l'aide la plus efficace. Ils valident de plus notre estimateur d'exigences de tâches qui reflète assez fidèlement la charge de travail du contrôleur. Sans aucune assistance, les contrôleurs stagiaires sont débordés et le contrôle est difficile. Par contre, ils contrôlent assez bien le trafic dès l'intégration d'une aide de type explicite ou implicite. Pour l'ensemble des contrôleurs, les modes explicite et implicite permettent d'obtenir une performance globale meilleure que sans aide et de réguler les exigences de tâche. Pour un même niveau de difficulté, les contrôleurs certifiés ont généré beaucoup moins d'alarmes avec le mode implicite durant lequel ils avaient plus de temps pour superviser l'ensemble du trafic et pour affiner la résolution des conflits. Cependant, ils préfèrent plutôt le mode explicite car même s'il génère une charge de travail supplémentaire due à l'allocation de tâches partageables, il est moins frustrant que le mode implicite qui ne permet pas la reprise de conflits affectés à SAINTEX et qui entraîne une surveillance importante de ceux-ci. Par conséquent, il apparaît que les contrôleurs certifiés ne font pas totalement confiance à SAINTEX. Quand aux contrôleurs stagiaires, c'est le contraire. Avec le mode explicite, leur performance est globalement meilleure car ils affectent plus de conflits à SAINTEX de manière à assurer au mieux la sécurité du trafic. Néanmoins, ils préfèrent le mode implicite qui génère une charge de travail moindre puisqu'ils n'ont pas à se soucier de la répartition des tâches partageables.

Ces résultats sont encourageants et montrent qu'une coopération horizontale ne perturbe en aucun cas l'activité des contrôleurs. Toutefois, durant les expérimentations, le contrôleur radar a effectué, à la fois les tâches tactiques et stratégiques du contrôle du trafic aérien. De plus, la politique de répartition en mode implicite, même si elle est efficace, est insuffisante. En effet, elle est parfois biaisée par l'apparition non prévue des tâches non partageables qui surchargent le contrôleur. Par conséquent, les fonctions du contrôleur organique doivent être intégrées dans SPECTRA. Il s'agit de réaliser une coopération multiniveau, basée sur les principes de régulation par anticipation, évoquée dans le premier chapitre, à partir d'un ordonnanceur dynamique.

---

## CHAPITRE IV- ORDONNANCEUR POUR L'AIDE AU PARTAGE DYNAMIQUE DES TACHES TACTIQUES

---

### Introduction

Pour le mode implicite implanté dans SPECTRA, la régulation de l'activité humaine par le partage dynamique des tâches tactiques s'est effectué sur la plan intensif, à partir des exigences fonctionnelles des tâches. Il s'agit maintenant d'établir un autre mécanisme de répartition des tâches, basé sur une régulation par anticipation. Ainsi, ce chapitre établit les caractéristiques générales d'une mise en œuvre d'une répartition dynamique de tâches prescrites, basée sur un ordonnanceur implanté au niveau stratégique. Même si les phases décisionnelles de celui-ci s'appuient sur des données prévisionnelles, elles doivent également prendre en compte les événements inattendus du niveau tactique, afin éventuellement d'être remises à jour. A partir des différents mécanismes humains pour l'ordonnement des tâches, les objectifs de cet ordonnanceur, qualifié de dynamique, peuvent être définis. De cette analyse résulte alors un module d'affectation qui permet d'optimiser le partage des tâches entre le processeur principal humain et un coprocesseur d'assistance. Il dépend d'un module de génération de plan qui analyse les situations inadmissibles pour l'opérateur humain, induites par l'ensemble des tâches que celui-ci devra effectuer. Ces différents points sont détaillés dans ce chapitre.

La première partie se focalise sur les caractéristiques des "ordonneurs humains". Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, l'opérateur humain est capable de réguler sa propre activité à partir de ses résultats connus ou prévus. Ces mécanismes d'autorégulation par rétroaction et/ou par anticipation lui permettent de réaliser les différentes actions émanant d'un ordonnancement préalable de tâches. Cependant, à partir d'un certain seuil, en fonction des interactions et des contraintes de ces dernières, l'opérateur humain est saturé. Cette situation risque d'altérer la sécurité du système.

C'est pourquoi, nous assimilons notre étude à un "problème d'ordonnement à une machine" pour une aide à la régulation de l'activité humaine, par anticipation, et toujours sur le plan intensif. De plus, la politique de répartition des tâches correspond à une stratégie de saturation. En effet, à partir d'un modèle simplifié des tâches, il s'agit pour le niveau stratégique de déceler les éventuelles futures situations du niveau tactique qui correspondent à un risque de saturation. La deuxième partie établit donc les caractéristiques essentielles d'un ordonnanceur dynamique. Ce dernier doit d'une part déterminer les enchaînements de tâches non admissibles pour l'opérateur, et d'autre part, les éliminer en déchargeant l'opérateur humain de une ou plusieurs tâches afin de les rendre admissibles.

Toutefois, l'explosion combinatoire qui affecte les algorithmes de base nécessite l'utilisation de méthodes particulières. En effet, les problèmes d'ordonnement et d'affectation entre processeur humain et coprocesseur artificiel sont NP-complets. Ils peuvent être simplifiés en optimisant les algorithmes par l'utilisation des principes de la programmation dynamique et quelques heuristiques. C'est le propos de la dernière partie de ce chapitre.

## 1. Caractéristiques humaines pour l'ordonnancement des tâches

Relativement aux objectifs tactiques et stratégiques de travail, il est possible de représenter les différents niveaux décisionnels de l'opérateur humain. Ces derniers sont gérés par les mécanismes humains d'appréhension du temps pour l'ordonnancement des tâches, qui sont présentés dans ce paragraphe.

### 1.1. Objectifs temporels du travail humain

L'opérateur humain est doté d'une capacité d'anticipation. La prise de décision humaine s'effectue à partir de filtrages successifs, /Rouhet, 88/. Ces derniers déterminent des choix stratégiques et tactiques qui aident à maintenir un niveau optimal de sécurité pour des horizons temporels différents, figure IV-1.

En amont de la commande effective, les niveaux stratégiques et tactiques nécessitent une capacité minimale d'anticipation. Celle-ci permet de réaliser un ordonnancement avec éventuellement un suivi permanent pour la mise à jour des paramètres principaux après un retour d'informations. Elle doit donc prendre en compte les phénomènes d'incertitude, d'incomplétude et d'imprécision des données.

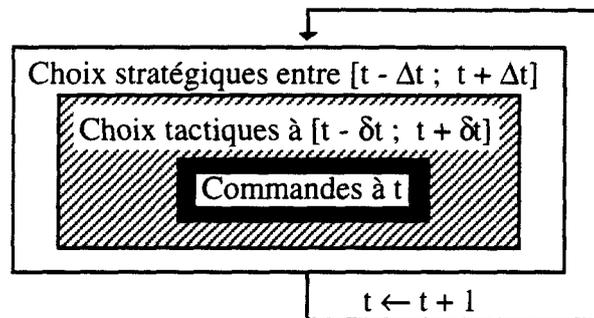


Figure IV-1 : Horizons temporels de décision à l'instant  $t$  ( $\Delta t > \delta t$ ), adaptés de /Rouhet, 88/.

Les horizons temporels  $\Delta t$  et  $\delta t$  varient selon la dynamique du processus. Pour des processus lents de type thermique par exemple,  $\Delta t$  peut être de l'ordre de plusieurs heures et  $\delta t$  d'environ une demi-heure. Pour des processus rapides comme le trafic aérien au sein d'une position de contrôle,  $\Delta t$  est de l'ordre d'une demi-heure et  $\delta t$  de quelques minutes. Toutefois, ces horizons temporels varient également en fonction de la charge de travail humaine. En effet, par exemple, lorsque celle-ci devient considérable, l'anticipation de l'évolution du système est de plus en plus difficile à réaliser. Ainsi, quand l'opérateur humain ne peut plus satisfaire les exigences des tâches car celles-ci sont trop importantes, les choix stratégiques, puis les choix tactiques sont délaissés progressivement. Or, l'abandon de ces paramètres de sécurité peut devenir catastrophique, surtout quand il s'agit de tâches hautement cognitives pour lesquelles le processus de raisonnement humain est long et les contraintes temporelles sont sévères.

C'est pourquoi, afin de contrecarrer ce risque, dans le cadre d'une coopération homme-machine multiniveau, l'outil d'aide au niveau stratégique que nous proposons de mettre en œuvre doit d'une part assister cette anticipation, et d'autre part proposer des solutions optimales pour la répartition des tâches tactiques de contrôle et de supervision. A ce propos, afin de justifier l'emploi d'un ordonnanceur dynamique, il convient de comprendre les modes de représentation du temps par l'opérateur humain.

### 1.2. La modélisation du temps chez l'opérateur humain

Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, dans la commande d'un système complexe, la maîtrise de la dynamique de celui-ci, est importante aussi bien au niveau individuel

que collectif. Mais ce degré de maîtrise du temps, qualifié d'expérience temporelle par Decortis /88/, varie en fonction des opérateurs humains. En effet, par exemple, dans l'activité d'ordonnancement de séquences, Bouju et Spérandio /78/ ont mis en évidence des modes opératoires selon le niveau de qualification des opérateurs, relatifs à cette expérience temporelle. D'une part, les opérateurs qualifiés utilisent selon leur charge de travail, des modes opératoires plus ou moins "économiques", et n'hésitent pas à restructurer leur ordonnancement initial suite à l'arrivée d'une nouvelle donnée perturbatrice. D'autre part, les opérateurs débutants ont des modes opératoires plus rigides qu'ils modifient très rarement malgré l'arrivée de nouvelles données.

Toutefois, en règle générale, plusieurs mécanismes standards d'appréhension du temps peuvent être déterminés, /De Keyser, 90/ :

- Le premier est l'intériorisation des objets survenant avec régularité, c'est-à-dire l'appréhension des fréquences d'apparition et l'estimation des durées des événements qui se produisent de façon régulière.
- Le second raisonnement est le mode physique ou causal qui concerne les estimations temporelles réalisées grâce aux relations de causalité, comme la vitesse ou la distance, que l'opérateur humain peut estimer à partir du contenu des événements.
- Le troisième mécanisme est le mode logique qui met en rapport des intervalles de temps, indépendamment du contenu de ces derniers.
- Enfin, le mode de l'horloge renseigne l'opérateur sur les butées temporelles strictes dans lesquels les événements doivent être inclus.

Par conséquent, l'opérateur humain se doit de raisonner "sur le temps" à partir des relations événementielles, "avec le temps" parce que le temps est une variable décisionnelle et "dans le temps" pour évaluer les évolutions du système en prenant en compte de nouvelles informations, les contraintes temporelles et même la durée du raisonnement, /Tang, 88/.

Le raisonnement temporel humain peut alors se baser sur deux approches complémentaires, utilisées par ailleurs en logique temporelle. La première utilise l'instant ponctuel comme unité temporelle de base pour le raisonnement, /McDermott, 82/. Dans la seconde, le raisonnement est effectué à partir d'intervalles temporels, /Allen, 83/, figure IV-2.

Relations temporelles entre A et B	Evolution du temps
A précède B	
A et B sont identiques	
A se juxtapose à B	
A chevauche B	
A contient B	
A commence par B	
A termine par B	

Tableau IV-2: Relations temporelles entre événements, inspirées de /Allen, 83/.

Plusieurs études s'accordent sur le fait que la gestion temporelle humaine est effectuée à partir de l'ensemble des interactions entre les événements, /Decortis et al, 91; Hollnagel, 91/. Des primitives telles que celles de la figure IV-2 sont alors mises en jeu pour déterminer un ordonnancement des tâches humaines dans le temps, sachant que les bornes de celles-ci peuvent être fixes, variables ou floues.

Cette maîtrise temporelle permet la génération de plans. Dans la littérature, celle-ci peut aussi être qualifiée de planification des actions ou d'ordonnancement des tâches. L'organisation de l'exécution des tâches est donc maintenant abordée.

### **1.3. Les mécanismes humains pour l'ordonnancement des tâches**

L'homme doit être capable de planifier ses activités et celles des autres, et de maîtriser la dimension spatio-temporelle pour atteindre les objectifs du système. Pour Boudes /92/, l'anticipation aide à effectuer les tâches de résolution de problème ou celles de supervision. En effet, elle permet, d'une part de détecter les problèmes avant qu'ils arrivent, et d'autre part, de prédire les conséquences des actions sur l'évolution du système. Les connaissances ainsi produites influencent la prise de décision, les choix des actions et la planification de celles-ci.

Pour /Hoc, 90/ et /Jacob et Hoc, 89/, l'activité de planification intègre l'élaboration dynamique de plans et nécessite l'emploi des capacités d'anticipation. Les auteurs définissent un plan comme une représentation schématique qui peut être organisée hiérarchiquement et qui permet d'orienter l'activité de l'opérateur humain. Dans cette optique, deux types d'anticipations sont distinguées dans la résolution de problème : d'une part, l'anticipation de conception comprenant les choix de la représentation schématique, et d'autre part l'anticipation de l'exécution, c'est à dire la simulation des activités correspondant à l'exécution du plan. A partir de ces notions, Hoc propose deux approches pour l'activité de planification :

- une approche ascendante allant des détails vers les plans abstraits, et
- une approche descendante allant de ces plans vers leurs exécutions avec la possibilité d'élaborer un nouveau plan.

Le Modèle de l'Ordonnanceur Humain, inspiré de Rasmussen /80/ suit cette démarche. Il permet de plus d'expliquer les mécanismes de l'ordonnancement, /Sanderson et Moray, 90; Sanderson, 91/, figure IV-3.

Ce modèle peut intégrer la dimension temporelle et ses modules de base sont des procédures qui :

- reconnaissent l'état du système en fonction des objectifs courants (Reconnaissance ou Analyse des connaissances),
- formulent une décision pour une future action éventuelle (Décision ou Analyse des connaissances et des règles),
- exécutent l'(es) action(s) pour faire évoluer le système le plus près possible des objectifs initiaux (Action ou Planification des connaissances).

Ces premières approches proposent une démarche hiérarchique pour la détermination d'un ordonnancement quelconque. Une seconde approche, dite opportuniste, considère le chemin de raisonnement humain comme étant non monotone, /Hayes-Roth et al, 79; Tang, 88/. En effet, l'opérateur humain peut prendre en compte simultanément plusieurs objectifs et les ordonner selon les priorités qu'il donne aux critères d'opportunités du moment. De plus, sa résolution de problème peut s'effectuer selon différents niveaux d'abstraction et est multidirectionnelle, c'est-à-dire qu'un plan d'actions n'est établi ni de bas en haut, ni de haut en bas. Enfin, elle est non monotone car toute partie du plan est modifiable en fonction des opportunités qui se présentent.

Dans l'une et l'autre démarche, les mécanismes d'ordonnancement des tâches dans le temps permettent d'évaluer une situation quelconque. Progressivement, lorsque sa charge de travail augmente, l'opérateur humain se doit de réduire les horizons temporels d'anticipation et/ou d'utiliser des modes opératoires plus économiques. Cependant, à partir d'un certain seuil maximum, les contraintes de sécurité du système piloté ne peuvent plus être maintenues. L'assistance fournie par un ordonnanceur dynamique devrait donc permettre de réguler l'activité humaine et d'éviter toute surcharge de travail. Par conséquent, cette assistance doit intégrer à la fois un générateur de plan afin de déterminer les situations critiques pour l'opérateur humain et un répartiteur de tâches pour les résorber.

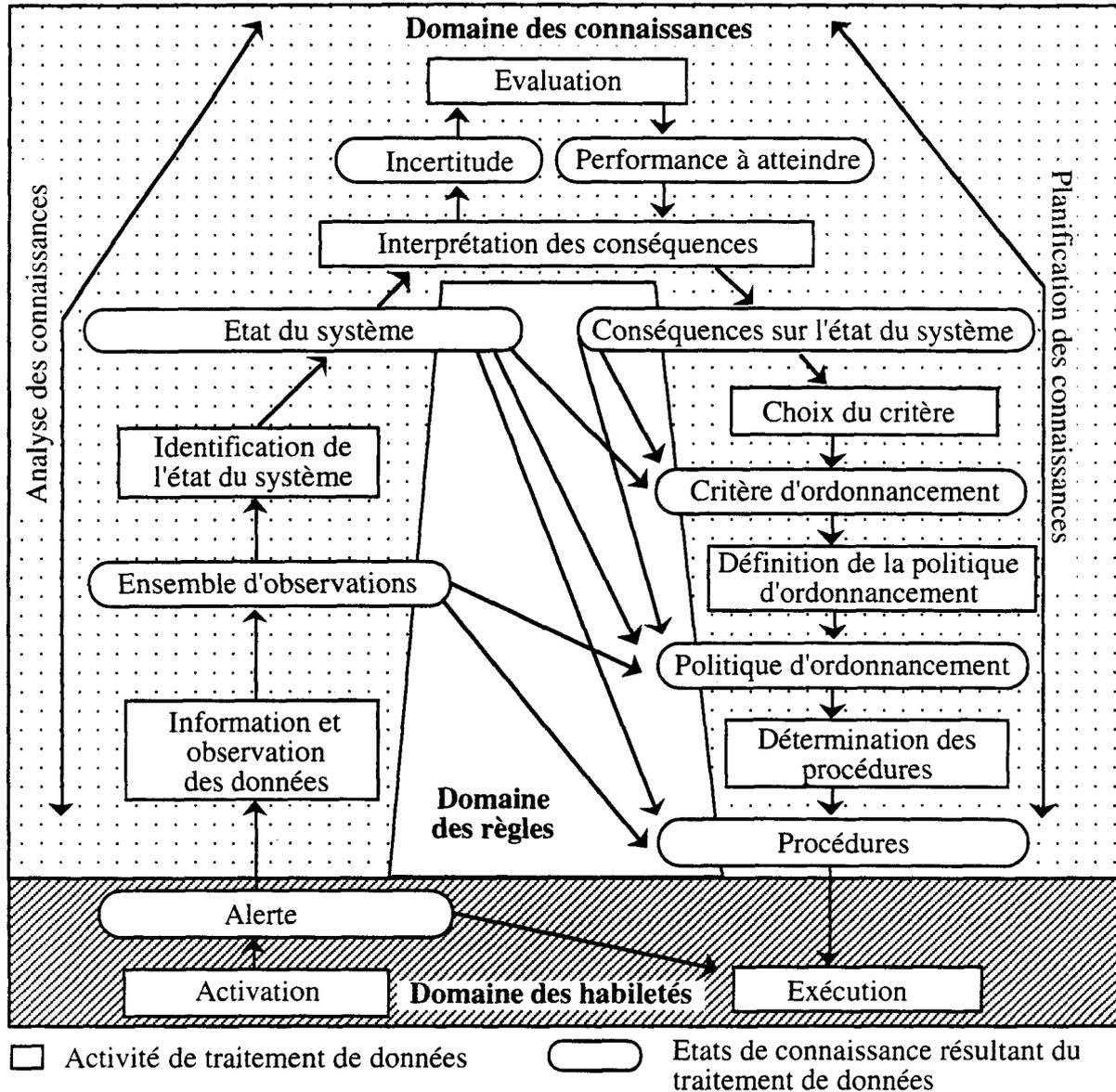


Figure IV-3: Modèle de l'ordonnanceur humain, adapté de /Sanderson, 91/.

Notre étude s'oriente donc vers une aide à la régulation par anticipation, en utilisant un modèle des tâches humaines et une politique d'affectation particulière pour le partage effectif des tâches entre l'opérateur humain et un outil d'aide de type agent.

## 2. Répartition des tâches basée sur un ordonnanceur dynamique

Ordonnancer consiste à organiser dans le temps un ensemble de tâches soumises à des contraintes temporelles et des contraintes liées aux ressources humaines et/ou techniques, en respectant un ou plusieurs objectifs prédéfinis, /Carlier et Chrétienne, 88; GOTHA, 93/. La première partie de ce paragraphe fait le point sur les différentes notions généralement employées pour élaborer les caractéristiques d'un ordonnanceur. Elle nous permet d'établir ensuite les bases de solutions à notre problème.

### 2.1. Paramètres principaux d'un ordonnanceur

Les ordonnanceurs sont des coordonnateurs particuliers. Ils s'appliquent à différents domaines, comme la conduite des systèmes de production ou le pilotage des systèmes informatiques. Nous présentons successivement leurs différents niveaux décisionnels, les divers types de priorité, puis de contraintes.

#### 2.1.1. Niveaux décisionnels d'un ordonnanceur

Deux notions principales régissent les décisions d'un ordonnanceur. Il s'agit d'une part des ressources, et d'autre part des tâches. Une ressource est un moyen technique ou humain, ayant une disponibilité limitée ou non, mais connue a priori. Une tâche est un travail élémentaire qui nécessite, pour sa réalisation, un certain nombre de ressources, utilisées pendant un certain temps. Ces paramètres étant connus, en règle générale, les ordonnanceurs doivent posséder un minimum de fonctionnalités, /Erschler et Roubellat, 87; Esquirol, 87; Carlier et Chrétienne, 88; Alabau et Dechaize, 92; GOTHA, 93/ :

- Un **mode de décision** comprend non seulement les **décisions d'ordonnancement**, relatifs à la gestion temporelle, mais aussi les **décisions d'affectation** relatives à la gestion spatiale. Les premières concernent la classification dans le temps des différentes tâches à exécuter. Par contre, les secondes portent sur le choix des ressources à attribuer à chaque tâche pour l'exécution de celle-ci.
- Une **fonction de priorité** détermine pour chaque tâche une priorité d'exécution.
- Une **règle d'arbitrage** établit un choix lorsque plusieurs tâches de même priorité demandent la même ressource.

Les modes décisionnels d'un ordonnanceur peuvent déterminer des niveaux de flexibilité différents. En effet, les problèmes d'ordonnancement peuvent être considérés selon deux niveaux complémentaires de **flexibilité temporelle**. Le premier est **statique**. Il concerne la génération d'un plan ou d'un ordonnancement à partir de données prévisionnelles. Par contre, le second est **dynamique** et correspond au pilotage temps réel. Il détermine effectivement la prise de décision en temps réel, prenant en compte les différents aléas qui se manifestent au cours du temps. De même, la **flexibilité spatiale** permet de faire évoluer les décisions d'affectation des tâches aux ressources, d'un **ordonnancement de haut niveau** pour une **affectation prévisionnelle** vers un **ordonnancement de bas niveau** pour une **affectation effective**.

Le problème général de l'ordonnancement consiste à placer  $n$  tâches sur  $m$  ressources. Sa mise en œuvre algorithmique est un problème complexe, de type NP-complet. En effet, la complexité varie exponentiellement avec la taille des données, c'est-à-dire le nombre de tâches, de ressources. Elle s'exprime à la fois en terme de complexité spatiale correspondant à l'encombrement mémoire lors du traitement informatique, et en terme de complexité temporelle liée au nombre d'opérations effectuées par l'algorithme utilisé.

Relativement aux niveaux décisionnels d'un ordonnanceur, deux solutions sont alors envisageables, /Carlier, 88/ :

- Si la solution désirée doit être optimale, il faut utiliser des algorithmes exacts ou énumératifs basés par exemple sur des méthodes arborescentes, ou de programmation dynamique.
- Si une solution quasi-optimale est acceptable, des algorithmes approchés ou des heuristiques sont suffisants.

Parmi ces heuristiques qui régissent les décisions effectives, plusieurs règles de priorité peuvent être prises en compte. Quelques-unes d'entre elles sont à présent énumérées.

### 2.1.2. Règles de priorité dans un ordonnanceur

L'ensemble des priorités peut être classé en trois groupes distincts : un groupe de priorités statiques, un groupe de priorités dynamiques, et un groupe de priorités combinées, /Artiba, 89/. Nous les retrouvons d'ailleurs dans les politiques d'ordonnement humain, /Sanderson, 90/.

Les règles statiques sont évaluées définitivement et, par définition, ne prennent pas en compte l'évolution temporelle. Elles comportent par exemple les règles relatives à la durée d'exécution des tâches ou à la date au plus tard, c'est-à-dire la date au-delà de laquelle il est trop tard pour exécuter une tâche. Les plus connues sont les règles SPT (Shortest Processing Time) et LPT (Largest Processing Time) qui donnent respectivement la priorité à la tâche qui a la durée d'exécution la plus faible ou la plus importante. Par contre, la règle EDD (Earliest Due Date) donne la priorité à la tâche ayant la date au plus tard la plus proche du temps courant.

Les règles dynamiques intègrent, quant à elles, directement ou indirectement dans leur calcul, les paramètres temporels des tâches et des ressources. A ce niveau, les règles utilisées le plus fréquemment dans la politique d'ordonnement sont les règles FIFO (First In First Out) ou LIFO (Last In First Out). Ces deux règles donnent respectivement la priorité à la tâche arrivée la première ou arrivée la dernière.

Les règles combinées sont un agencement particulier des règles précédentes. A titre d'exemple, la règle combinée FIFO( $t_{max}$ )/SPT utilise la règle FIFO pour les tâches ayant attendu plus d'un certain temps prédéfini  $t_{max}$ , sinon, elle emploie la règle SPT. Le principe est de même nature pour la règle combinée LIFO( $t_{max}$ )/SPT. Par contre, pour la règle combinée LPT( $nb_{max}$ )/SPT, la règle LPT est déclenchée si le nombre de tâches en attente est inférieur à  $nb_{max}$ , sinon c'est la règle SPT qui est activée.

Les principales priorités que nous venons de présenter permettent d'orienter le placement des tâches dans une ressource, ainsi que l'affectation d'une tâche à telle ou telle ressource. Cependant, ces niveaux décisionnels d'un ordonnanceur dépendent également des différentes contraintes à respecter.

### 2.1.3. Contraintes et évaluation des ordonnanceurs

Une solution du problème d'ordonnement est dite **admissible** lorsqu'elle satisfait l'ensemble des contraintes des tâches et des ressources, /Esquirol, 87; Erschler et Roubellat, 87; GOTHA, 93/.

Relativement aux ressources, deux classes sont généralement distinguées. La première concerne les **ressources consommables** dont l'utilisation globale est limitée au cours du temps. La seconde intègre les **ressources renouvelables** dont l'utilisation est limitée dans le temps mais qui restent disponibles indéfiniment.

De même, les contraintes auxquelles sont soumises les tâches peuvent être de divers types. Par exemple, chaque tâche peut être soumise à des contraintes de type **potentiel**, c'est-à-dire que son exécution est liée à celle des autres par des règles relationnelles spécifiques. Il s'agit d'une part

de relations d'antériorité (la tâche  $i$  ne peut pas commencer avant que la tâche  $j$  soit terminée), et d'autre part de contraintes de localisation temporelle (la tâche  $i$  ne doit pas commencer avant telle date, ou doit être achevée à telle date).

Par ailleurs, des tâches peuvent être en conflit pour l'utilisation d'une ressource. Pour résoudre l'ensemble des conflits liés à l'utilisation d'une ressource renouvelable  $R$ , disponible en quantité  $Q$ , par un ensemble  $I$  de  $n$  tâches, utilisant  $R$  en quantité  $q_i$  ( $\forall i \in I$ ), il suffit de ne résoudre que les ensembles conflictuels minimaux, appelés **ensembles critiques de tâches**, /Esquirol, 87/. Ces derniers sont définis par la contrainte de limitation du cumul des ressources :

$$I \text{ est un ensemble critique de tâches} \Leftrightarrow \forall I' \subset I, \sum_{i \in I'} q_i > Q.$$

Quand l'ensemble critique est constitué de deux éléments, il s'agit d'un problème disjonctif. L'ensemble  $(i, j)$  des tâches correspondantes est appelé "paire de disjonctions" qui est soumise à des contraintes de type **disjonctif**. Celles-ci imposent la disjonction de deux intervalles de temps. C'est le cas par exemple, lorsque deux tâches distinctes ne peuvent pas être exécutées en même temps, car elles utilisent la même ressource. Dans le cas général, en présence d'ensembles critiques d'ordre supérieur à deux et si tous les conflits doivent être résolus, il s'agit d'un problème cumulatif. Ce dernier est alors soumis à des contraintes de type **cumulatif** qui caractérisent l'exécution simultanée des tâches sur une ou plusieurs ressources.

De plus, un problème est qualifié de **préemptif** lorsqu'il est possible d'interrompre l'exécution d'une tâche par une autre tâche. Les tâches peuvent alors être exécutées par morceaux. Dans le cas contraire où l'exécution des tâches n'est pas morcelable, il s'agit d'un problème **non préemptif**. Il convient de noter que nous retrouvons ici le vocabulaire utilisé dans le chapitre II pour définir les caractéristiques des modes de répartition dynamique des tâches entre Homme et Machine.

Les tâches soumises à des contraintes temporelles strictes doivent être ordonnancées de manière à utiliser efficacement les ressources pour éviter les surcharges, à exécuter l'ensemble des tâches suivant un délai prédéfini, et à respecter un plus grand nombre de contraintes, /Abdennadher, 91/. En fait, ces facteurs sont souvent exprimés sous forme d'une fonction économique basée sur un ou plusieurs critères qu'il faut optimiser. Il s'agit par exemple :

- d'optimiser la durée totale d'exécution pour une utilisation efficace des ressources,
- de respecter les délais pour minimiser le plus grand retard, la somme des retards, ou le nombre de tâches en retard,
- ou encore de limiter le nombre d'interruptions propres à chaque tâche pour les problèmes préemptifs.

Selon les priorités utilisées dans l'ordonnanceur, les performances obtenues relatives à ces critères diffèrent plus ou moins, /Artiba, 89/.

L'ensemble des différentes caractéristiques propres aux décisions d'ordonnancement et d'affectation, intégrées dans un ordonnanceur, sont utilisées dans la suite afin de définir notre problème. Il faut noter toutefois que l'ordonnanceur que nous proposons pour le niveau stratégique de notre application, se base sur des données prévisionnelles, mais doit également prendre en compte, en temps réel, les perturbations éventuelles qui se manifestent au niveau tactique. C'est pourquoi, du fait de cette flexibilité, nous préférons désigner notre système d'aide comme un ordonnanceur dynamique.

Nous nous limitons ici à développer les caractéristiques des phases décisionnelles de cet ordonnanceur, à partir d'un ensemble de tâches prédéfinies.

## 2.2. Décision d'ordonnancement et décision d'affectation pour l'aide au partage des tâches entre opérateur humain et calculateur

C'est à partir d'un modèle des tâches humaines qu'un système d'aide à l'ordonnancement de celles-ci permet de détecter les saturations éventuelles auxquelles sera soumis l'opérateur humain. Il s'agit d'une aide à l'anticipation qui permet d'évaluer une situation quelconque, de déterminer si elle est problématique pour l'opérateur humain qui la subira, et de proposer des solutions de partage de tâches entre celui-ci et la machine, afin d'éviter ces risques de saturation. Ainsi, à partir d'une formulation simplifiée de notre problème, les différents sous-ensembles critiques de tâches et les principes de base sont établis dans la suite de ce paragraphe.

### 2.2.1. Formulation du problème

Il s'agit de modéliser les tâches de l'opérateur humain, puis de formaliser notre problème en fonction des caractéristiques de cet opérateur. Tout d'abord, nous considérons que chaque tâche exécutée possède trois paramètres temporels principaux, figure IV-4 :

- **r** (related date) est la **date au plus tôt** à partir de laquelle la tâche peut être réalisée,
- **d** (due date) est la **date au plus tard** au delà de laquelle il est trop tard pour exécuter la tâche,
- **p** (processing time) est la **durée requise** incompressible qui mobilise l'opérateur lors de l'exécution d'une tâche. Elle est incluse entre les deux contraintes temporelles **r** et **d** dont la différence **d-r** représente la **durée disponible** pour exécuter la tâche correspondante. C'est pourquoi, quelle que soit la tâche modélisée, nous avons la relation  $p \leq d - r$ . De plus, en considérant que **t** est le début de l'exécution de la tâche, la contrainte suivante doit être respectée :  $t + p \leq d$ .

En maintenant l'hypothèse du canal humain à capacité limitée qui suppose que l'opérateur humain travaille séquentiellement et par échantillonnage éventuel des exécutions de ses tâches, /Boëtcher et al, 82; Millot, 88; Wanner, 89/, nous pouvons assimiler ce dernier à une ressource renouvelable, soumise à des contraintes de type disjonctif. Par conséquent, en supposant que l'exécution de la tâche peut être réalisée par échantillonnage, aucune durée d'exécution ne doit se chevaucher ou se superposer. En effet, la situation inverse correspondrait à un effet de "saturation" ou de "bourrage" de la ressource humaine. Ainsi quelle que soit la manière dont l'opérateur humain exécute l'ensemble des tâches qu'il a à traiter, il faut lui éviter des situations de débordement.

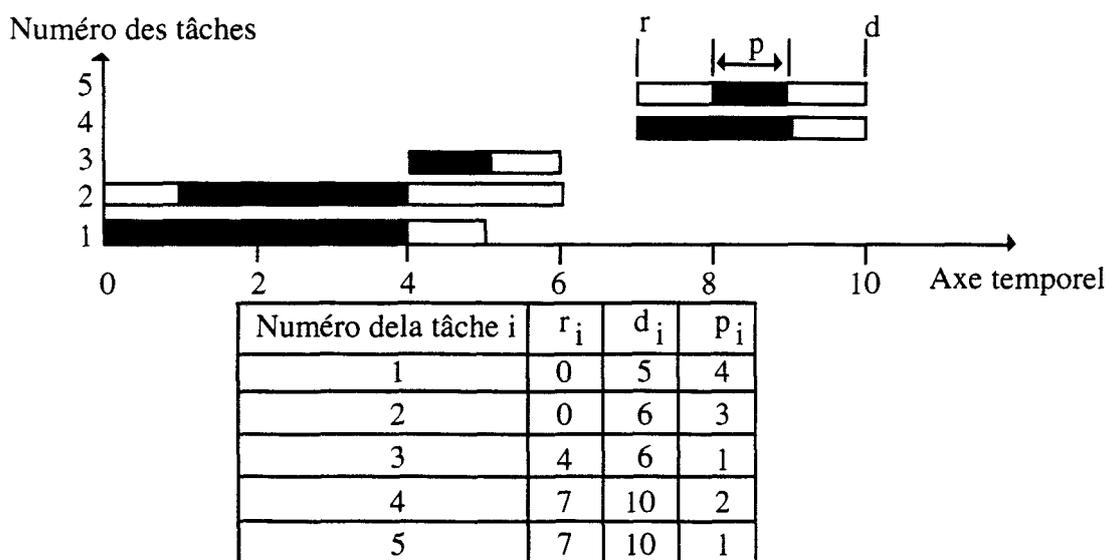


Figure IV-4 : Exemple de modélisation des tâches.

Il est important de souligner que notre objectif n'est pas de déterminer précisément l'ensemble des ordonnancements des tâches que l'opérateur aura à traiter puisque nous ne connaissons pas la date à laquelle il les exécutera et la manière dont il les exécutera. En revanche, nous partons du principe que dès que l'exécution d'une tâche se chevauche avec une autre, l'opérateur humain risque d'être en situation difficile. Par conséquent, l'outil d'aide doit seulement déterminer les sous-ensembles qui ne permettent pas une exécution séquentielle des tâches et proposer des solutions, en partageant ces sous-ensembles inadmissibles entre l'opérateur humain et la machine.

Dans l'exemple de la figure IV-4, le couple formé des tâches 1 et 2 est un sous-ensemble inadmissible puisqu'il est impossible de les exécuter sans chevauchement, la somme de leur durée requise  $p_1$  et  $p_2$  étant supérieure au temps disponible total constitué par les deux tâches.

Le problème d'ordonnement humain ainsi défini, est donc similaire au "problème à une machine", présenté dans /Carlier et Chrétienne, 88/. En effet, il consiste à savoir s'il existe au moins un ordonnancement d'exécution d'un ensemble  $I$  de  $n$  tâches par une machine qui respecte les contraintes de début et de fin au plus tard. Toutefois, notre problème reste qualitatif puisque, à partir des données numériques des tâches, nous ne cherchons pas une séquence d'exécution particulière de ces dernières, mais nous cherchons à analyser toutes les situations pour lesquelles il est impossible d'exécuter les tâches séquentiellement.

Le système à intégrer doit donc permettre de minimiser le nombre de sous-ensembles inadmissibles en répartissant les tâches partageables entre un processeur principal humain (ressource humaine) et un coprocesseur (ressource artificielle). Les niveaux décisionnels de notre ordonnanceur comprennent donc, d'une part un système d'ordonnement qualitatif, disjonctif et préemptif, et d'autre part un système d'affectation des tâches à l'une des ressources afin d'éviter toute saturation éventuelle de la ressource humaine. Il semble alors nécessaire de caractériser les différents sous-ensembles qu'il suffit d'analyser.

### 2.2.2. Caractérisation des ensembles de tâches

Dans l'exemple de la figure IV-4, comme nous l'avons vu, le couple formé des tâches 1 et 2 est non admissible. Il en est de même par exemple pour les sous-ensembles (1, 2, 3), (1, 2, 3, 4) ou (1, 2, 3, 4, 5) qui contiennent ce couple inadmissible. Néanmoins, en fonction des contraintes de début et de fin de chaque tâche, les caractéristiques de ces divers sous-ensembles sont différentes. En effet, dans les sous-ensembles (1, 2), (1, 2, 3), et (1, 2, 3, 4, 5), nous avons :

$$\sum_{i=1}^n p_i > \max(d_i) - \min(r_i) \text{ pour } i \text{ allant de } 1 \text{ à } n.$$

Par contre, cette formule n'est pas vraie pour le sous-ensemble (1, 2, 3, 4). Ainsi, ce sous-ensemble n'est inadmissible que parce qu'il subit les caractéristiques d'autres sous-ensembles qu'il inclut et qui sont non admissibles, comme (1, 2) par exemple. De même, nous pouvons dire que les sous-ensembles (1, 2, 3) et (1, 2, 3, 4, 5) sont inadmissibles car ils contiennent au moins un sous-ensemble inadmissible qui est en l'occurrence (1, 2). De plus, les sous-ensembles (1, 2, 3, 4) et (1, 2, 3, 4, 5) sont particuliers puisqu'ils contiennent un intervalle de temps durant lequel, relativement à notre modèle, l'opérateur humain "n'a rien à faire" : il s'agit de l'intervalle compris entre les instants 6 et 7. Ainsi, à partir de cet exemple, il semble nécessaire de formuler clairement les caractéristiques des divers sous-ensembles du problème afin d'établir les fonctionnalités du système d'aide désiré.

En l'occurrence, relativement aux hypothèses prises pour notre problème, la disponibilité de la ressource humaine est, à chaque instant, unitaire ( $Q=1$ ). Or, chaque tâche  $i$  nécessite une quantité d'utilisation  $q_i = Q = 1$ . L'ensemble  $I$  des tâches que l'opérateur humain doit exécuter est donc l'ensemble critique maximal. Ce dernier doit donc être analysé, puis décomposé de manière à

déterminer tous les cas de figure de deux ou plusieurs tâches, constituant des sous-ensembles pour lesquels l'exécution risque d'être problématique pour l'opérateur humain.

La caractérisation des différents sous-ensembles est détaillée dans /Vanderhaegen et al, 92c/ et /Crévits, Vanderhaegen, Debernard, Millot, 92/. Elle se base sur un intervalle de temps continu  $T$  et un ensemble  $I$  de  $n$  tâches avec  $\text{Card}(I) = n$ . Chaque tâche  $i$  de  $I$  est caractérisée par le triplet  $(r_i, d_i, p_i)$  défini plus haut et par  $s_i$  qui vaut **1** lorsque la tâche est partageable. Dans ce cas, elle peut être affectée soit au processeur humain, soit au coprocesseur artificiel. Dans le cas contraire,  $s_i$  vaut **0** et la tâche est obligatoirement allouée à l'opérateur humain. A partir de ces données, plusieurs définitions nous permettent de caractériser les différents ensembles critiques de tâches. Elles sont énumérées ci-après.

La connexité présente un cas particulier d'ensemble critique disjonctif. En effet, elle permet d'exprimer l'absence d'intervalle de temps disjoint, relativement aux durées disponibles des tâches constituant cet ensemble :

**Définition 1**  $I$  connexe sur  $T \Leftrightarrow \forall t \in T, \exists i \in I, r_i \leq t \leq d_i$

$I$  est connexe sur  $T$  s'il n'existe aucun intervalle de temps disjoint sur  $T$ . En d'autres termes,  $I$  est connexe s'il n'existe aucun "temps mort" entre les tâches. A titre d'exemple, les sous-ensembles (1, 2, 3) et (4, 5) de la figure IV-4 sont connexes.

De plus, l'impossibilité d'une exécution séquentielle des tâches d'un même ensemble s'exprime par le niveau de saturation de celui-ci, en fonction des contraintes de chaque tâche :

**Définition 2**  $I$  est saturé si  $\sum_{i \in I} p_i > \max_{i \in I}(d_i) - \min_{i \in I}(r_i)$ .

$I$  est donc saturé si la somme des durées requises pour les tâches est supérieure à la durée disponible globale de l'ensemble des tâches. Par exemple, le sous-ensemble (1, 2, 3) est saturé, mais (4, 5) ne l'est pas.

Ces notions de connexité et de saturation des ensembles de tâches nous permettent de définir l'admissibilité et l'inadmissibilité des séquences pour le problème d'ordonnancement :

**Définition 3**  $I$  inadmissible  $\Leftrightarrow \exists I' \subset I, I'$  saturé

$I$  est inadmissible si les contraintes temporelles de début au plus tôt et de fin au plus tard d'au moins une tâche ne peuvent pas être respectées lors de son exécution.

Par contre,  $I$  est admissible si toutes les tâches peuvent être exécutées séquentiellement en respectant leurs contraintes de début au plus tôt et de fin au plus tard :

**Définition 4**  $I$  admissible  $\Leftrightarrow \forall I' \subset I, I'$  non saturé

Un cas particulier d'ensemble inadmissible peut être déterminé lorsque toutes les tâches qui le constituent sont connexes :

**Définition 5**  $I$  est strictement inadmissible si  $I$  est saturé et connexe.

La figure IV-4 illustre chacun de ces types d'ensembles. En effet, par exemple, (4, 5) est admissible, (1, 2) et (1, 2, 3) sont strictement inadmissibles alors que (1, 2, 3, 4) est simplement inadmissible.

Enfin, pour le problème d'affectation, deux concepts sont utiles :

**Définition 6**  $I$  est **partageable** si  $\forall i \in I, s_i = 1$

Par conséquent,  $I$  est partageable si les tâches peuvent être exécutées indifféremment par l'un ou l'autre processeur. Cela dépend en fait de la nature des tâches et des capacités de chaque processeur.

**Définition 7**  $I$  est **partitionnable** si  $I$  est décomposable en deux sous-ensembles  $I_1$  et  $I_2$  tel que  $I_1$  soit admissible,  $I_2$  soit partageable,  $I_1 \cap I_2 = \{\emptyset\}$  et  $I_1 \cup I_2 = I$ .

Ainsi, par exemple, si nous supposons que les tâches 1, 3 de la figure IV-4 sont partageables, le sous-ensemble (1, 2, 3, 4) inadmissible est partitionnable, et plusieurs solutions sont d'ailleurs envisageables. En effet, il peut être décomposé soit en (2, 4) qui est admissible et (1, 3) qui est partageable, soit en (2, 3, 4) qui est admissible et (1) qui est partageable.

Dans le cas où un sous-ensemble strictement inadmissible n'est pas partitionnable, la solution la plus admissible consiste évidemment à affecter toutes les tâches partageables au calculateur.

De plus, à partir des différentes caractéristiques des sous-ensembles de tâches, il est intéressant de noter quelques ensembles remarquables :

- L'ensemble vide  $\{\emptyset\}$  est admissible
- Chaque tâche  $i \in I$  est connexe et admissible. Par conséquent, un ensemble strictement inadmissible qui contient au plus une tâche non partageable ou dans lequel les tâches non partageables sont non connexes entre elles est partitionnable.

Soit un couple  $(i, j)$  de tâches de  $I$  :

- Si le début de l'exécution de l'une dépend de la fin de l'exécution de l'autre alors  $(i, j)$  est admissible, mais pas forcément connexe.
- Si  $i$  et  $j$  sont juxtaposées, c'est-à-dire soit  $r_i = d_j$ , soit  $d_i = r_j$  alors  $(i, j)$  est connexe et admissible

Ces définitions permettent d'établir les principes de base de notre système d'ordonnancement et d'affectation, à partir de quelques propositions, parfois évidentes.

### 2.2.3. Caractéristiques générales des problèmes d'ordonnancement et d'affectation

Les propositions qui suivent permettent de caractériser les diverses interactions entre les sous-ensembles d'un même ensemble  $I$  de  $n$  tâches sur un intervalle de temps continu  $T$ . Elles nous permettront de déterminer les sous-ensembles inadmissibles qu'il suffit de traiter pour le problème d'affectation des tâches aux deux ressources.

**Proposition 1**  $I$  inadmissible  $\Leftrightarrow \exists I' \subset I, I'$  inadmissible.

En d'autres termes, un ensemble de tâches est inadmissible dans la mesure où il est composé d'au moins un sous-ensemble inadmissible.

Cette proposition est évidente dans la mesure où la définition d'un ensemble inadmissible  $I$  sous-entend qu'il existe au moins un sous-ensemble  $I'$  de  $I$  saturé qui est lui-même inadmissible. De plus, la réciproque est vraie puisque, par propagation des caractéristiques d'un ensemble  $I'$  saturé, tout ensemble  $I$  contenant  $I'$  est inadmissible. La contraposée de cette proposition permet d'en élaborer une deuxième, à propos des sous-ensembles admissibles.

**Proposition 2**  $I$  admissible  $\Leftrightarrow \forall I' \subset I, I'$  admissible.

Ce qui signifie que, si  $I$  est admissible, tout sous-ensemble qu'il contient est admissible.

Le proposition 3 est très pratique puisqu'elle permet de définir d'une manière plus précise les caractéristiques des ensembles admissibles ou inadmissibles, dans les propositions 4 et 5 :

**Proposition 3**  $I$  saturé  $\Rightarrow \exists I' \subset I, I'$  strictement inadmissible.

La démonstration de cette proposition est évidente si  $I$  est saturé et connexe. En effet, dans ce cas, par définition  $I$  est strictement inadmissible. Il suffit donc de démontrer qu'un ensemble  $I$  saturé et non connexe contient au moins un sous-ensemble strictement inadmissible. Cette proposition est facilement démontrable par l'absurde. En effet, soient  $I_1, I_2, \dots, I_p$ , tous les sous-ensembles connexes distincts de  $I$ . Si  $p = \text{Card}(I)$  alors  $I$  ne peut pas être saturé puisque les sous-ensembles contenant une seule tâche sont des sous-ensembles admissibles. Par conséquent,  $I$  serait admissible et non saturé. De même, quand  $p \neq \text{Card}(I)$ , si tous les sous-ensembles  $I_1, I_2, \dots, I_p$  sont admissibles, alors  $I$  serait admissible et non saturé. Donc parmi ces sous-ensembles connexes de  $I$ , il en existe au moins un qui soit saturé donc strictement inadmissible.

A partir de la proposition 3 et de la définition d'un ensemble inadmissible, il est facile d'en déduire la proposition 4 dont la contraposée est la proposition 5 :

**Proposition 4**  $I$  inadmissible  $\Leftrightarrow \exists I' \subset I, I'$  strictement inadmissible.

Par conséquent, un ensemble inadmissible contient au moins un sous-ensemble strictement inadmissible.

**Proposition 5**  $I$  admissible  $\Leftrightarrow \forall I' \subset I, I'$  non strictement inadmissible.

Inversement, un ensemble admissible ne contient aucun sous-ensemble strictement inadmissible.

Enfin, la dernière proposition soulève une condition nécessaire et suffisante pour partitionner un ensemble inadmissible :

**Proposition 6**  $I$  partitionnable et inadmissible  $\Leftrightarrow \forall I' \subset I$  tel que  $I'$  strictement inadmissible,  $I'$  partitionnable.

La démonstration de cette dernière proposition est plus complexe. Supposons que  $I$  soit partitionnable et inadmissible. Par définition, il existe un sous-ensemble admissible  $I_a$  et un sous-ensemble partageable  $I_b$  tels que  $I_a \cap I_b = \{\emptyset\}$  et  $I_a \cup I_b = I$ . Soient  $I_1, I_2, \dots, I_p$ , les sous-ensembles distincts de tâches de  $I$  strictement inadmissibles. Nous posons, pour chaque sous-ensemble  $I_1, I_2, \dots, I_p : I_{i,a} = I_i \cap I_a$  et  $I_{i,b} = I_i \cap I_b$ . D'après les caractéristiques de  $I_a$  et  $I_b$ , nous avons  $I_{i,a}$  admissible et  $I_{i,b}$  partageable. De plus,  $I_{i,a} \cap I_{i,b} = \{\emptyset\}$  et  $I_{i,a} \cup I_{i,b} = I_i$ . Donc, chaque sous-ensemble strictement inadmissible de  $I$  peut être partitionné.

Réciproquement, supposons que tous les sous-ensembles distincts, notés  $I_1, I_2, \dots, I_p$ , de  $I$  soient partitionnables et strictement inadmissibles. Tout d'abord, d'après le proposition 4,  $I$  est inadmissible. De plus, pour chacun des sous-ensembles strictement inadmissibles de  $I$ , il existe deux sous-ensembles  $I_{i,a}$  et  $I_{i,b}$  tels que  $I_{i,a}$  admissible,  $I_{i,b}$  partageable,  $I_{i,a} \cap I_{i,b} = \{\emptyset\}$  et  $I_{i,a} \cup I_{i,b} = I_i$ . Il est évident que tous les sous-ensembles  $I_{i,b}$  contiennent toutes les tâches de  $I$

dont les contraintes de début et de fin ne peuvent pas être respectées lors de leur exécution. En posant,  $I_b = I_{1,b} \cup I_{2,b} \cup \dots \cup I_{p,b}$  et  $I_a = I - I_b$ ,  $I_a$  est admissible,  $I_b$  est partageable,  $I_a \cap I_b = \{\emptyset\}$  et  $I_a \cup I_b = I$ . Par conséquent,  $I$  est partitionnable et inadmissible.

Ce formalisme propre aux décisions d'ordonnancement et d'affectation, est relativement simple. Il nous a permis de mettre en œuvre deux algorithmes : d'abord un algorithme de caractérisation des ensembles de tâches et ensuite un algorithme de partitionnement de certains de ces ensembles. Le premier évalue la faisabilité d'un ordonnancement admissible, le second résout les ensembles strictement inadmissibles en les partitionnant.

### 2.3. Algorithmes de base

Tout d'abord, dans l'algorithme de caractérisation d'un ensemble quelconque  $I$  de  $n$  tâches, il suffit, d'après les propositions 1 et 4, de rechercher l'ensemble des sous-ensembles strictement inadmissibles. Ensuite, relativement à la proposition 6, le second algorithme vérifie si chacun d'eux est partitionnable. Les algorithmes de base qui en découlent sont détaillés ci-dessous, /Crévis, Debernard, Vanderhaegen, Millot, 93a/.

Dans le premier algorithme, la donnée en sortie est la variable STI qui contient l'ensemble des sous-ensembles strictement inadmissibles de  $I$ , figure IV-5. Si STI est vide alors  $I$  est admissible. Par défaut, au début du traitement, STI est vide et le compteur  $K$  est mis à 2 puisque les sous-ensembles formés d'un singleton sont admissibles.

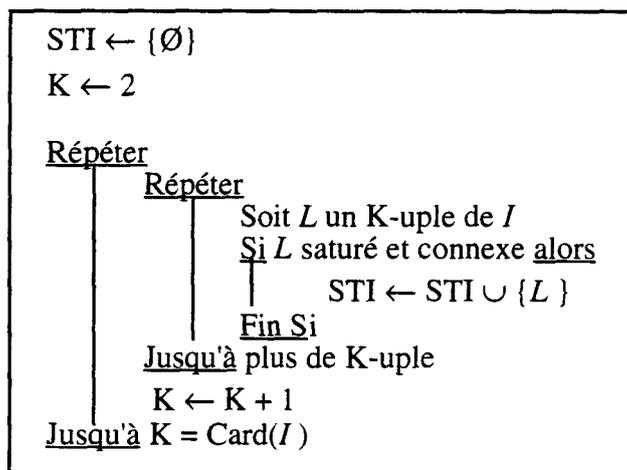


Figure IV-5: Algorithme général de caractérisation d'un ensemble quelconque  $I$  de tâches.

Le second algorithme permet de déterminer si un ensemble  $I$  strictement inadmissible est partitionnable, figure IV-6. La donnée en sortie est la variable SPA qui contient l'ensemble des solutions envisageables pour rendre  $I$  partitionnable. Si SPA est vide, alors  $I$  n'est pas partitionnable. De plus, le compteur  $K$  est initialisé à 1 puisqu'un ensemble formé d'une tâche partageable peut rendre  $I$  partitionnable. L'algorithme se base sur le sous-ensemble  $P$  des tâches partageables de  $I$ .

Il faut également noter qu'à partir du moment où plusieurs solutions sont envisageables ( $\text{Card}(\text{SPA}) > 1$ ), il convient alors de choisir l'allocation optimale, SOL. Celle-ci est déterminée par l'intermédiaire d'un critère de sélection particulier, OPT qui nécessite d'une part une fonction de priorité, et d'autre part une règle d'arbitrage.

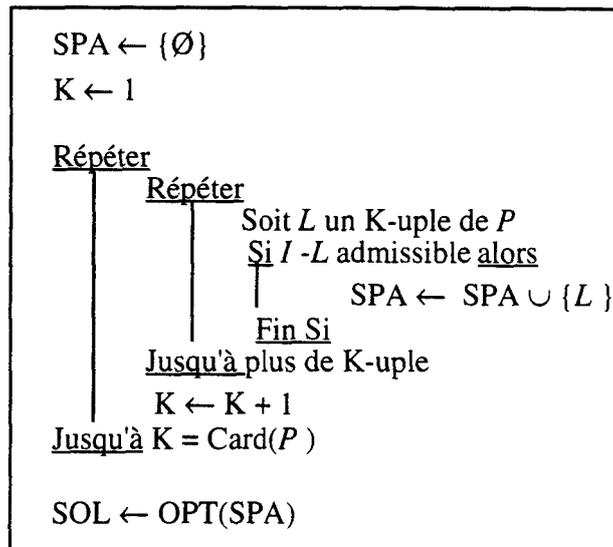


Figure IV-6: Algorithme général de partitionnement d'un ensemble I strictement inadmissible.

Cependant, ces algorithmes de base ne sont pas du tout optimaux. En effet, le premier prend en compte tous les sous-ensembles de tâches d'ordre supérieur ou égal à deux. Ainsi, il assimile le problème de base à un problème à la fois disjonctif et cumulatif, entraînant des redondances de traitement inutiles. De plus, ces problèmes de caractérisation et d'affectation sont en fait des problèmes NP-complets, /Crévis, Debernard, Vanderhaegen, Millot, 93b/. Plus le nombre de tâches à traiter est grand, plus le nombre de combinaisons à évaluer devient important. Ceci entraîne un traitement long et une capacité de mémoire non négligeable. En effet, pour un ensemble de n tâches, le nombre de combinaisons à prendre en compte est de l'ordre de  $2^n$  environ, ou plus

précisément égal à  $\sum_{i=2}^n C_n^i$  où  $C_n^i = \frac{n!}{i!(n-i)!}$ .

C'est pourquoi, nous avons élaboré une analyse plus fine de caractérisation et de partitionnement des tâches, basée sur les principes de programmation dynamique, /Vanderhaegen & al, 92c/. Cette méthode d'optimisation récursive de résolution de problème permet un temps de traitement et une capacité de mémoire plus acceptables, pour des contextes particuliers. Elle ne remet pas en question les principes de base de notre problème.

### 3. Mise en œuvre de la répartition des tâches entre processeur humain et coprocesseur artificiel

Dans un système complexe où les contraintes temporelles sont importantes et strictes, il est inconcevable d'y intégrer un outil d'assistance ayant des temps de traitement longs. Or, la complexité des algorithmes, pour la mise en œuvre de la caractérisation et du partitionnement des ensembles de tâches, ne permet pas toujours de satisfaire les exigences temporelles, dans un environnement temps réel, surtout quand le nombre de tâches est grand. C'est pourquoi, une approche par programmation dynamique simplifiée est développée.

#### 3.1. Modélisation par programmation dynamique

La mise en œuvre d'un tel ordonnanceur dynamique est purement un problème d'analyse sous contraintes. Parmi les méthodes qui permettent d'appréhender ce dernier, l'utilisation des principes de programmation dynamique nous paraît judicieuse pour modéliser les problèmes d'ordonnement et surtout d'affectation.

### 3.1.1. Principes de base

Comme tous les sous-ensembles strictement inadmissibles doivent être déterminés, un parcours énumératif de toutes les combinaisons possibles de tâches est nécessaire.

De plus, l'idée générale pour évaluer une situation comprenant  $n$  tâches à réaliser est de transposer le problème sous forme d'une série de tests de paires de disjonctions. Il s'agit donc de considérer un à un tous les sous-ensembles  $E_2$  contenant 2 tâches, puis tous les sous-ensembles  $E_3$  contenant 3 tâches, à partir des sous-ensembles  $E_2 \dots$  jusqu'au sous-ensemble  $E_n$  contenant  $n$  tâches, à partir des sous-ensembles  $E_{n-1}$  contenant  $n-1$  tâches.

Cette décomposition en sous-problèmes à partir d'une étape initiale vers une étape finale, pour lesquels l'état de sortie de chaque étape intermédiaire dépend de son état d'entrée induit par l'étape précédente, nous permet d'interpréter les problèmes d'ordonnancement et d'allocation en exploitant les principes de la programmation dynamique, /Laurière, 79; Faure, 87; Carlier et Chrétienne, 88/. Le nombre de tâches à traiter étant initialement connu, il s'agit de problèmes de décision séquentiels à horizon fini.

De plus, la programmation dynamique se base sur le fait que toute sous-politique d'une politique optimale est elle-même optimale, une politique étant définie comme une suite de décisions séquentielles qui fait évoluer le système considéré. En fait, elle consiste à "*calculer la solution de tous les problèmes intermédiaires, comportant un nombre de variables plus faibles que celui du problème initial, en allant du plus petit au plus grand, à déterminer l'optimum, pour tout état intermédiaire, par rapport à une seule variable à la fois, et à stocker la meilleure solution pour chacun des cas. L'intérêt est de tenir compte, d'une résolution à une autre, des optimums déjà obtenus, et jamais recalculés, donc d'éliminer du même coup, toutes les solutions non optimales*", /Laurière, 79/.

Ainsi, par rapport à notre problème, à une étape donnée, en fonction des décisions d'ordonnancement, nous considérons que toute décision d'allocation ne remettra pas en cause les décisions d'affectation des étapes précédentes.

En outre, le fait de traiter un sous-ensemble  $J$  strictement inadmissible avant un nouveau sous-ensemble strictement inadmissible  $K$  qui contient  $J$  (tel que  $J \cap K = J$ , et  $\text{Card}(K) = \text{Card}(J) + 1$ ) peut parfois permettre d'éviter d'obtenir l'inadmissibilité de  $K$ , grâce au partitionnement préalable de  $J$ .

Plusieurs primitives principales, définies à partir de domaines d'applications spécifiques, sont alors nécessaires. Ces fonctions, proposées ci-après, permettent de mettre en œuvre les processus décisionnels des systèmes d'ordonnancement et d'affectation, à partir des principes généraux de la programmation dynamique, /Vanderhaegen & al, 94/. Nous commençons d'abord par l'explication du problème d'ordonnancement.

### 3.1.2. Système d'ordonnancement par programmation dynamique

Les fonctions NIV\_CONNEXE et CONCAT, assimilables aux règles de séquençement et d'actualisation définies dans /Esquirol, 87/, permettent un premier filtrage des sous-ensembles des tâches affectées à l'opérateur humain. A partir de deux éléments distincts connexes, CONCAT en crée un nouveau en propageant les contraintes des tâches qui constituent ces deux éléments initiaux. Il s'agit donc d'une fonction de propagation progressive des contraintes des tâches, par l'étude des paires de disjonctions, caractérisées par NIV\_CONNEXE :

NIV-CONNEXE :  $S \times S \rightarrow Z$   
 $(J, K) \rightarrow n\_c = \text{NIV\_CONNEXE}(J, K)$  tel que :  
 $n\_c = [(d_J - r_J) + (d_K - r_K)] - [\max(d_J, d_K) - \min(r_J, r_K)]$

CONCAT :  $S \times S \rightarrow S$   
 $(J, K) \rightarrow S = \text{CONCAT}(J, K)$  tel que :  
 si  $\text{NIV\_CONNEXE}(J, K) > 0$  alors  
 $d_S = \max(d_J, d_K)$   
 $r_S = \min(r_J, r_K)$   
 $p_S = p_J + p_K$   
 $\text{liste}_S = \text{liste}_J \cup \text{liste}_K$   
 $S = \{\emptyset\}$  sinon

Nous notons  $Z$ , l'ensemble des entiers relatifs et  $I$ , l'ensemble des tâches  $i$  définies par les paramètres  $(r_i, d_i, p_i, s_i)$  de  $Z^4$  où  $r_i, d_i, p_i, s_i$  ont déjà été définis plus haut :  $p_i$  est la durée requise de  $i$ ,  $d_i - r_i$  est sa durée disponible,  $s_i$  est l'indice de partageabilité.  $S$  représente alors l'ensemble des sous-ensembles connexes admissibles ou inadmissibles.

Chaque élément de  $S$  est défini par plusieurs paramètres :

$$S = (\text{liste}, r, d, p) \text{ de } I \times Z^3$$

où liste est la liste des tâches de  $I$  constituant l'élément défini par  $r, d$ , et  $p$ ,  
 $r = \min_{i \in I} (r_i)$ ,  
 $d = \max_{i \in I} (d_i)$ ,  
 et  $p = \sum_{i \in I} p_i$ .

De même,  $p$  est la durée requise de la liste et  $d - r$  est sa durée disponible.

La première fonction  $\text{NIV\_CONNEXE}$  détermine le niveau de connexité de deux éléments distincts  $J(\text{liste}_J, r_J, d_J, p_J)$  et  $K(\text{liste}_K, r_K, d_K, p_K)$  de  $S$ , tels que  $\text{liste}_J \cap \text{liste}_K = \{\emptyset\}$ . Elle se base sur le fait que pour le test de connexité entre deux éléments quelconques, il s'agit de comparer la somme des durées disponibles des tâches qui les composent avec la durée disponible de leur union. Si le résultat  $n\_c$  est strictement négatif, alors  $J$  et  $K$  ne sont pas connexes. S'il est égal à zéro, alors  $J$  et  $K$  sont juxtaposées, mais s'il est strictement positif, alors la connexité entre  $J$  et  $K$  est absolue. Cette fonction permet ensuite de construire par la fonction  $\text{CONCAT}$  l'ensemble des éléments connexes de  $S$ .

Les décisions d'ordonnancement nécessitent deux fonctions supplémentaires :

NIV-SATU :  $S \rightarrow Z$   
 $J \rightarrow n\_s = \text{NIV\_SATU}(J)$  tel que  $n\_s = p_J - (d_J - r_J)$

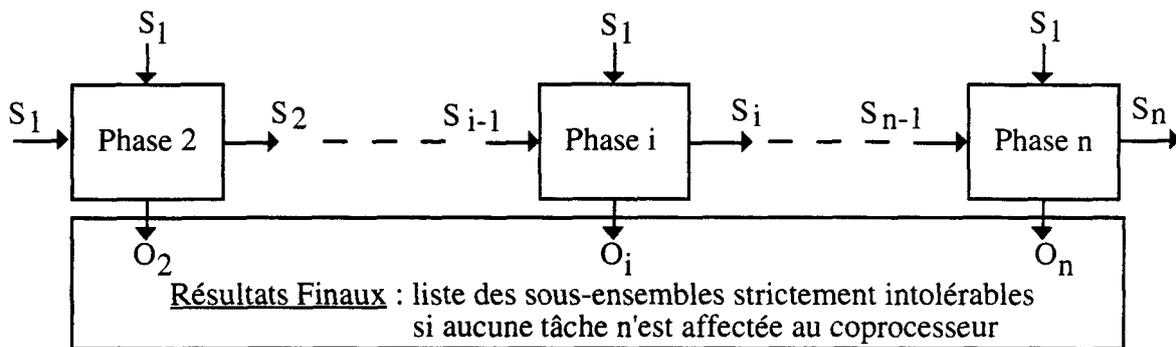
S\_INADM :  $S \rightarrow O$   
 $J \rightarrow O = \text{S\_INADM}(J)$  tel que :  
 $O = J$  si  $\text{NIV\_SATU}(J) > 0$   
 $O = \{\emptyset\}$  sinon

La fonction  $S\_INADM$  permet de déterminer les sous-ensembles de  $S$  strictement inadmissibles, nommés  $O$ . Elle utilise la fonction  $NIV\_SATU$  qui teste si un sous-ensemble connexe  $J$  est saturé. Si le résultat  $n\_s$  est négatif ou nul, l'ensemble connexe testé n'est pas saturé. Dans le cas contraire, il l'est.

Ces premières fonctions permettent d'établir la démarche générale pour le problème d'ordonnancement, à partir d'un nombre  $n$  de tâches ( $n = \text{Card}(S_1)$ ), figure IV-7.

Plusieurs variables sont à considérer :

- $S_1$  est la liste contenant toutes les tâches à traiter, affectée initialement à l'opérateur humain.
- $S_i$  est une liste intermédiaire qui correspond aux sous-ensembles connexes de  $S_1$ .  $S_i$  contient  $i$  tâches de  $S_1$  et est obtenu à partir de chaque élément de  $S_{i-1}$  et chaque tâche de  $S_1$ , avec la fonction  $CONCAT$ . Par exemple, la phase 2 permet d'obtenir par le traitement  $CONCAT(S_1, S_1)$ , tous les sous-ensembles  $S_2$  connexes contenant 2 tâches.
- Enfin,  $O_i$  est la liste des sous-ensembles strictement inadmissibles de  $S_i$ , contenant  $i$  tâches de  $S_1$  où chaque élément de  $S_i$  est testé avec la fonction  $S\_INADM$ . Par conséquent, chaque phase  $i$  permet d'obtenir tous les sous-ensembles connexes et tous les sous-ensembles inadmissibles, comprenant  $i$  tâches.



Processus décisionnel à la phase  $i$  :  
 $S_i = \text{CONCAT}(S_{i-1}, S_1)$   
 $O_i = S\_INADM(S_i)$

Figure IV-7 : Modélisation de la caractérisation des ensembles de tâches par programmation dynamique.

L'ensemble des sous-ensembles strictement inadmissibles étant connu, il faut partitionner chacun d'entre eux. Le problème d'affectation est donc maintenant détaillé.

### 3.1.3. Système d'affectation par programmation dynamique

Ces décisions d'affectation sont déduites de la fonction  $PARTITION$ , à partir d'un critère  $OPT$  :

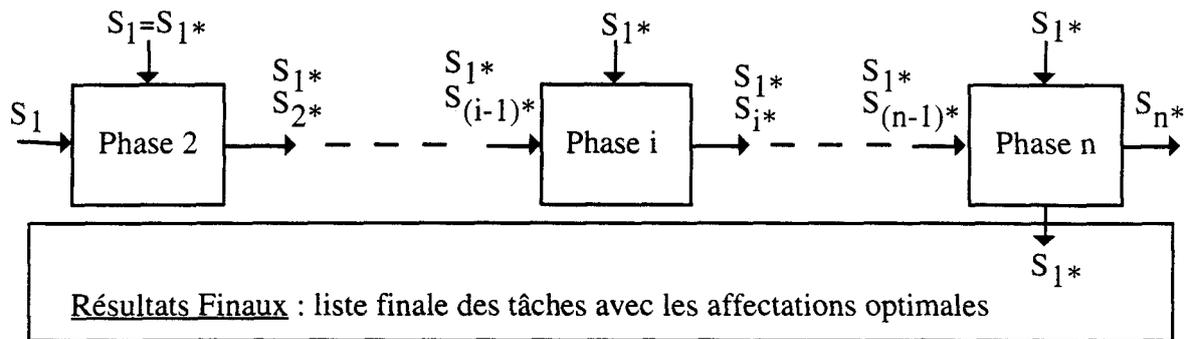
$PARTITION$  :       $O \rightarrow S^*$   
                           $O \rightarrow S^* = \text{PARTITION}(O)$  tel que :  
     $S^* = O - \text{OPT}(O)$

PARTITION établit le traitement global pour les décisions d'affectation, figure IV-8. En effectuant les répartitions adéquates, chaque phase  $i$  permet de calculer tous les sous-ensembles connexes admissibles contenant  $i$  tâches.

De plus, les variables utilisées sont également similaires à celles définies au problème d'ordonnancement :

- $S_1^*$  est la liste contenant toutes les tâches à traiter, dans laquelle les affectations optimales ont été soustraites. Initialement,  $S_1^*$  est équivalent à  $S_1$ .
- $S_i^*$  est la liste des sous-ensembles connexes admissibles de  $S_1$ , contenant  $i$  tâches de  $S_1$ , après retrait des tâches relatives aux affectations optimales. Chaque élément de  $S_{(i-1)}^*$  est testé avec chaque tâche de  $S_1^*$  (sauf celles déjà affectées au calculateur), par les fonctions CONCAT puis par  $S\_INADM$ , et enfin par PARTITION.

Le résultat  $\{S_1 - S_1^*\}$  représente ainsi la liste des affectations optimales. En outre, la phase finale  $n$  n'est pas figée puisque, en fonction des décisions d'affectation,  $n$  correspond à  $\text{Card}(S_1^*)$  qui est évolutif. Chaque décision d'affectation émanant de la phase  $i$ , engendre une mise à jour du contenu de  $S_{(i-1)}^*$ . En effet, tous les éléments de  $S_{(i-1)}^*$  contenant les tâches affectées au calculateur, doivent être supprimés.



Processus décisionnel à la phase  $i$  :

$$S_i^* = \text{PARTITION}( S\_INADM( \text{CONCAT}(S_{(i-1)}^*, S_1^*) ) ) )$$

Figure IV-8 : Modélisation du partitionnement des tâches par programmation dynamique.

Par conséquent,  $S^*$  est l'ensemble des sous-ensembles connexes admissibles.  $S - S^*$  représente ainsi tous les sous-ensembles de  $S$  qui ont été partitionnés, en fonction du critère OPT qui permet d'obtenir la liste  $\text{OPT}(O)$  des tâches constituant l'affectation la plus adéquate.

Il convient de remarquer qu'aucune hypothèse n'a été faite initialement sur la partageabilité et la priorité des tâches. Or la faisabilité des décisions d'affectation en fonction des décisions d'ordonnancement exige l'existence d'un nombre de tâches partageables suffisant. Si nous supposons, par exemple, que les tâches sont toutes partageables, il est alors très facile de partitionner les sous-ensembles strictement inadmissibles. En effet, d'une part, à l'étape  $i$ , tous les éléments de  $S_{(i-1)}^*$ , sont admissibles. D'autre part, chacun d'eux, noté  $S$ , est testé avec chaque tâche de  $S_1^*$ , notée  $s$ , encore affectée à l'opérateur humain. Lorsque  $S\_INADM(\text{CONCAT}(S, s))$  n'est pas vide, la fonction OPT peut simplement décider d'affecter la tâche  $s$  au calculateur. Cette démarche très pratique s'apparente au critère de priorité de type LIFO, dans la mesure où la dernière tâche d'un sous-ensemble connexe qui génère un sous-ensemble strictement inadmissible est la première affectée au calculateur.

Par ailleurs, pour simplifier notre propos, nous supposons maintenant que tout sous-ensemble inadmissible est partitionnable. Dans le cas où la tâche  $s$  n'est pas partageable, d'autres types de priorité peuvent alors être exploités dans la fonction OPT. Comme  $S$  est admissible, il suffit de décharger l'opérateur humain des tâches partageables qui permettent d'éviter le niveau de saturation engendré par  $s$ . En posant  $NIV\_SATU(CONCAT(S, s)) = n\_s$ , une condition nécessaire et suffisante pour partitionner le sous-ensemble  $\{S \cup s\}$ , est d'affecter au calculateur le groupe  $I$  de tâches de  $S$ , pour lequel  $(n\_s - \sum_{i \in I} p_i) \leq 0$ , c'est-à-dire qu'il s'agit de retirer un nombre suffisant de tâches afin d'obtenir l'admissibilité de  $\{S \cup s\}$ .

Plusieurs critères peuvent alors être utilisés. En effet, les groupes de tâches à traiter en priorité peuvent être celles dont les durées requises sont les plus faibles ou les plus élevées (règles SPT ou LPT), celles qui ont été insérées dans  $S$  les premières ou les dernières (règles FIFO ou LIFO). L'algorithme correspondant peut s'arrêter dès qu'une solution est trouvée, ou alors choisir l'affectation  $I$  qui minimise la valeur de  $(n\_s - \sum_{i \in I} p_i)$ . Cette dernière démarche reste réaliste dans la mesure où elle concerne la phase d'affectation prévisionnelle, non effective, donc modifiable jusqu'à ce que la solution optimale soit trouvée.

Il s'avère donc que plusieurs possibilités, utilisant des priorités statiques, dynamiques ou combinées, sont envisageables pour le critère de partitionnement, intégré dans OPT. Le choix ultime dépendra du contexte d'application. Un exemple sera donné au chapitre V pour le contrôle du trafic aérien.

Néanmoins, même si la modélisation des systèmes d'ordonnancement et d'affectation par la programmation dynamique est séduisante, elle reste insuffisante. En effet, lorsque  $n$  est grand, la place mémoire pour le traitement devient considérable. Par exemple, pour  $n=20$ ,  $S_{10}$  qui est calculé en fonction des éléments de  $S_9$  et de  $S_1$  nécessite, pour un ensemble  $S_1$  de tâches connexes, un temps de traitement et une place mémoire minimale correspondant aux combinaisons du calcul  $C_{10}^{20} + C_9^{20} + C_1^{20}$ , soit 352736 combinaisons. Or, la liste des éléments de  $S_i$ , ainsi que celle des sous-ensembles de  $S_{i*}$  ne sont utilisées que temporairement. C'est pourquoi, nous proposons de compléter l'approche ci-dessus par un algorithme de recherche du parcours optimal des différentes combinaisons à traiter en considérant les tâches numérotées de 1 à  $n$ , et triées par ordre croissant des  $r_j$ , c'est-à-dire de leur date de début au plus tôt, /Vanderhaegen & al, 94/.

### 3.2. Simplification du parcours combinatoire

Le but de ce paragraphe est de montrer que le tri de l'ensemble  $I$  des  $n$  tâches par ordre croissant des dates de début au plus tôt permet d'optimiser le traitement global sur plusieurs niveaux. Tout d'abord, la souplesse d'insertion ou la suppression d'une tâche dans l'ensemble  $I$  déjà trié satisfait les exigences temps réel d'un ordonnanceur dynamique. De plus, à partir d'un parcours judicieux de toutes les combinaisons, plusieurs raccourcis peuvent être entrepris. Ils sont présentés dans ce paragraphe et illustrés par un exemple simple.

#### 3.2.1. Parcours arborescent et rupture de connexité

Grâce à la numérotation ordonnée des tâches, l'interprétation arborescente des différentes combinaisons permet d'aborder une à une les paires de disjonctions, chacune étant considérée comme une variable temporaire. Dans cette approche, seulement deux vecteurs,  $S_1$  et  $S$  contenant chacun  $n$  éléments, sont nécessaires :

- $S_1$  est la liste initiale des tâches avec leurs paramètres  $(r, d, p, s)$  et  $S_1(i)$  est le sous-ensemble réduit à la tâche  $n^\circ i$ .

- S est la liste des sous-ensembles construits à partir des éléments de S1. Par conséquent, S(i) est un sous-ensemble qui contient i tâches de S1. Il est caractérisé par les paramètres (liste, r, d, p, fin) où S(i).fin est le numéro de la dernière tâche insérée dans S(i).liste.

L'algorithme qui en découle effectue un parcours en **profondeur d'abord**. L'idée de base est donc de traiter en premier lieu tous les sous-ensembles de tâches commençant par la même tâche. Le traitement commence par la tâche n°deb\_t, initialisée à la première tâche de S1, figure IV-9.

```
i , t_suiv ← 2
t_deb ← 1
S(1) ← S1(t_deb)
max_prof, max_larg ← n

Répéter
  {Traitement principal : parcours des sous-ensembles commençant par la tâche t_deb}
  S(i) ← S(i-1) ∪ S1(t_suiv)
  S(i).fin ← t_suiv
  Si t_suiv = max_larg alors
    {Dernière tâche de S1 testée : retour arrière}
    i ← i - 1
    t_suiv ← S(i).fin
  Sinon
    {Poursuite du parcours}
    i ← i + 1
  Fin Si
  t_suiv ← t_suiv + 1
  {Fin du traitement principal}

  {Suite du traitement : parcours des sous-ensembles commençant par la tâche suivante }
  Si i < 2 alors
    t_deb ← t_deb + 1
    t_suiv ← t_deb + 1
    S(1) ← S1(t_deb)
    i ← 2
    max_prof ← max_prof - 1
  Fin Si
Jusqu'à max_prof = 1
```

Figure IV-9 : Algorithme de base pour le parcours de toutes les combinaisons à traiter.

Quand l'étude de tous les sous-ensembles commençant par cette tâche n°deb\_t est terminée, il n'y a plus lieu de reconsidérer celle-ci à l'itération suivante. C'est pourquoi, deb\_t est incrémenté de 1 et max\_prof qui correspond au nombre de tâches qu'il reste à parcourir est décrémenté de 1.

Par rapport à notre application, ce parcours peut être raccourci en exploitant les **propagations des ruptures de connexité** générées par le niveau d'imbrication et de relation de précédence entre les tâches. En effet, la numérotation des tâches triées permet d'établir une relation évidente pour une paire de disjonction (i, j) de IxI :

$$i < j \Leftrightarrow r_i < r_j$$

La propagation de la rupture de connexité s'exprime, pour un ensemble  $I$  de  $n$  tâches triées par ordre croissant des  $r$ , pour un couple  $(i, j)$  de  $I$  tel que  $i < j$ , de la manière suivante :

$$(d_i < r_j) \Rightarrow (i, j) \text{ non connexe et } (\forall k \in I \text{ tel que } k \geq j, (i, k) \text{ non connexe))}$$

Par contre, nous ne pouvons rien conclure sur la connexité des couples  $(k, j)$  avec  $k \in I$  tel que  $k \leq i$ . En effet, il est possible que  $d_k$  soit supérieur à  $r_j$  auquel cas  $(k, j)$  est connexe. Le **niveau d'imbrication** d'une paire de disjonction  $(J, j)$  de  $SxI$ , pour laquelle  $\forall i \in J, i < j$ , est alors redéfini par la fonction NIV\_CONNEXE\_SIMPLIFIE définie par :

$$\begin{aligned} \text{NIV\_CONNEXE\_SIMPLIFIE : } \quad S \times I &\rightarrow Z \\ (J, j) &\rightarrow n\_c = \text{NIV\_CONNEXE\_SIMPLIFIE}(J, j) \\ &\text{tel que : } n\_c = d_J - r_j \end{aligned}$$

Quand  $n\_c \leq 0$ , la tâche  $j$ , ainsi que toutes les tâches  $k$ , tel que  $k > j$ , ne sont pas connexes à  $J$ .

En outre, cette propagation des ruptures de connexité peut être étendue en utilisant la **relation de précédence** entre les éléments. En effet, puisque celle-ci est transitive, nous pouvons établir une autre propriété évidente, relative à l'admissibilité d'un sous-ensemble de tâches. En effet, soit la paire de disjonction  $(J, j)$  de  $SxI$ , pour laquelle  $\forall i \in J, i < j$ , pour toutes les tâches  $k \geq j$  et pour tous les sous-ensembles  $K$  de  $J$ , nous avons l'implication suivante :

$$r_J + p_J < r_j \Rightarrow \forall k \geq j \text{ et } \forall K \subseteq J, r_K + p_K < r_k$$

En d'autres termes, si l'ensemble des tâches de  $J$  peut s'exécuter avant la tâche  $j$ , alors l'ensemble  $J$  ainsi que tous ses sous-ensembles peuvent s'exécuter avant toutes les autres tâches d'ordre  $k$  supérieure ou égal à  $j$ .

De plus, ces paires de disjonctions  $(J, k)$  et  $(K, k)$  peuvent être connexes. Il est alors possible de les retrouver dans un sous-ensemble  $O$  strictement inadmissible, c'est-à-dire connexe et saturé. Or ces sous-ensembles particuliers  $(J, k)$  et  $(K, k)$ , inclus dans  $O$ , sont admissibles puisque  $r_J + p_J < r_k$ ,  $r_K + p_K < r_k$  et  $r_k + p_k < r_k$ . Par conséquent, pour partitionner  $O$ , il suffit de ne retenir que les **sous-ensembles strictement inadmissibles minimaux**  $\{O - (J, k)\}$  et  $\{O - (K, k)\}$ . Le niveau de connexité est alors complété par la fonction NIV\_CONNEXE\_ETENDU :

$$\begin{aligned} \text{NIV\_CONNEXE\_ETENDU : } \quad S \times I &\rightarrow Z \\ (J, j) &\rightarrow n\_c = \text{NIV\_CONNEXE\_ETENDU}(J, j) \\ &\text{tel que : } n\_c = (r_J + p_J) - r_j \end{aligned}$$

Quand  $n\_c \leq 0$ , toutes les tâches de  $J$  peuvent s'exécuter avant les tâches  $k$ , tel que  $k \geq j$ .

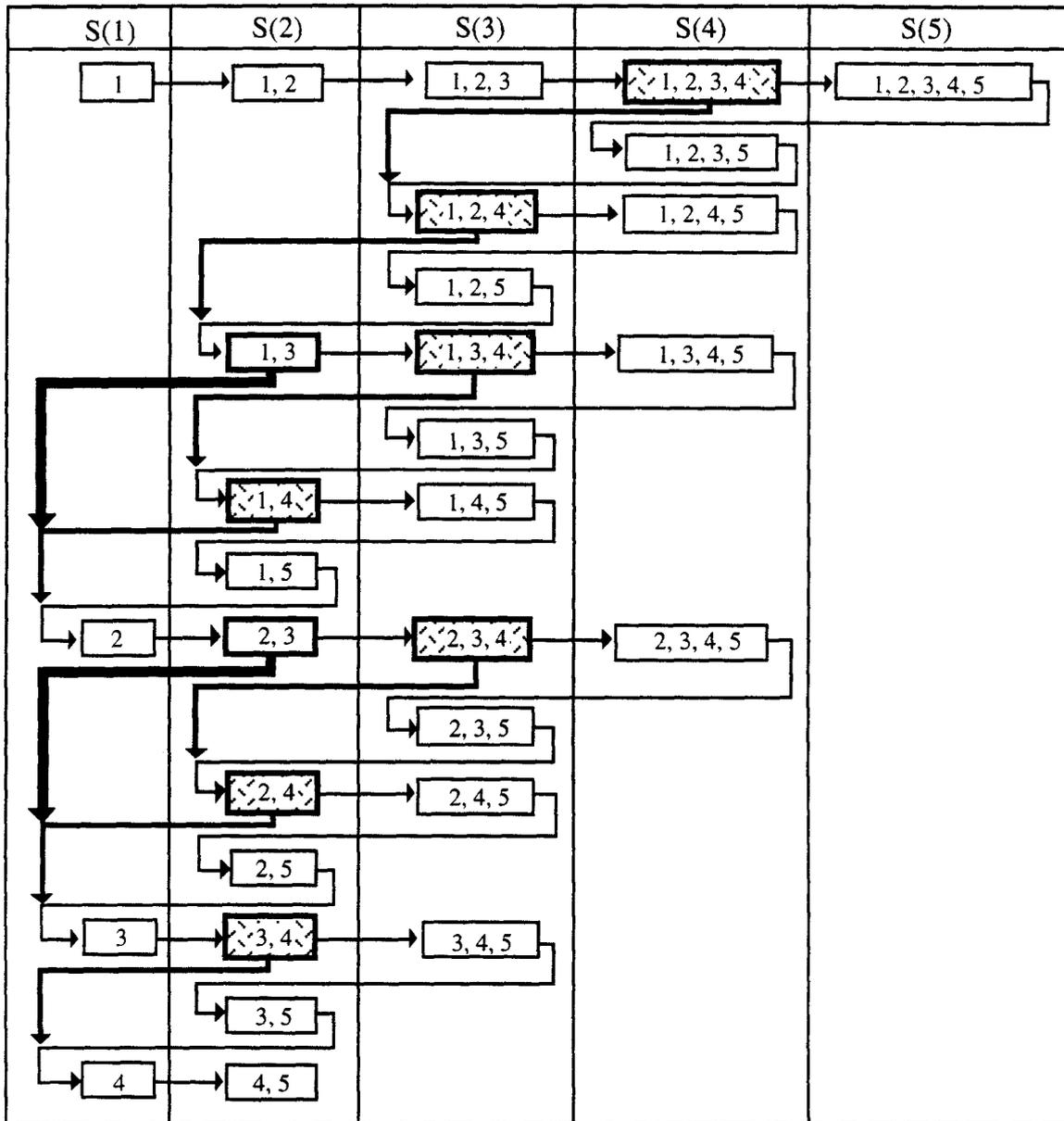
Ce phénomène de rupture de connexité est certes très efficace, surtout lorsque les tâches ne sont pas toutes connexes entre elles. Il est interprété ci-après à partir d'un exemple.

### 3.2.2. Illustration par un exemple

En reprenant l'exemple de la figure IV-4, l'intérêt de la rupture de connexité simplifiée et étendue est schématisé dans la figure IV-10. Cette figure montre d'abord le parcours complet de l'algorithme initial qui n'exploite pas les ruptures de connexité (ou qui est suivi s'il n'existe pas de

rupture de connexité :  $\rightarrow$ ). Y sont superposés les raccourcis introduits par les ruptures de connexité simplifiée ( $\Rightarrow$ ), ainsi que les raccourcis résultant de l'exploitation des ruptures de connexité étendue ( $\Rightarrow$ ).

S(i) est le résultat de la phase i décrite dans les figures IV-7 et IV-8. Il est donc déterminé en fonction de S(i-1) et des tâches de S(1) triées en fonction de leur date de début au plus tôt (S1 = {1, 2, 3, 4, 5}).



- $\rightarrow$  Parcours si connexité totale entre les tâches
- $\Rightarrow$  Parcours raccourci par les ruptures de connexité simplifiée
- $\Rightarrow$  Parcours raccourci par les ruptures de connexité étendue
- ~~1, 2~~ Rupture de connexité simplifiée
- 1, 2 Rupture de connexité étendue

Figure IV-10: exemple de parcours de combinaison, avec rupture de connexité, d'après la figure IV-4.

Le parcours en profondeur d'abord permet de traiter tous les sous-ensembles commençant par la tâche 1, puis par la tâche 2... jusqu'à la tâche 5. Ceci évite de maintenir en mémoire tous les sous-ensembles intermédiaires comprenant 2, 3, 4 ou 5 tâches. Ainsi, lorsque tous les sous-ensembles commençant par une tâche quelconque doivent être traités, il faut prendre en compte toutes les tâches qui lui sont supérieures. Chaque sous-ensemble  $S(i)$  est alors déterminé en fonction de  $S(i-1)$  et de la tâche correspondant à l'indice  $(S(i-1).fin + 1)$  de  $S(1)$ .

Si les tâches étaient toutes connexes entre elles, le parcours devrait obligatoirement intégrer toutes les combinaisons possibles. Il suivrait alors la démarche de l'algorithme de la figure IV-9, et prendrait en compte 26 combinaisons de tâches. Ces 26 combinaisons (de 2 tâches et plus) sont visibles sur la figure IV-10.

Par contre, lorsque deux tâches ne sont pas connexes, comme c'est le cas sur l'exemple de la figure IV-4 entre les tâches 3 et 4, les conséquences sur le parcours des combinaisons sont non négligeables. En effet, la rupture de connexité entre certaines tâches permet de ne considérer que 5 combinaisons ((1, 2), (1, 2, 3), (1, 3), (2, 3), (4, 5)) en exploitant la rupture de connexité simple avec NIV\_CONNEXE\_SIMPLIFIE. La rupture de connexité entre la tâche 3 et 4 évite, par exemple, le traitement inutile des sous-ensembles (1, 2, 3, 4), (1, 2, 3, 4, 5), et (1, 2, 3, 5), à la première étape de l'algorithme.

En outre, 3 combinaisons seulement ((1, 2), (1, 2, 3), (4, 5)) sont retenues lorsque la rupture de connexité simple est combinée avec la rupture de connexité étendue par la fonction NIV\_CONNEXE\_ETENDU. Ainsi, par exemple, la relation de précédence entre les tâches 1 et 3 permet de ne pas prendre en compte les sous-ensembles (1, 3), (1, 3, 4), (1, 3, 4, 5), (1, 3, 5), (1, 4), (1, 4, 5) et (1, 5).

En final, le système d'ordonnancement délivrera les deux seuls sous-ensembles strictement inadmissibles minimaux (1, 2) et (1, 2, 3). Ces deux sous-ensembles n'apparaissent pas explicitement sur la figure dont le but est de montrer que grâce au tri préalable des tâches par ordre croissant des dates de début au plus tôt, les ruptures de connexité simplifiée et étendue permettent d'éliminer les traitements inutiles de plusieurs sous-ensembles. En considérant à nouveau que les tâches 1 et 3 sont partageables, le système d'affectation peut alors proposer d'allouer au calculateur soit la tâche 1 seule, soit les deux tâches 1 et 3 afin de résoudre l'inadmissibilité de (1, 2) et (1, 2, 3). L'affectation définitive de une ou de deux tâches dépendra du critère de partitionnement. Ces points seront présentés en détail dans le chapitre suivant.

Par conséquent, il ressort que l'existence de ruptures de connexité dans les tâches peut rendre techniquement faisable la caractérisation et le partitionnement de ces tâches, et surtout en un temps correcte, compatible avec les contraintes temps réel d'un système à gérer. En revanche, si l'ensemble des tâches à caractériser est fortement connexe, ces raccourcis sont inexploitable. C'est pourquoi, il est possible d'adopter une autre solution qui consisterait à limiter le nombre de tâches à caractériser. Dans le cas où cette limitation est impossible, d'autres heuristiques peuvent éventuellement permettre une solution approchée. Il s'agit par exemple, de ne considérer que les sous-ensembles qui risquent d'être strictement inadmissibles en intégrant une **marge d'imbrication** pour les ensembles connexes et/ou une **marge de saturation** pour les ensembles inadmissibles. Dans le premier cas, certains sous-ensembles connexes seront traités : ceux qui dépassent la marge correspondante. Dans le second cas, une partie des sous-ensembles strictement inadmissibles seront partitionnés. D'une manière générale, les principes de calcul des décisions d'ordonnancement et d'affectation suivent les démarches présentées dans le paragraphe précédent. Ces points seront illustrés dans le chapitre suivant, avec l'exemple du contrôle du trafic aérien.

## Conclusion

Ce chapitre a présenté l'ensemble des caractéristiques humaines et techniques pour la génération de plan d'action. Il a surtout développé les mécanismes d'ordonnancement des tâches humaines afin d'identifier l'outil d'aide à mettre en œuvre dans une coopération homme-machine multiniveau. Il s'agit d'un module d'assistance stratégique dont l'objectif est double. En effet, d'une part, il doit analyser l'ensemble des interactions entre les différentes tâches affectées à l'opérateur humain, et détecter les risques de saturation de celui-ci. D'autre part, il doit élaborer la répartition optimale des tâches entre l'opérateur humain et un système d'aide, afin d'éliminer ces situations problématiques.

La première partie a été consacrée aux mécanismes humains relatifs à la génération de plans d'actions, c'est-à-dire à l'ordonnancement des tâches ou encore à la planification des actions. Chez l'opérateur humain, l'appréhension du temps varie sur trois niveaux : un niveau stratégique, un niveau tactique, et la commande. Les deux premiers mettent en jeu les mécanismes de régulation interindividuelle par rétroaction ou anticipation, à des horizons temporels différents. Or, une surcharge de travail humain, au niveau commande, entraîne une réduction de ceux-ci. De plus, lors de ce type de situation de débordement, l'ordonnancement dans le temps de l'exécution des tâches attribuées à l'opérateur humain peut devenir impossible.

Les décisions d'ordonnancement ne suffisent plus. Il faut donc introduire un processus de répartition des tâches afin de décharger l'opérateur humain, et de maintenir un niveau de sécurité optimal. C'est pourquoi, dans la deuxième partie, un système d'aide a été proposé. Il s'oriente vers un ordonnanceur qui gère les décisions d'ordonnancement et d'affectation. Il se base sur un modèle des tâches tactiques. Chacune d'entre elles nécessite une durée d'exécution incompressible qui est soumise à des butées temporelles strictes de début au plus tôt et de fin au plus tard. Les décisions d'affectation se limitent à la résolution d'ensembles connexes saturés, appelés sous-ensembles strictement inadmissibles, évalués préalablement par les décisions d'ordonnancement.

Cependant, vu la complexité des algorithmes de base, due à l'explosion combinatoire, nous avons élaboré une méthode d'optimisation basée sur la programmation dynamique, à horizon fini et dans un environnement déterministe. Celle-ci a été développée dans la dernière partie. Les décisions d'ordonnancement effectuées à une itération donnée génèrent des décisions d'affectation relatives à un critère particulier qui ne sont pas remises en cause aux itérations suivantes. De plus, par un parcours arborescent des différentes combinaisons de tâches triées et numérotées, l'exploitation de la propagation des ruptures de connexité des tâches permet un balayage raccourci des sous-ensembles de tâches. Ceci peut rendre alors l'algorithme exécutable en temps réel.

Cependant, cette solution est valable pour les situations particulières où les tâches présentent des ruptures de connexité entre elles. C'est pourquoi, pour les cas les plus défavorables, plusieurs heuristiques, comme la limitation du nombre de tâches à traiter, permettent éventuellement de simplifier le problème. Ainsi, les algorithmes mis en œuvre pour la caractérisation des sous-ensembles de tâche, et pour le partitionnement doivent être évalués, afin d'appliquer les règles simplificatrices adéquates. En ce qui nous concerne, il s'agit de les tester par rapport au contexte du contrôle aérien, et de les intégrer dans le module d'aide du poste du contrôleur organique, afin de mettre en œuvre une coopération multiniveau. L'évaluation de notre méthode fait donc l'objet du chapitre suivant.

---

## **CHAPITRE V - EVALUATION TECHNIQUE DE L'ORDONNANCEUR DYNAMIQUE EN VUE D'UNE COOPERATION MULTINIVEAU BIPOSTE DANS LE CONTROLE AERIEN**

---

### **Introduction**

L'efficacité ergonomique de l'outil proposé pour le niveau stratégique du contrôle aérien sera déterminée à partir d'expérimentations futures, sur une position de contrôle comportant un poste radar et un poste organique. Toutefois, avant de l'intégrer dans ce dernier, il est utile d'évaluer les performances techniques de l'algorithme correspondant, en terme de temps de réponse et d'encombrement de la mémoire. Ainsi, ce dernier chapitre propose d'une part d'établir une première phase d'évaluation technique de l'outil d'aide stratégique, et d'autre part d'aborder les différents niveaux de perspectives qu'exige ou que peut entraîner notre travail.

La validation de l'ordonnanceur dynamique est en effet présentée dans la première partie de ce chapitre. Elle exploite une partie des résultats des premières expérimentations effectuées sur SPECTRA (cf chapitre III), afin de déterminer les paramètres principaux des tâches tactiques. A partir des principes évoqués dans le chapitre précédent qui caractérise les objectifs de notre ordonnanceur dynamique, l'algorithme de base pour l'ordonnement et la répartition des tâches du niveau tactique du contrôle du trafic aérien est présenté.

La seconde partie énumère les perspectives possibles relatives à notre domaine d'application. Elle aborde les différentes spécifications qu'il reste à mettre en œuvre pour établir une deuxième version de SPECTRA intégrant deux contrôleurs : un contrôleur radar assisté par un système d'aide à la résolution de conflit de type SAINTEX, et un contrôleur organique secondé par notre ordonnanceur dynamique. Cette nouvelle version va servir, en outre, de base pour des projets dont l'objectif est de déterminer les caractéristiques des futurs postes de contrôle du trafic aérien. Une phase expérimentale de validation ergonomique est donc à envisager.

## **1. Evaluation technique de l'ordonnanceur dynamique**

Les résultats obtenus lors des expérimentations effectuées avec la première version de la plate-forme SPECTRA, nous permettent ici d'évaluer les principes de la répartition dynamique basée sur un ordonnanceur dynamique, conçu dans le précédent chapitre. Cette validation s'appuie sur l'ensemble des événements et des actions apparus au cours des expérimentations, pour chaque avion, depuis son entrée dans le secteur jusqu'à sa sortie. Un formalisme simplifié des tâches de contrôle du trafic aérien a pu alors être élaboré. Il a été utilisé afin d'évaluer les algorithmes d'ordonnement et d'affectation.

### **1.1. Formalisme simplifié des tâches de contrôle du trafic aérien**

La première version de SPECTRA a simulé une partie des tâches à assurer par le contrôleur radar. Ces tâches, effectuées lors de la campagne expérimentale de SPECTRA ont servi de base réaliste pour, d'une part les modéliser selon un formalisme compatible avec l'objectif de l'ordonnanceur dynamique, et d'autre part évaluer techniquement l'efficacité de cet ordonnanceur.

#### **1.1.1. Recensement des tâches principales**

Même si la plate-forme SPECTRA ne génère pas l'ensemble des tâches du contrôleur radar, elle est toutefois réaliste puisqu'elle permet à celui-ci d'effectuer les principales tâches. En effet, elle permet de gérer entièrement tous les avions non conflictuels et conflictuels, dès leur entrée dans le secteur contrôlé, jusqu'à leur sortie.

Cette gestion est illustrée par le chronogramme de la figure V-1 qui représente l'évolution au cours du temps d'une partie des avions contrôlés durant l'expérimentation sans aide, effectuée par le contrôleur 01 (cf chapitre III). Pour un avion donné, en entrée de secteur, les traits sont discontinus tant que l'avion n'a pas été pris en charge par le contrôleur, c'est-à-dire tant que celui-ci ne l'a pas placé dans son tableau de strip.

Les segments en trait plein représentent les vols non conflictuels. Les vols conflictuels sont symbolisés pendant la durée du conflit par un rectangle plein lorsqu'il est géré par le contrôleur. Si le conflit est partageable, il est représenté par un rectangle vide.

Les bornes des conflits sont celles fournies par SAINTEX, en fonction des extrapolations des trajectoires des avions correspondants. Pour cette expérimentation, toutes les tâches ont été affectées à l'opérateur humain (contexte sans aide). Toutefois, les conflits partageables qui n'ont pas été résolus par celui-ci avant leur détection par SAINTEX sont visualisés. Pour des problèmes de lisibilité, une partie seulement des actions y a été inscrite. Elle concerne l'envoi des ordres en niveau et en cap, soit pour la résolution d'un conflit, soit pour la mise à niveau d'un avion évolutif. On peut remarquer que, dans cette expérimentation, du fait de la surcharge de travail, le conflit entre les avions DLH635 et IBE820 n'a pas été vu par le contrôleur. C'est pourquoi, aucune action n'a été effectuée.

Nous pouvons donc décrire l'activité du contrôleur radar à partir de cet ensemble de tâches définies sur des intervalles de temps bornés par des butées temporelles impératives. En général, pour un avion non conflictuel, l'enchaînement des tâches comprend :

- l'intégration du nouveau vol dans le trafic du secteur,
- la recherche d'un conflit éventuel,
- la surveillance de l'avion qui est peu importante quand celui-ci n'engendre aucun conflit,
- et enfin, en sortie de secteur, le transfert de fréquence par lequel le contrôleur radar informe le pilote concerné de la fréquence radio du nouveau secteur (adjacent) à qui il le transfère et qui va en assurer le contrôle.

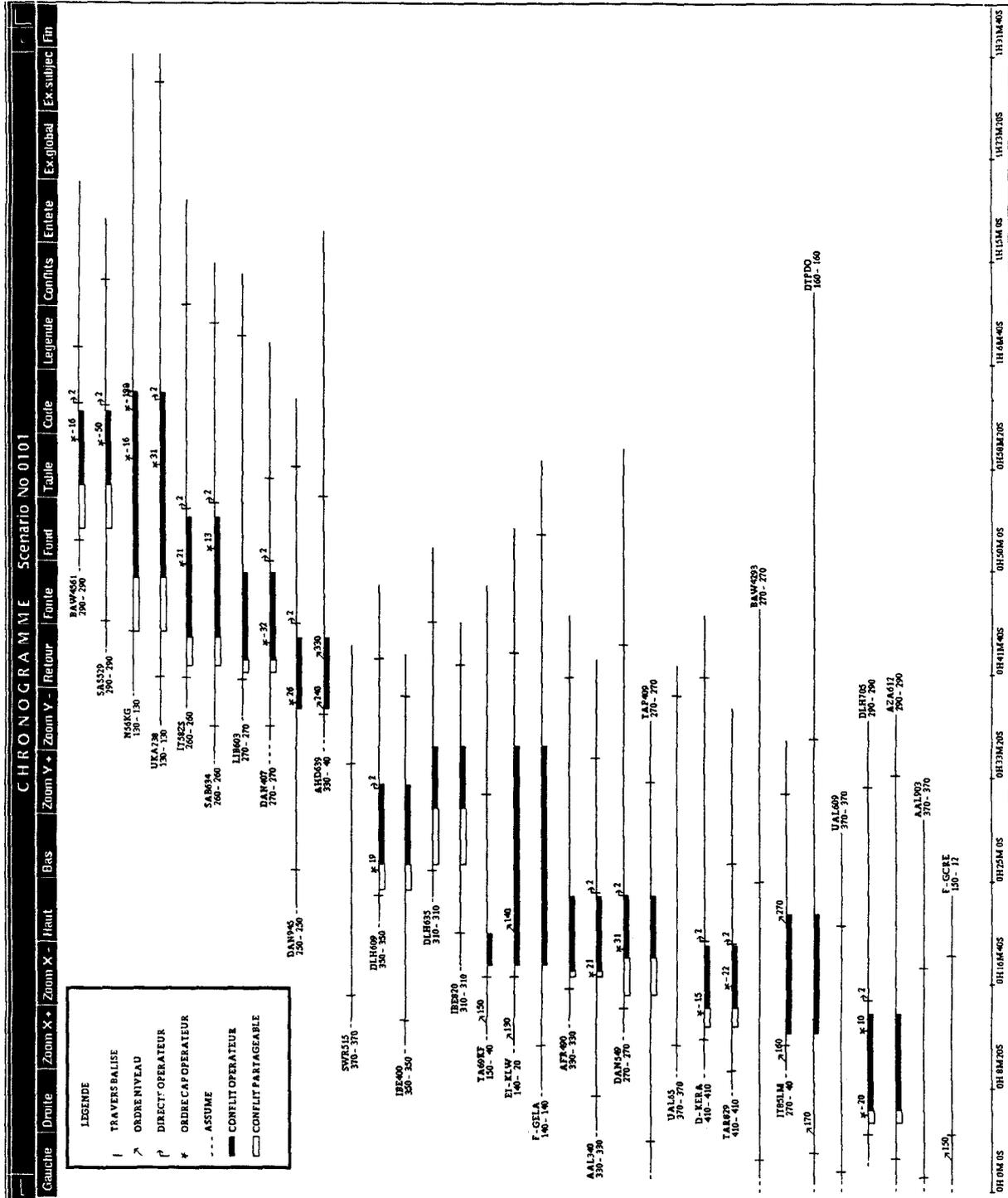


Figure V-1 : Exemple de chronogramme illustrant les tâches de contrôle des avions dans SPECTRA.

Par contre, pour un avion conflictuel, la démarche est plus complexe et comprend :

- l'intégration du nouveau vol dans le trafic du secteur,
- la détection du conflit avec un autre avion,
- la recherche d'une solution,
- l'organisation prévisionnelle de la résolution,
- la surveillance avant la résolution,
- la mise en œuvre de la résolution qui consiste à ordonner une modification de trajectoire à au moins un des pilotes des avions conflictuels,
- la surveillance du conflit après la résolution,
- la modification de la trajectoire pour replacer l'avion sur sa route prévue par le plan de vol initial (ici comme nous sommes dans un contexte de vol de nuit, le reprise du plan de vol initial se fait par une mise "en route directe" sur la balise de sortie de secteur),
- la surveillance du conflit après cette modification,
- et enfin le transfert de fréquence.

Les ordres de changement de niveau, de cap et de remise en "route directe", transmis par le contrôleur, sont symbolisés par 3 pictogrammes définis dans la légende de la figure V-1.

Les interfaces de SPECTRA permettent d'une part la surveillance du trafic qui inclut la détection des conflits, la surveillance des avions conflictuels et des avions en phase de sortie. Elles permettent d'autre part, d'intégrer un nouveau vol dans le secteur, ainsi que de modifier la trajectoire des avions conflictuels ou des avions dont le niveau réel accordé ne correspond pas au niveau indiqué dans leur plan de vol.

En outre, parmi les autres tâches que SPECTRA inclut, nous pouvons également citer la gestion de l'affichage radar et des strips. A ce sujet, la sortie d'un avion vers un autre secteur, c'est-à-dire le transfert de fréquence, pourrait être assimilée au jet du strip correspondant. Toutefois, lors des expérimentations, il est évident que ce phénomène est apparu surtout pour alléger le tableau de strip. De plus, SPECTRA n'intègre qu'un seul secteur pour l'instant. C'est pourquoi, cette tâche n'est pas prise en compte dans la suite.

Les tâches principales que SPECTRA permet d'entreprendre pour l'instant, peuvent alors être regroupées en cinq catégories :

- L' "**assume**" consiste à prendre en charge un nouveau vol qui est sur le point d'entrer dans le secteur contrôlé. Sur SPECTRA, cette tâche inclut la prise en compte des informations relatives au strip correspondant afin d'analyser l'influence du nouvel avion dans le trafic actuel. De plus, elle représente le premier contact radio avec le pilote qui est ici fictif.
- La **mise à niveau** concerne les avions évolutifs, c'est-à-dire les avions dont le niveau accordé par le contrôleur n'est pas celui demandé par le plan de vol. Cette tâche est valable pour les avions conflictuels et non conflictuels. De plus, avec SPECTRA, elle n'est réalisable qu'après l'assume.
- La **détection** d'un conflit est le résultat de l'analyse des interférences éventuelles d'un avion entrant avec le trafic actuel du secteur. Par conséquent, elle correspond d'une part à un assume normal, et d'autre part à la recherche d'une solution plausible lorsqu'un conflit est détecté.
- La **résolution** d'un conflit se concrétise par l'envoi d'un ordre à au moins un des avions conflictuels. Elle inclut la surveillance du conflit avant et après la modification du plan de vol de l'avion concerné, l'affinage de la solution envisagée, et l'envoi effectif de l'ordre au pilote. Cet ordre peut d'ailleurs être donné au premier contact radio. Toutefois, en considérant les contraintes d'utilisation de SPECTRA, pour un conflit évolutif impliquant au moins un avion évolutif, la mise à niveau peut suivre immédiatement l'assume. Par contre, afin d'éviter au contrôleur de résoudre tous les conflits partageables

avant que le calculateur puisse les détecter, un ordre en cap ne peut être donné à un avion conflictuel que lorsque celui-ci se stabilise dès la traversée de sa première balise.

- Enfin, pour un conflit quelconque, la phase finale de **surveillance** permet de vérifier que le risque de collision est écarté, c'est-à-dire que le conflit est entièrement résolu. Le contrôleur peut alors autoriser l'avion dont le plan de vol initial a été modifié, à reprendre sa route prévue.

Il est alors possible de modéliser l'ensemble d'un scénario à partir de ces tâches de base, la surveillance d'un avion non conflictuel et le transfert de fréquence n'étant pas pris en compte. Il s'agit maintenant de déterminer les différents paramètres pour formaliser chacune des cinq catégories de tâches.

### 1.1.2. Formalisation des tâches

Un formalisme simplifié a pu être établi pour chaque tâche. Une tâche *i* est en fait définie par quatre classes de paramètres :

*i* (**pa**, **af**, **inadm**, **libellé**, **lien**, **r**, **d**, et **p**)

où : **pa** et **af** sont des **paramètres d'affectation**,  
**inadm** est un **paramètre d'inadmissibilité**,  
**libellé**, **lien** sont des **paramètres d'identification**,  
**r**, **d**, et **p** sont des **paramètres temporels**.

Le paramètre d'affectation **pa** indique si une tâche est partageable ou non, et le paramètre **af** à qui (au contrôleur ou à SAINTEX) elle est affectée.

Pour les paramètres d'inadmissibilité, un seul indicateur **inadm** suffit. En effet, pour valider notre principe de répartition à partir d'un ordonnanceur dynamique, nous devons simplement savoir si, après le traitement global, une tâche est encore incluse dans au moins un sous-ensemble strictement intolérable minimal.

Quant aux paramètres d'identification, ils se composent d'abord du **libellé** de la tâche. Celui-ci peut être un assume, une mise à niveau, une détection de conflit, une résolution de conflit, ou une surveillance de conflit. Seuls les deux derniers types de tâches peuvent, pour des conflits particuliers, être partageables. De plus, l'affectation d'une des tâches correspondantes, soit à SAINTEX, soit au contrôleur radar, impose l'affectation de la seconde au même décideur. C'est pourquoi, un indicateur de **lien**, matérialisé par les indicatifs des avions impliqués dans la tâche, est nécessaire. Il permet également de différencier les tâches qui ont le même libellé.

Les paramètres temporels ont déjà été définis dans le chapitre IV : **r** représente la date de début au plus tôt, **d** est la date de fin au plus tard, et **p** la durée disponible pour exécuter la tâche correspondante entre **r** et **d**.

La détermination de ces paramètres temporels est plus délicate. Il est, en effet, difficile d'établir un formalisme général à partir de toutes les situations rencontrées dans chaque expérimentation. Il semble a priori que le problème majeur pour la modélisation des tâches concerne les conflits non partageables. C'est pourquoi nous resterons très approximatif afin dans un premier temps de tester les limites de notre système d'ordonnancement. Ainsi, à partir des actions et des événements survenus au cours d'une expérimentation, les dates au plus tôt et les dates au plus tard de chaque tâche peuvent être déterminées :

- Pour un assume et la détection d'un conflit, les butées temporelles correspondent à la date d'apparition de l'avion et à son passage par sa première balise.
- Une mise à niveau d'un avion non conflictuel peut s'effectuer dès que l'assume est fait :

$$r_{\text{mise a niveau}} = r_{\text{assume}} + p_{\text{assume}}$$

Dans la réalité, la mise à niveau est soit déjà effectuée par le contrôleur du secteur précédent, soit faite en même temps que l'assume.

- La résolution d'un conflit quelconque peut commencer dès le premier contact radio. Sa date de début au plus tôt, à partir de laquelle le conflit peut être résolu, suit donc la détection de celui-ci :

$$r_{\text{résolution}} = r_{\text{détection}} + P_{\text{détection}}$$

Malgré les contraintes de SPECTRA relatives à la résolution des conflits stables, nous maintenons cette date. En outre, la modélisation de cette tâche ne cherche en aucun cas à déterminer la démarche du contrôleur pour résoudre un conflit. Celui-ci est donc représenté de manière très globale et l'avion à partir duquel il va être résolu est ignoré. Quant à la date au plus tard au delà de laquelle il n'est plus possible de le résoudre, elle est basée sur la date de fin du conflit.

- Enfin, la surveillance peut démarrer dès que le danger est écarté, c'est-à-dire après le croisement des avions. Pour la date de fin au plus tard, nous avons pris en compte les actions des contrôleurs. Ainsi, la tâche de surveillance se termine soit dès que les avions déviés ont repris leur route initiale, soit dès la sortie du secteur d'au moins un des avions impliqués, soit simplement après quelques secondes pour des conflits évolutifs, par exemple, dans lesquels les mises à niveau nécessaires ont déjà été effectuées.

De plus, les durées d'exécution minimales incompressibles pour les cinq catégories de tâches, c'est-à-dire les durées requises, ont été fixées arbitrairement à :

- pour l'assume : 15 secondes,
- pour une mise à niveau d'un avion non conflictuel : 10 secondes,
- pour une détection : 20 secondes,
- pour une résolution : 180 secondes,
- pour une surveillance : 90 secondes.

L'ensemble de ces paramètres nous permettent maintenant d'appliquer notre méthode d'ordonnancement et de l'évaluer à partir des algorithmes de base.

## **1.2. Algorithmes pour les décisions d'ordonnancement et d'affectation**

Ces algorithmes de base utilisent l'algorithme de parcours des combinaisons, ainsi que les primitives détaillées dans le chapitre IV. D'une part, le système d'ordonnancement doit détecter les zones inadmissibles que le contrôleur radar subira. Il doit donc délivrer les sous-ensembles strictement inadmissibles minimaux, à partir de la fonction de base S\_INADM. D'autre part, le système d'affectation dont les décisions sont générées par la fonction PARTITION, propose une répartition optimale des tâches entre le contrôleur radar et SAINTEX, afin de résoudre ces sous-ensembles problématiques.

Chaque traitement a déjà été abordé dans le chapitre IV, mais nécessite quelques éclaircissements relatifs à notre application. Nous commençons par les décisions émanant du système d'ordonnancement.

### **1.2.1. Décisions d'ordonnancement**

L'algorithme principal se base sur un ensemble S1 de n tâches ( $\text{Card}(S1)=n$ ). Celles-ci sont caractérisées par les paramètres ( $p_a$ ,  $a_f$ ,  $i_{\text{inadm}}$ ,  $l_{\text{libellé}}$ ,  $l_{\text{lien}}$ ,  $r$ ,  $d$ , et  $p$ ) et sont, de plus, préalablement triées par ordre croissants des  $r$ . Les indices  $a_f$  et  $i_{\text{inadm}}$  correspondent au résultat de l'analyse de l'ordonnancement. Ils sont initialisés à 0. D'une part, si  $a_f=0$ , la tâche correspondante est affectée au contrôleur humain. D'autre part, si  $i_{\text{inadm}}=0$ , elle n'est incluse dans aucun sous-ensemble minimal strictement inadmissible.

La recherche des situations inadmissibles est alors déterminée à partir de la procédure principale DECISION\_ORDONNANCEMENT, figure V-2. Celle-ci utilise la procédure CONCAT(J, j) qui est définie dans *SxI*, et qui fait appel à la procédure S\_INADM(J) où J est un élément de S. Comme les variables globales sont identiques à celles de l'algorithme de parcours de combinaisons, elles ne sont pas redécrites ici (cf chapitre IV, §3.2.1.). Nous rappelons simplement que chaque élément de S est défini par les paramètres (r, d, p, liste, fin) et que Card(S)=Card(S1)=n.

```
Procédure DECISION_ORDONNANCEMENT
t_deb ← 1 ; ind_s , t_suiv ← 2
S(1) ← S1(t_deb) ; max_prof, max_larg ← n

Répéter
  {Traitement principal : parcours des sous-ensembles commençant par la tâche t_deb}
  CONCAT( S(ind_s - 1) ; S1(t_suiv) )
  t_suiv ← t_suiv + 1
  {Fin du traitement principal}

  {Suite du traitement : parcours des sous-ensembles commençant par la tâche suivante }
  Si i < 2 alors
    t_deb ← t_deb + 1 ; t_suiv ← t_deb + 1 ; S(1) ← S1(t_deb)
    ind_s ← 2 ; max_prof ← max_prof - 1
  Fin Si
Jusqu'à max_prof = 1
```

Figure V-2: Algorithme principal pour les décisions d'ordonnancement.

CONCAT(J, j) permet d'obtenir progressivement tous les sous-ensembles connexes de S1, à partir des fonctions NIV\_CONNEXE\_SIMPLIFIE et NIV\_CONNEXE\_ETENDU (cf chapitre IV, §3.2.1.), figure V-3.

Celles-ci permettent de mettre en pratique les différentes ruptures de connexité. Avec la première, lors d'une rupture de connexité simplifiée, le traitement reprend à l'indice ind\_s précédent. Par contre, avec la seconde, dès l'apparition d'une rupture de connexité étendue, il reprend à l'étape initiale avec la tâche t\_deb suivante. La marge marge\_imbrication correspond au niveau maximal de connexité, en dessous duquel la paire de disjonction (J, j) n'est pas connexe. Pour la présente évaluation, cette marge est fixée à 0.

A la suite du filtrage effectué en amont pour la caractérisation de (J, j), la dernière procédure S\_INADM décide de l'inadmissibilité ou de l'admissibilité de l'ensemble résultant, figure V-3. Lorsque les caractéristiques de ce dernier ne permettent pas une exécution séquentielle de toutes les tâches, l'ensemble formé par la liste S(ind\_s).liste, est inadmissible. C'est pourquoi, le paramètre inadm de chaque tâche doit être mis à 1 afin de signaler que cette dernière appartient à au moins un sous-ensemble minimal strictement inadmissible. Cette information est nécessaire afin d'afficher tous les sous-ensembles minimaux strictement inadmissibles, sans distinction afin d'éviter de les conserver en mémoire. Enfin, la marge marge\_saturation, fixée également à 0, indique le niveau de recouvrement maximal, tolérable par l'opérateur humain.

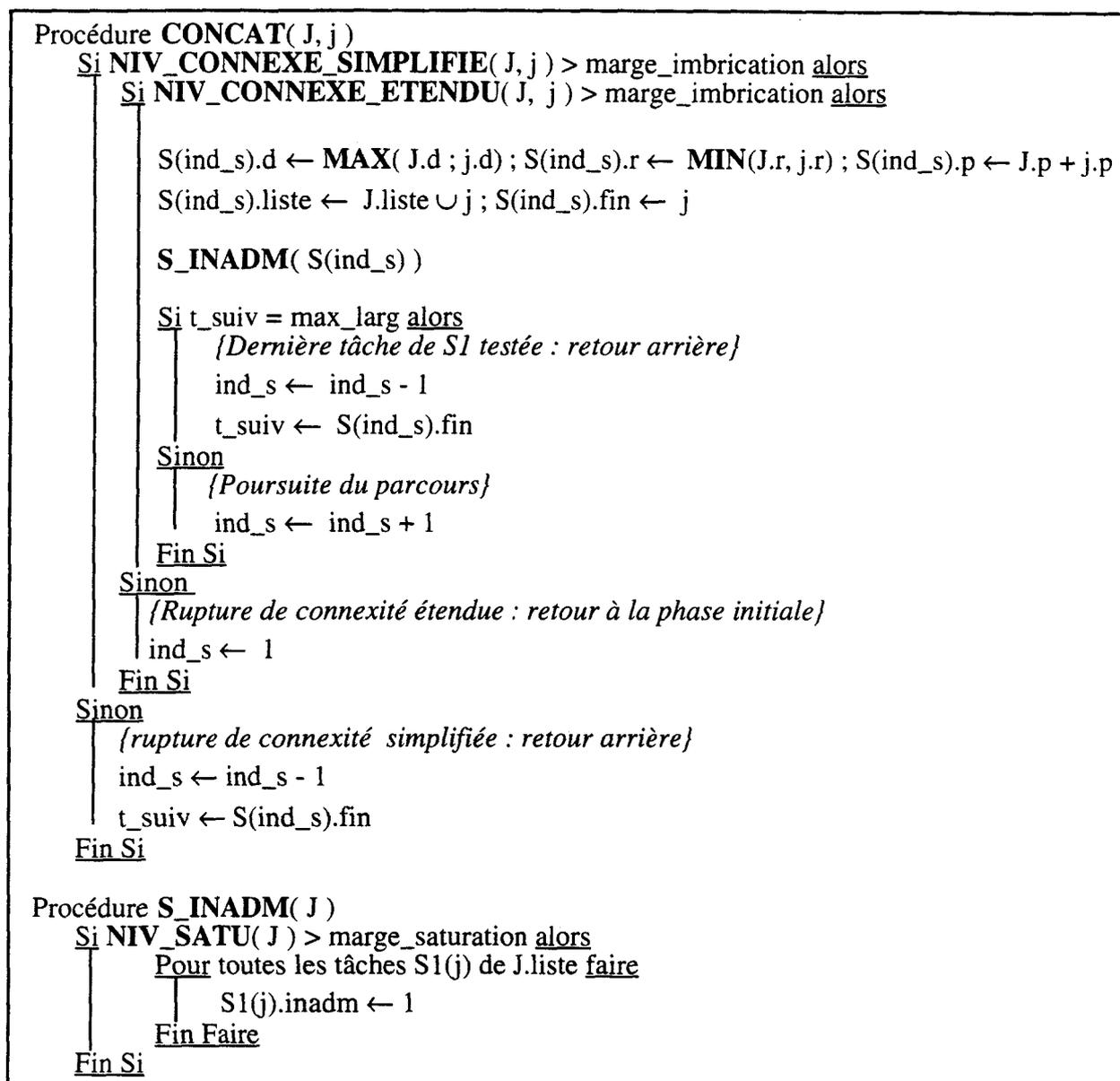


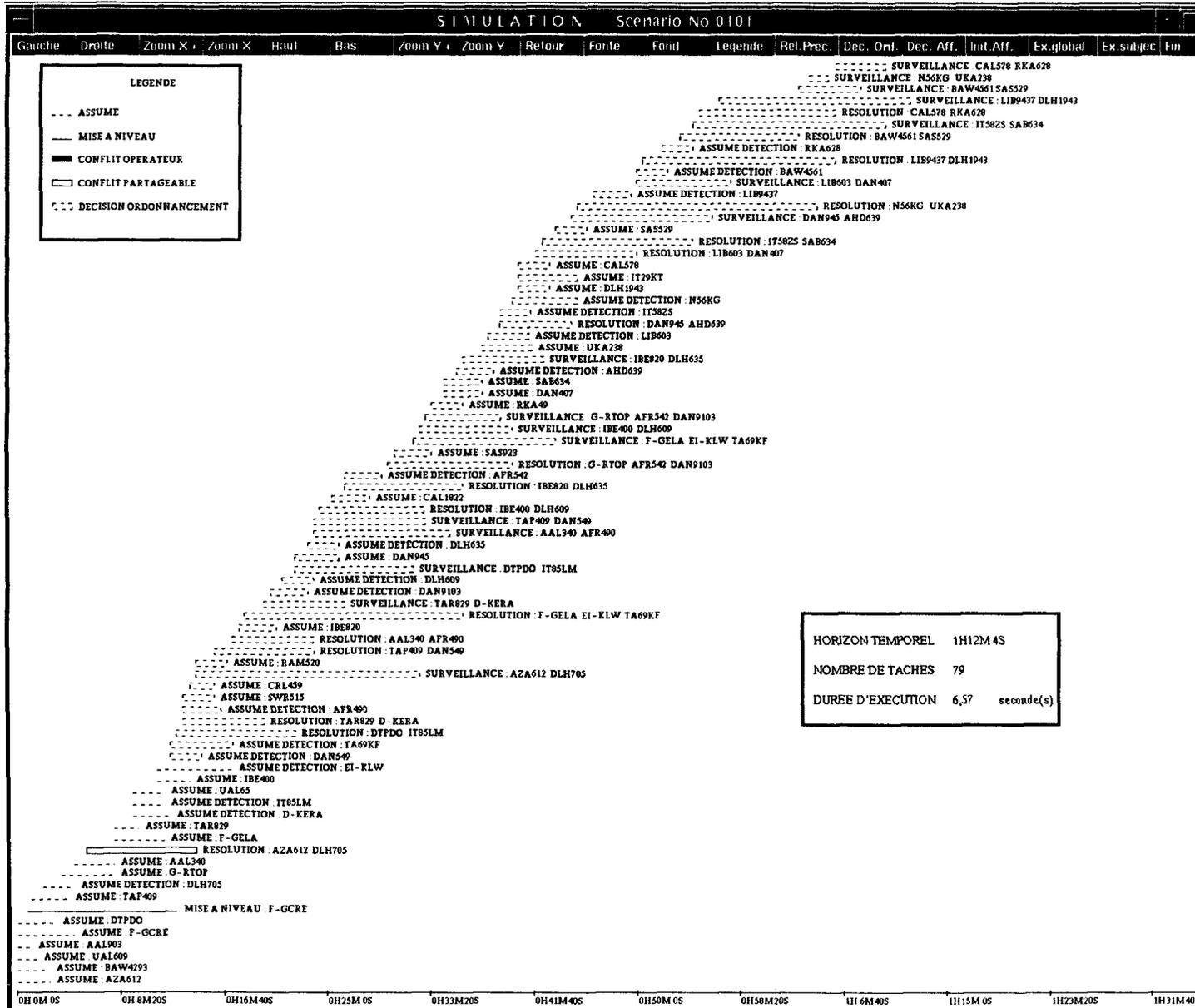
Figure V-3 : Primitives de base pour les décisions d'ordonnancement.

L'algorithme pour les décisions d'ordonnancement a été mis en œuvre. Il est écrit en ADA, et exécuté sur une machine indépendante, une Vax Station 4000, modèle 90. Il a été testé à partir d'une interface spécifique, écrite également en ADA sous l'environnement X11, figure V-4.

Celle-ci permet de visualiser toutes les tâches, partageables ou non, avec leur libellé, leur lien, et leur durée disponible. Elle illustre donc simplement la démarche décisionnelle de l'ordonnanceur dynamique, sans être en aucun cas un exemple d'interface éventuelle pour le contrôleur organique! Elle se base sur le chronogramme de la figure V-1 et ne prend pas en compte les erreurs commises par le contrôleur testé au cours de l'expérimentation avec SPECTRA.

La caractérisation des tâches sélectionnées affiche, avec des rectangles indiqués en pointillé, toutes les tâches impliquées dans au moins un sous-ensemble minimal strictement inadmissible. Lors de la caractérisation des sous-ensembles de tâches, nous ne nous sommes pas préoccupés des marges d'imbrication et de saturation qui ont été mises, rappelons-le, à 0.

Figure V-4 : Décisions d'ordonnement.



Il convient de noter que lors des premiers tests, effectués sur des tâches fortement connexes, c'est-à-dire telles que, par exemple, les paramètres  $d$  et  $r$  des tâches sont pratiquement égaux, l'algorithme provoque une saturation évidente du calculateur au-delà d'une vingtaine de tâches. Mais ces types de tâches testées sont peu réalistes dans le contexte du contrôle du trafic aérien. En revanche, les tâches engendrées par le scénario de la figure V-1, bien que considéré comme relativement chargé par les contrôleurs, présentent une décomposition en escalier. Les phases de ruptures de connexité ont donc pu être exploitées, et les temps de réponse sont de ce fait beaucoup plus abordables.

Afin d'illustrer les performances de l'algorithme, l'exemple de la figure V-4 résulte d'une caractérisation en moins de 7 secondes, de 79 tâches, sur un horizon temporel de plus d'une heure. Comme cet exemple présente une complexité très élevée par rapport aux situations réelles où l'horizon temporel du contrôleur organique n'est que d'une vingtaine de minutes, et donc où le nombre de tâches (et de conflits) est réduit d'autant, on peut considérer que les performances de l'algorithme sont hautement satisfaisantes.

Les caractéristiques algorithmiques du module d'ordonnancement se retrouvent dans le système d'affectation qui est maintenant abordé.

### 1.2.2. Décisions d'affectation

Le système d'affectation permet de partitionner systématiquement chaque sous-ensemble strictement inadmissible. Dans l'algorithme correspondant, figure V-5, les décisions d'affectation effectuées au cours des étapes antérieures ne sont pas remises en cause. C'est pourquoi, à chaque phase, les tâches déjà affectées au calculateur ne sont pas prises en compte.

De plus, le traitement peut avoir lieu tant qu'il existe encore des tâches partageable. C'est pourquoi, une variable `nb_tache_partageable` a été ajoutée. Elle indique le nombre de tâches partageables qui restent affectées à l'opérateur humain. Elle est donc initialisée au nombre de tâches partageables de  $S_1$ , affectées au départ à celui-ci.

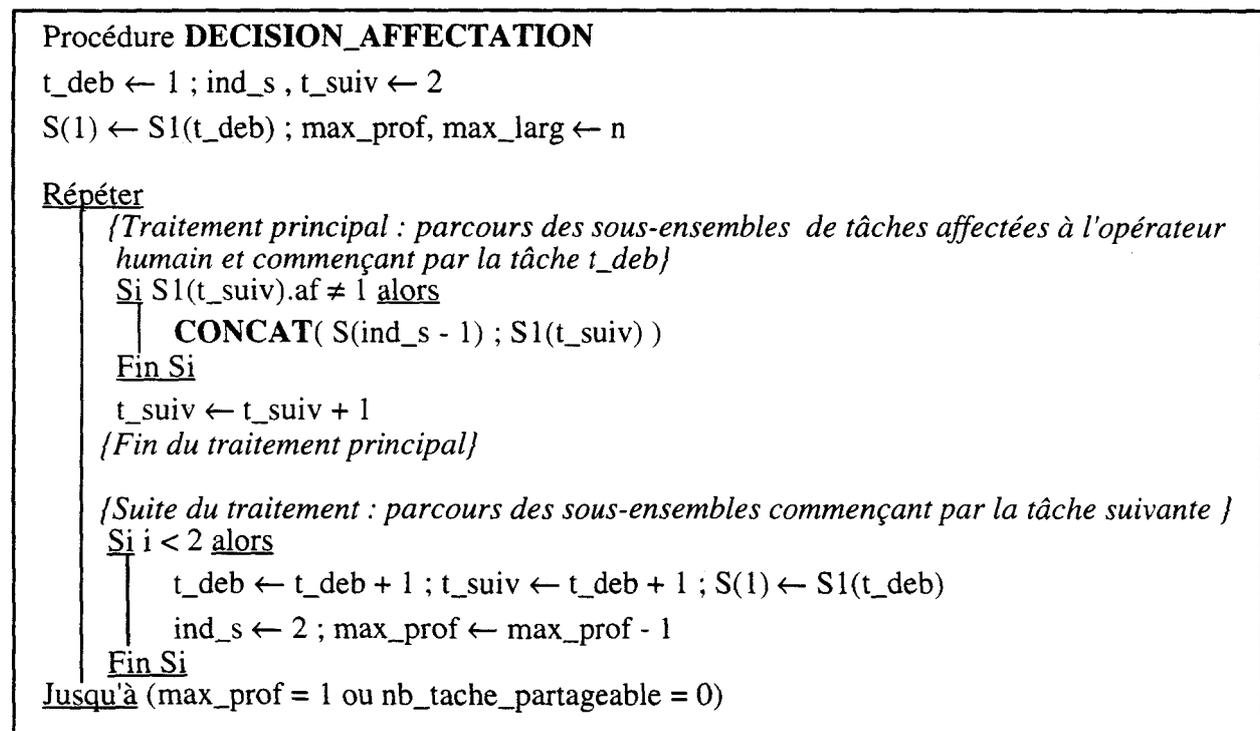


Figure V-5 : Algorithme principal pour les décisions d'affectation.

Une modification supplémentaire apparaît dans la procédure S\_INADM qui fait appel à la procédure PARTITION(J) pour partitionner l'élément strictement inadmissible J, figure V-6.

```
Procédure S_INADM( J )
  Si NIV_SATU( J ) > marge_inadmissibilité alors
    PARTITION( J )
  Fin Si

Procédure PARTITION( J )
  { Politique d'affectation : LIFO (dernière tâche partageable insérée dans S(ind_s).liste,
  première tâche affectée au processeur) }
  Si S1( S(ind_s).fin ).pa ≠ 1 alors
    rechercher l'indice i de S, pour i allant de ind_s à 1, pour lequel S1( S(i).fin ).pa = 1
    ind_s ← i
  Fin Si
  num ← S(ind_s).fin
  S1(num).af ← 1

  { Affectation de la tâche liée à S1(num) }
  rechercher l'indice i de S1, pour lequel S1(num).lien = S1(i).lien et num ≠ i
  S1(i).af ← 1

  { Mise à jour des variables globales pour la reprise du traitement dans CONCAT }
  rechercher l'indice j, pour j allant de 1 à ind_s, pour lequel S(j).fin = MIN(num ; j)
  t_suiv ← S(j).fin
  ind_s ← j - 1
  nb_tache_partageable ← nb_tache_partageable - 2
```

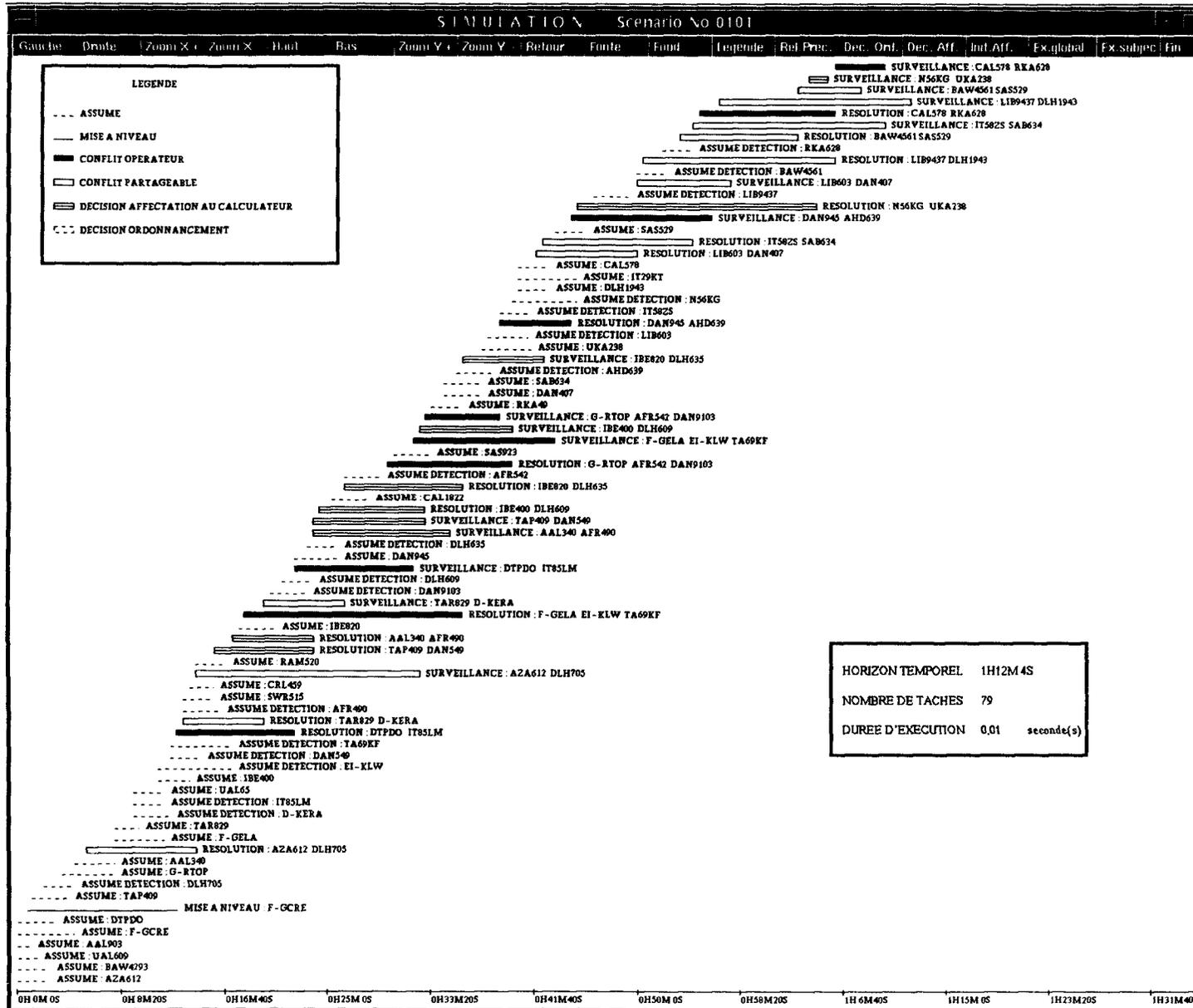
Figure V-6 : Primitives de base pour les décisions d'affectation.

Si aucune tâche n'est partageable, le traitement ignore le sous-ensemble J et passe à l'étape suivante. Par contre, lorsqu'il existe au moins une tâche partageable, nous avons choisi arbitrairement le critère LIFO qui affecte la dernière tâche partageable de J au coprocesseur (SAINTEX). De plus, l'affectation de ce type de tâche entraîne également l'affectation des tâches qui lui sont liées puisque dans le contrôle du trafic aérien, la résolution et la surveillance d'un conflit sont indissociables. Par conséquent, pour un même conflit, lorsque l'une d'entre elles doit être allouée à SAINTEX, l'autre l'est aussi.

C'est pourquoi, dans le traitement du partitionnement, la recherche des tâches indissociables est nécessaire, d'une part pour modifier les paramètres d'affectation correspondants, et d'autre part pour mettre à jour les différentes variables globales afin de poursuivre le traitement principal. Ainsi, après chaque décision d'affectation, il faut réinitialiser l'indice ind\_s et se placer sur celui pour lequel S(ind\_s).fin correspond au numéro de la tâche partageable qui est placée en premier dans S1. Le traitement reprend alors avec le numéro t\_suiv = S(ind\_s).fin. Celui-ci sera incrémenté dans CONCAT. De plus, pour des raisons de souplesse de mise en œuvre des algorithmes, nous décrétons ind\_s qui reprendra sa valeur d'origine dans la procédure CONCAT. Cette démarche nous évite ici de modifier cette dernière.

Comme pour les décisions d'ordonnancement, l'algorithme a été écrit en ADA et testé à partir du même type d'interface, figure V-7.

Figure V-7 : Decisions d'affectation.



Pour les tâches caractérisées par le module décisionnel d'ordonnancement, les décisions d'affectation ont été générées. Elles permettent d'une part de rompre rapidement la connexité entre les tâches. C'est pourquoi, les temps de réponse deviennent très négligeables (pour l'exemple de la figure V-7 : 0.01 seconde). D'autre part, elles permettent de résoudre les situations inadmissibles, en affectant plusieurs conflits à SAINTEX. Sur la figure V-7, ces propositions d'affectation (indiquées par des rectangles vides doublés) laisse au contrôleur la charge d'autres conflits non partageables (indiqués par des rectangles pleins), et partageables (indiqués par des rectangles vides). Elle permet néanmoins d'éliminer tous les sous-ensembles inadmissibles. Ainsi, pour cet exemple, le nombre de tâches partageables est tout à fait correct.

L'ordonnanceur, constitué du système d'ordonnancement pour la caractérisation des sous-ensembles strictement inadmissibles minimaux et du système d'affectation pour le partitionnement de chacun d'entre eux, est donc satisfaisant. Conformément à un formalisme simplifié de la tâche de contrôle, le scénario testé présente un niveau de complexité très largement supérieur à celui que le contrôleur organique gère en réalité, même au cours de situations surchargées. Toutefois, malgré ce contexte particulièrement complexe, les algorithmes mis en œuvre permettent de simuler des décisions d'ordonnancement et d'affectation, avec des temps de réponse non contraignants.

Par conséquent, l'ordonnanceur dynamique peut être intégré dans le mécanisme d'adaptation de la répartition des tâches entre le contrôleur radar et SAINTEX, pour la mise en œuvre d'une coopération multiniveau biposte. Celle-ci fait l'objet des différentes perspectives de recherche que nous abordons maintenant.

## **2. Perspectives**

Plusieurs perspectives de recherche sont envisageables. Elles concernent des objectifs à plus ou moins long terme. D'une part, il s'agit de mettre en place l'organisation de la nouvelle plate-forme expérimentale. Plusieurs modules qui la constituent sont alors précisés dans la suite, avant d'évoquer les perspectives expérimentales possibles. Enfin, à partir de la nouvelle organisation multiniveau proposée pour une position de contrôle, une extension est possible afin d'optimiser l'activité de l'ensemble des postes. Ainsi, pour le contrôle aérien par exemple, un système d'assistance pourrait aider le chef de salle à organiser l'utilisation des positions de contrôle.

### **2.1. Mise en œuvre d'une coopération multiniveau sur une position de contrôle**

Pour le mode explicite implanté dans un poste de contrôle quelconque, la répartition des tâches est une charge supplémentaire affectée à l'opérateur humain qui peut éventuellement mal exploiter l'outil d'aide. Cependant, sa mise en œuvre est facile, contrairement au mode implicite qui décharge certes l'opérateur humain de la tâche de répartition mais pour lequel il n'est pas évident de trouver le mécanisme d'adaptation adéquat. Ces remarques se confirment avec les résultats de la première campagne expérimentale sur SPECTRA.

Ces inconvénients de mise en œuvre ou d'utilisation des modes de répartition intégrés dans un système homme-machine peuvent être contrecarrés avec une coopération multiniveau à partir d'une gestion externe ou mixte du répartiteur de tâche. La démarche à suivre pour l'élaboration de la future plate-forme doit permettre de spécifier l'environnement multiposte d'une position de contrôle, et définir le degré d'automatisation, le niveau de coopération et les interfaces adéquates pour chaque poste de travail correspondant.

Ainsi, pour le niveau tactique, un système d'aide à la résolution et au suivi des conflits, c'est-à-dire SAINTEX, est intégré dans le poste de contrôle radar. La plate-forme correspondante a donné lieu à la première phase expérimentale pour l'étude de faisabilité d'une répartition dynamique des tâches entre le contrôleur radar et SAINTEX, présenté au chapitre III. Les

résultats obtenus sont très encourageants, malgré les imperfections du mode explicite et du mode implicite.

Afin de contourner ces dernières et d'élaborer une organisation biposte plus proche de la réalité, une nouvelle plate-forme expérimentale est en cours de création, figure V-8. Celle-ci présente les caractéristiques d'une position de contrôle. Elle intègre donc un niveau supplémentaire dans lequel le contrôleur organique est assisté par un module d'aide à la régulation du flux du trafic dont le contrôleur radar aura la charge. Il s'agit plus exactement de l'ordonnanceur dynamique qui permet de proposer un partage optimal de tâches tactiques entre le contrôleur radar et SAINTEX.

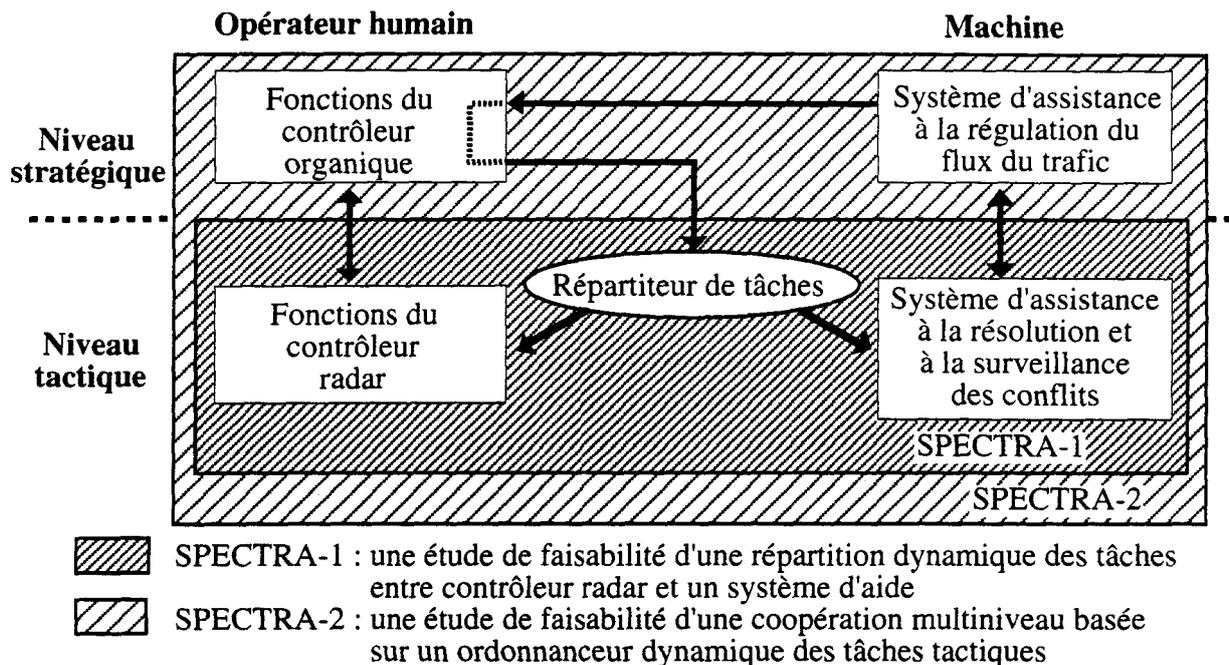


Figure V-8 : Organisation homme-machine biposte de la future version de SPECTRA.

A partir de cette configuration de base, les différents interconnexions sont maintenant précisées.

## 2.2. Structure de commande de la nouvelle organisation

L'architecture globale retenue pour la nouvelle version de SPECTRA, figure V-9, reprend les caractéristiques principales de la première plate-forme, présentées dans le chapitre III. Cependant, elle prend en compte la gestion intra-secteur et extra-secteur que le nouveau simulateur de vol MASS, développé par le CENA, permet. De plus, pour la politique d'allocation des tâches tactiques, elle intègre les modules de l'ordonnanceur dynamique. Ce dernier comporte une phase de prédiction des tâches en fonction d'un formalisme prédéfini, et une phase décisionnelle pour la caractérisation et l'affectation de celles-ci.

Le formalisme en question repose sur l'ensemble des paramètres qui caractérisent les tâches. Il décompose le contrôle et le suivi des avions depuis leur entrée dans le secteur géré par une position de contrôle, jusqu'à leur sortie et a déjà été détaillé précédemment. Nous pouvons reprendre, à partir de la balise d'entrée dans le secteur, les principes proposés pour la modélisation d'une intégration d'un nouveau vol, pour la détection d'un conflit, pour la mise à niveau d'un avion non conflictuel. D'autre part, les butées temporelles pour le transfert de fréquence s'appuient sur la balise de sortie de secteur, au delà de laquelle l'avion passe sous la responsabilité du secteur suivant. Toutefois, il reste à préciser les contraintes pour la caractérisation des conflits.

A cet effet, les paramètres de début au plus tôt et de fin au plus tard de l'ensemble des tâches sont obtenus à partir des données temporelles émanant de la prédiction. Celle-ci est basée sur l'extrapolation des trajectoires des avions et doit prendre en compte toutes les perturbations éventuelles, ainsi que les modifications générées par le contrôleur radar. Elle exploite les estimations temporelles qui indiquent les dates de passage à travers les balises du secteur contrôlé, et qui sont issues du simulateur de trafic aérien à partir du plan de vol. Toutefois, elle doit prendre en compte les incertitudes sur les différents paramètres de vol, dues par exemple aux aléas météorologiques. C'est pourquoi, un conflit est détecté si les distances minimales de séparation calculées par extrapolation passent en dessous de limites définies en fonction d'une part des séparations minimales réglementaires et d'autre part des incertitudes. La date au-delà de laquelle un conflit n'est plus résoluble, et celle à partir de laquelle un avion peut être remis sur sa route initiale pourront être ainsi calculées.

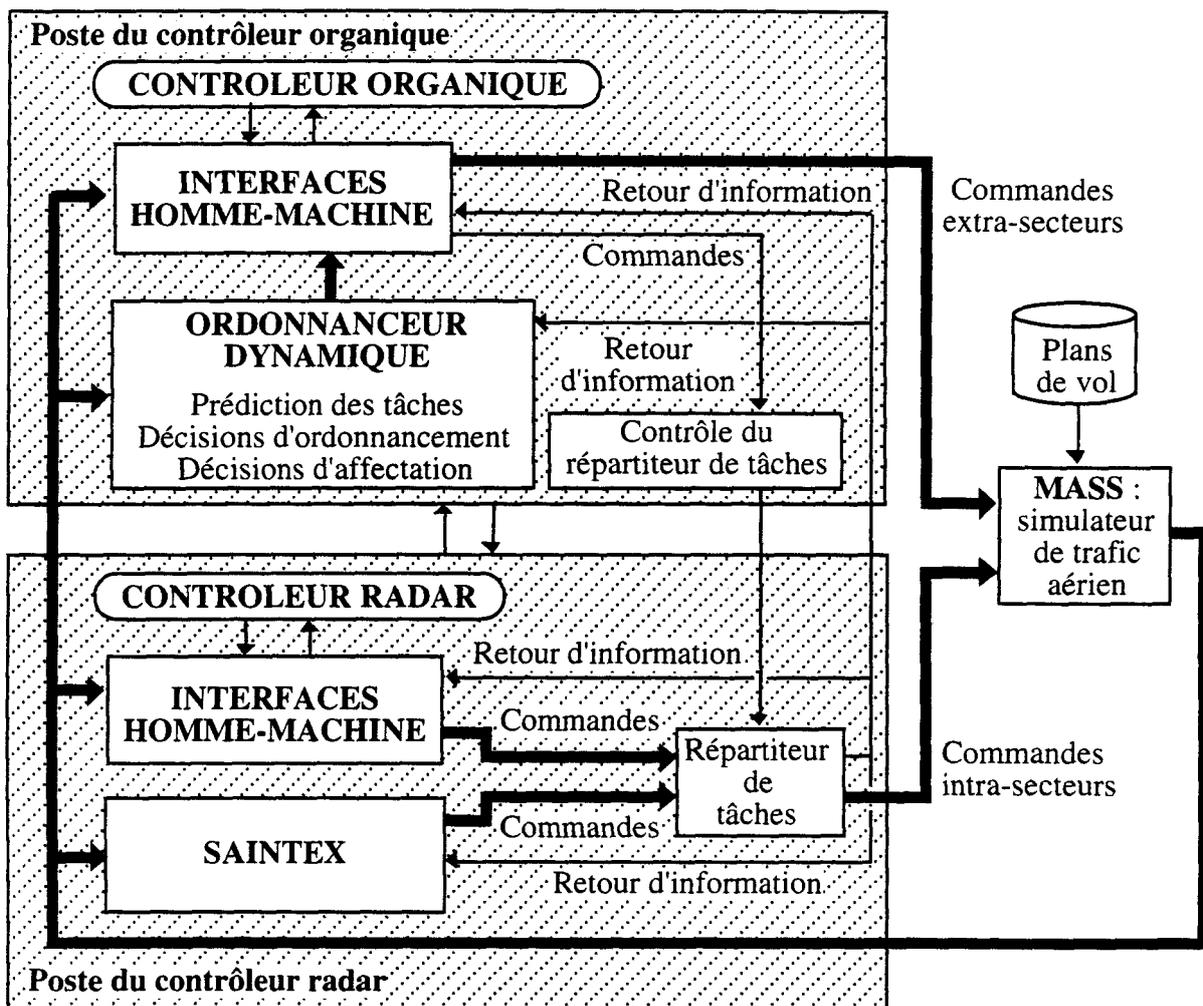


Figure V-9 : Structure de commande intégrée dans SPECTRA pour une coopération multiniveau.

Il faut toutefois distinguer les "vrais conflits" des "faux conflits". A ce propos, il est possible de reprendre la classification proposée dans /Leroux, 91/, et basée sur la théorie des possibilités qui permet à l'auteur d'une part de représenter l'imprécision, et d'autre part de quantifier l'incertitude. La caractérisation des conflits regroupe les avions en deux sous-ensembles distincts. Le premier est la ZIP, Zone d'Interférence Potentielle. Elle permet de construire une enveloppe de trajectoires pour chaque avion à partir de laquelle tous les avions qui peuvent troubler la résolution normale d'un conflit sont retenus. Elle est incluse dans la

seconde, l'EAI, Ensemble des Avions Interférant qui comprend les conflits certains ou potentiels. Pour les conflits probables, les butées temporelles seront alors approximatives.

Quoiqu'il en soit, l'évaluation de l'ensemble des contraintes temporelles des conflits complexes est très délicate. Même si certains problèmes générés par un avion quelconque peuvent être résolus par le contrôleur organique en collaboration avec le secteur d'origine, une solution reste envisageable. En effet, il s'agit d'exploiter la nouvelle approche développée dans SAINTEX qui calcule les trajectoires 4D des avions, /Angerand et al, 92/. Chacune de ces dernières est définie par une route horizontale et une série de contraintes verticales du type (FL, t) qui signifient que l'avion correspondant ne sera pas autorisé à dépasser le niveau FL avant l'instant t. Ainsi, à partir des paramètres d'entrée d'un vol et des incertitudes sur ces données, cette démarche permet de déterminer le volume d'incertitude dans lequel un avion évoluera, pendant sa traversée dans le secteur correspondant. Tous les conflits peuvent alors être interprétés comme l'intersection des volumes d'incertitude. La prédiction peut par exemple prendre en compte les paramètres issus de la première méthode pour les conflits stables, et ceux de la seconde pour les conflits évolutifs, afin d'en déterminer les contraintes temporelles correspondantes. Les zones interdites définies par les couples (FL, t) correspondraient alors à des barrières temporelles durant lesquels aucune action en niveau n'est possible pour les avions évolutifs.

De plus, cette méthode en cours de validation, permettrait d'augmenter les capacités intrinsèques de SAINTEX. Elle est en effet confrontée à plusieurs méthodes qui sont détaillées dans /Angerand et al, 92/. La première, basée sur l'intelligence artificielle, consiste à augmenter la base de connaissance pour les différents types de conflits existants. La seconde s'appuie sur l'approche 4D qui, lorsqu'un conflit est détecté, recherche une nouvelle trajectoire 4D sans conflit et optimale. La troisième est une combinaison des deux premières. L'amélioration de SAINTEX, adapté à notre application, fait donc également partie des perspectives de notre recherche.

Les durées d'exécution minimales seront déterminées empiriquement. Leur évaluation se basera néanmoins sur des pré-expérimentations avec des contrôleurs, selon des scénarios qui mettent en jeu les principales tâches modélisées, pour une situation de trafic normal. Elles formeront un modèle normatif pour l'exécution des tâches.

Quant aux interfaces, elles reprennent les spécifications intégrées dans PHIDIAS, /Phidias, 91/. Chaque poste de contrôle contient donc un écran radar et un stripping électronique. De plus, il reste à déterminer la manière dont les informations issues de l'outil d'assistance que nous proposons au niveau stratégique doivent être présentées. Pour l'instant, notre choix s'est orienté sur un troisième écran qui indiquera, par niveau, l'évolution de l'ensemble des avions depuis leur entrée dans le secteur jusqu'à leur sortie, avec les zones de conflit, ainsi que les affectations proposées et les zones inadmissibles restantes.

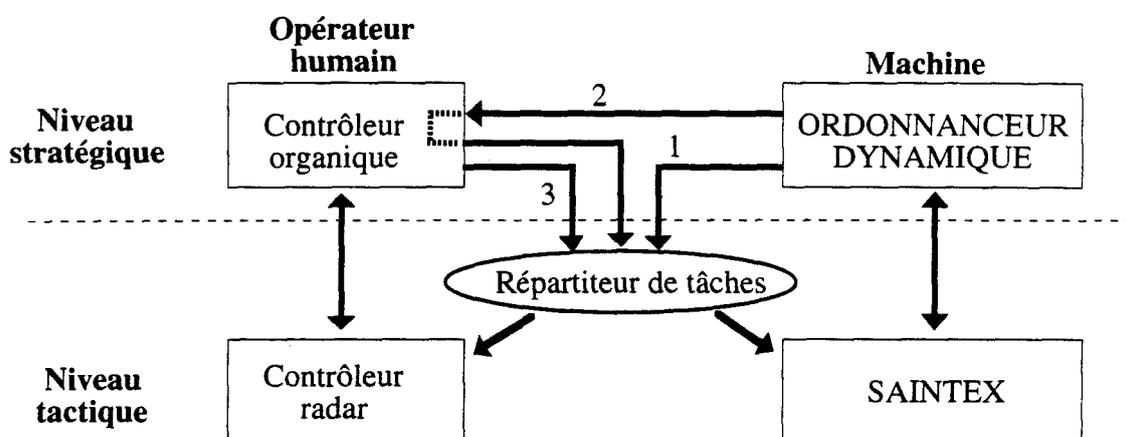
Enfin, il faut noter que la configuration décrite ici servira de base pour la mise en œuvre d'une coopération multiniveau dans un environnement multimédia, dans le cadre du projet SWIFT, /Dujardin, 93/. Celui-ci a une envergure européenne et cherche à normaliser les supports techniques pour le contrôle du trafic aérien et à déterminer les spécifications des futures positions de contrôle. C'est pourquoi, il se base d'une part sur les caractéristiques des interfaces de PHIDIAS et d'autre part sur les principes de coopération homme-machine, comme ceux étudiés dans SPECTRA.

Un protocole expérimental, similaire à celui présenté dans le chapitre III, doit alors permettre de déterminer l'impact d'une telle coopération multiniveau dans le contrôle du trafic aérien.

### 2.3. Perspectives expérimentales

Afin de valider notre concept, nous proposons plusieurs expérimentations envisageables, sans détailler le protocole expérimental, /Vanderhaegen et al, 94/, figure V-10 :

- Tout d'abord, indépendamment de la nouvelle interface pour le niveau stratégique, la première expérimentation s'apparente au mode implicite, avec une modification de la politique d'allocation, figure V-10-1. Elle apportera des premières conclusions quant à l'efficacité de l'ordonnanceur dynamique.
- La seconde est l'intégration de l'ordonnanceur dynamique sous forme d'une coopération verticale dans le poste de contrôle organique, figure V-10-2. Elle permettra de compléter les conclusions obtenues par le premier type d'expérimentations. De plus, elle indiquera l'efficacité du support informationnel propre aux données issues de l'ordonnanceur dynamique.
- La dernière expérimentation permettra de mettre en œuvre une répartition dynamique des tâches tactiques, sans la connexion de l'ordonnanceur dynamique, figure V-10-3.



- 1 - Amélioration de la politique d'allocation dans le mode implicite
- 2 - Coopération homme-machine verticale
- 3 - Sans aucune assistance

Figure V-10 : Perspectives expérimentales.

Dans l'ensemble de ces expérimentations, plusieurs modes de répartition peuvent être étudiés. En effet, la gestion de la répartition des tâches tactiques pourra être soit gérée entièrement par le niveau stratégique, soit assistée par celui-ci. Par exemple, dans le cas d'une gestion mixte, le contrôleur radar pourra commander en ligne le répartiteur de tâche afin de remettre en question les affectations initiales issues du niveau supérieur. Par conséquent, un délai d'affectation au-delà duquel le niveau stratégique ne peut plus revenir sur ses décisions, permettra d'éviter les conflits décisionnels d'allocation de tâches entre les deux niveaux.

L'architecture générale de SPECTRA devra alors comprendre les connexions adéquates pour intégrer à la fois la gestion interne du répartiteur de tâches, effectuée par le niveau stratégique, et la gestion interne, réalisée par le niveau tactique. Toutefois, celle-ci semble inutile dans la mesure où la communication homme-homme interposte pourra influencer l'affectation effective finale. En effet, du fait de la proximité des postes de contrôle, il suffit d'autoriser le contrôleur organique à modifier l'affectation effective, à la demande du contrôleur radar. Ainsi, le système global évolue d'un ordonnancement de haut niveau pour une affectation prévisionnelle, vers un ordonnancement de bas niveau pour une affectation effective qui pourra éventuellement être modifiée.

Les différents recueils de données subjectives et objectives doivent également être envisagés, pendant les expérimentations. Le calcul des exigences de tâches, élaboré dans l'étude précédente peut être repris afin d'étudier l'impact de l'ordonnanceur dynamique sur la régulation de l'activité du contrôleur radar. Il permettra également de comparer l'ensemble des résultats. De plus, un historique complet sur les décisions du contrôleur organique, du contrôleur radar, de l'ordonnanceur dynamique doit être sauvegardé afin par exemple :

- d'analyser les décisions de l'ordonnanceur par rapport à celles éventuellement antagonistes, des contrôleurs radar et organique,
- de valider le module de prédiction, ainsi que le formalisme des tâches proposé,
- de comparer les niveaux d'exigences fonctionnelles et les niveaux d'exigences temporelles des tâches afin d'essayer d'établir une méthode d'évaluation de la charge de travail des contrôleurs aériens,
- ou encore d'étudier l'influence des niveaux d'imbrication des tâches et/ou de saturation des tâches sur le comportement des contrôleurs.

La validation des concepts intégrés dans SPECTRA pourra être complétée par des méthodes subjectives, similaires à celles utilisées pour la première campagne expérimentale. Ainsi, des méthodes de calcul a posteriori et en ligne de la charge de travail, comme TLX, ou comme l'échelle divisée en plusieurs cases sur laquelle les contrôleurs devaient évaluer leur niveau de charge, peuvent être reprises. Différents types de questionnaires, pour l'évaluation des scénarios, des interfaces, des outils d'aide pourront également être réutilisés. Ils pourront de plus permettre de valider le critère de partitionnement utilisé dans l'ordonnanceur dynamique, et/ou d'analyser les différents critères d'affectation en fonction d'une situation donnée. En outre, il serait intéressant que le contrôleur organique évalue son propre travail ainsi que celui du contrôleur radar afin de confronter les résultats avec les impressions de ce dernier. En fait, plusieurs techniques de verbalisation pourront être utilisées, /Abed, 90/ :

- Les verbalisations simultanées permettent d'obtenir des explications en même temps que le déroulement du travail.
- Les verbalisations interruptives demandent à l'opérateur de faire le point sur l'ensemble de sa situation, mais seulement de temps en temps.
- Les verbalisations différées sont des réponses à des questions posées après une expérimentation.
- Les verbalisations d'auto-confrontation sont des verbalisations différées particulières. Elles s'appuient sur les explications de l'opérateur humain qui commente ses activités enregistrées au cours de l'expérimentation.

Enfin, diverses autres méthodes subjectives et objectives, évoquées dans le deuxième chapitre de ce mémoire, comme par exemple, des méthodes d'analyse des communications fonctionnelles ou de l'activité oculaire, /Abed, 90/, peuvent être appliquées. Par conséquent, des choix devront être effectués afin d'éviter d'obtenir un trop grand nombre d'expérimentations qui entraînerait inévitablement une comparaison fastidieuse et peut-être inutile des résultats.

Toujours dans le cadre d'une coopération multiniveau, mais dans un horizon plus lointain, une autre perspective concerne l'intégration d'un niveau supplémentaire pour une nouvelle organisation multiposte, dans une salle de contrôle, chaque position de travail étant configurée comme nous l'avons décrite précédemment.

#### **2.4. Vers une nouvelle organisation multiposte dans une salle de contrôle**

Il s'agit en effet d'optimiser la mise en service des positions de contrôle sur un horizon temporel à moyen terme. En fait, l'organisation multiniveau et multiposte correspondante comprendrait un niveau décisionnel supplémentaire, géré par le chef de salle, figure V-11. L'outil d'assistance du poste de contrôle de celui-ci aurait des objectifs à moyen terme et concernerait la programmation de l'activation et de l'inactivation de chaque position de contrôle.

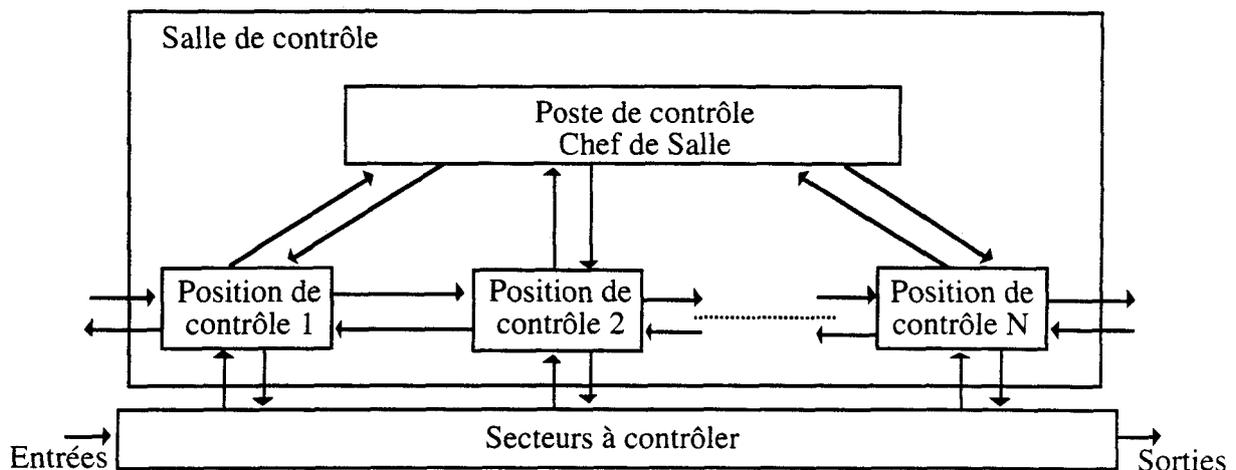


Figure V-11 : Organisation multiniveau multiposte dans une salle de contrôle.

Le problème s'apparenterait alors à un problème à  $n$  machines, pour lequel celles-ci seraient les positions de contrôle qui ne peuvent contenir en permanence plus d'un certain nombre prédéfini d'avions. De plus, l'outil d'aide pourrait proposer en fonction du trafic futur un découpage optimal des secteurs contrôlés. Ce niveau s'intégrerait donc entre le niveau quantitatif et stratégique de régulation du contrôle aérien et le niveau qualitatif et stratégique géré par le contrôleur organique.

## Conclusion

Ce chapitre a montré la faisabilité technique de l'ordonnanceur dynamique et a proposé une perspective d'étude de validation de la coopération multiniveau qui en résultera.

La première partie a évalué la faisabilité technique de la nouvelle politique de répartition des tâches partageables. En effet, à partir de scénarios retraçant des expérimentations effectuées sur la première version de la plate-forme SPECTRA, un ensemble réaliste de tâches de contrôle a été formalisé. Il nous a permis de mettre en œuvre les algorithmes de l'ordonnanceur dynamique. Celui-ci exploite les ruptures de connexité entre les tâches et n'a besoin, pour un ensemble de  $n$  tâches, que d'une structure de données contenant seulement  $n$  éléments. Ceci résout le problème de l'encombrement mémoire. De plus, les décisions d'affectation accélèrent le phénomène de rupture de connexité. Ceci permet d'obtenir des temps de réponse tout à fait acceptables. Il faut enfin noter que le scénario testé était très représentatif des tâches réelles du contrôle du trafic aérien, et même beaucoup plus complexe que dans la réalité.

La seconde partie a énuméré l'ensemble des perspectives de recherche que notre étude peut entraîner. D'une part, il s'agit de perspectives à court terme pour la mise en œuvre de la nouvelle plate-forme de SPECTRA qui simulera les tâches d'une position de contrôle. Les spécifications des outils d'aide pour chaque niveau décisionnel serviront de base pour l'étude d'une répartition dynamique des tâches tactiques dans un environnement biposte et multimédia, dans le cadre d'un projet européen. Un protocole expérimental en a par ailleurs été évoqué afin de valider les principes de base d'une coopération multiniveau basée sur un ordonnanceur dynamique.

Enfin, dans le même genre d'idée, une autre organisation pour la gestion globale d'une salle

de contrôle a été proposée. Il s'agit d'un système d'aide visant à assister le travail du chef de salle pour l'optimisation de l'utilisation des positions de contrôle.

Il convient de souligner que les principes de coopération multiniveau tels qu'ils ont été présentés ne sont pas propres au contrôle aérien et peuvent s'appliquer à d'autres domaines, comme la téléopération ou la gestion de production.

---

## CONCLUSION GENERALE

---

Dans le contrôle et la supervision des systèmes complexes, deux entités distinctes interagissent. La première concerne les systèmes automatisés capables parfois de remplacer totalement les opérateurs humains qui constituent la seconde. Toutefois, même si la technologie d'aujourd'hui permet l'automatisation complète ou partielle de certains procédés, elle reste insuffisante pour automatiser certaines tâches de résolution de problème complexe qui nécessitent la présence humaine. De plus, celle-ci reste indispensable dans la mesure où un système automatisé n'est pas entièrement infaillible, et peut devenir incompétent face à des dysfonctionnements imprévisibles.

Une automatisation excessive empêcherait donc les opérateurs humains d'entretenir leur représentation mentale du procédé qu'ils contrôlent et risquerait de nuire à la sécurité du système. Une solution plus souple consiste alors à mettre en œuvre une coopération homme-machine, en intégrant dans le système, des outils d'assistance spécifiques avec lesquels l'opérateur humain coopère. En outre, ces outils d'assistance facilitent la régulation de l'activité humaine, et permettent à l'opérateur de rester compétent et de pouvoir intervenir efficacement en cas de problème.

Notre travail est une contribution à une forme de coopération homme-machine particulière. D'une part, il vise une répartition dynamique des tâches entre un opérateur humain et un système d'aide, et d'autre part, il intègre un contexte de travail comprenant plusieurs niveaux décisionnels humains. Il élabore ainsi les principes d'une coopération homme-machine dite multiniveau, à partir d'une organisation multiposte. En collaboration avec le CENA, nous avons donc mis en œuvre une plate-forme expérimentale afin de réaliser une étude de faisabilité d'une telle coopération dans le domaine du contrôle du trafic aérien.

Tout d'abord, le premier chapitre a présenté les caractéristiques techniques et humaines d'un système homme-machine, ainsi que les diverses communications qui existent dans le système. Parmi ces dernières, nous avons recensé les interactions machine-machine, homme-homme, puis homme-machine qui permettent de définir une organisation homme-machine. Notre étude s'est basée sur les deux modes de coopération homme-machine qui ont été proposés : le mode de coopération verticale et le mode de coopération horizontale.

La coopération verticale met en jeu un système d'aide qui fournit des décisions sous forme de conseils à l'opérateur humain, mais celui-ci reste le supérieur hiérarchique du système. La coopération horizontale place, quant à elle, le système d'aide et l'opérateur humain au même niveau décisionnel, et consiste en une répartition dynamique des tâches entre ces deux entités. La commande du répartiteur de tâche s'appuie alors sur des modèles de l'opérateur humain qui autorégule, par rétroaction et/ou par anticipation, son activité sur deux plans : le plan intensif adapte l'activité par rapport à la charge de travail, et le plan cognitif par rapport à la performance globale du système piloté. Deux modes de répartition sont alors envisageables. Dans le mode explicite, l'opérateur humain est le régulateur de sa propre activité : en fonction de l'évaluation subjective de sa charge de travail et de performance, il commande le répartiteur de tâche. Par contre, dans le mode implicite, il s'agit d'un mécanisme d'adaptation automatique pour lequel plusieurs politiques ont été énumérées.

Toutefois, les études sur la coopération homme-machine se sont trop souvent limitées à une organisation mono-utilisateur, alors que la maîtrise de la complexité du système et les

mécanismes de régulation de l'activité humaine requièrent souvent la présence d'autres opérateurs humains.

Le deuxième chapitre a donc établi les principes d'une coopération homme-machine multiniveau dans un environnement multi-utilisateur. Il se base sur les caractéristiques d'un poste de contrôle qui a alors été redéfini pour les besoins de l'étude. Ce dernier permet de mettre en évidence les différents réseaux de communications intrapostes et interpostes d'une organisation multiposte. Les problèmes du partage des tâches entre plusieurs postes, puis entre l'homme et la machine ont alors été soulevés. Il s'agit par exemple, de l'incomplétude statique et dynamique de la partageabilité, due à la compétence et la disponibilité des décideurs de chaque poste de contrôle, ou encore de la confiance que l'homme accorde aux systèmes d'aide dont il dispose.

Pour la mise en place d'une coopération homme-machine multiniveau, notre propos s'est focalisé sur un système collecticiel particulier intégrant au moins deux postes de contrôle, chacun d'eux comprenant un opérateur humain et un système d'aide. Nous avons ainsi introduit un nouveau concept : la répartition dynamique des tâches assistée ou gérée par un étage décisionnel de niveau supérieur. En effet, dans cette nouvelle approche, la commande du répartiteur qui jusqu'à maintenant pouvait être prise en charge, soit par l'opérateur humain, soit par un mécanisme d'adaptation automatique d'un même poste, est gérée ou assistée par un autre poste.

Nous avons ensuite proposé une architecture globale pour une plate-forme expérimentale, appelée SPECTRA, afin de valider ces nouveaux concepts dans le contrôle du trafic aérien. A partir d'une décomposition empirique originale de ce domaine complexe, issue des concepts des systèmes de gestion de production, nous nous sommes limités à une position de contrôle comportant deux niveaux décisionnels humains, gérés à partir de deux postes distincts. Le premier poste de contrôle concerne le niveau tactique et intègre les tâches du contrôleur radar. Le second représente le niveau stratégique et concerne le travail du contrôleur organique. Chacun des deux postes comporte un système d'assistance prédéfini qui respecte les objectifs de travail de l'opérateur humain correspondant. Pour le poste tactique, il s'agit d'une aide à la conduite et à la commande, alors que pour le poste stratégique, d'une aide à l'ordonnancement. Les démarches pour la mise en œuvre de chacun d'eux ont été détaillées dans les chapitres suivants.

Le troisième chapitre a retracé la totalité d'une campagne expérimentale effectuée sur SPECTRA, pour l'étude monoposte de faisabilité d'une répartition dynamique des tâches entre le contrôleur radar et le système expert SAINTEX. La plate-forme a alors permis de tester et de comparer le mode explicite relatif à une régulation subjective et le mode implicite correspondant à une régulation objective. Celle-ci ne s'est effectuée que sur le plan intensif à partir d'un calcul des exigences des tâches de contrôle qui évalue le niveau de difficulté d'une situation donnée. Les expérimentations ont été réalisées avec neuf contrôleurs professionnels certifiés et six ingénieurs de la navigation aérienne, assimilés à des contrôleurs stagiaires.

Les résultats obtenus sont très encourageants. Ils montrent, entre autres, que ces modes de répartition dynamique explicite et implicite permettent d'une part d'améliorer les performances globales du trafic, et en particulier sa sécurité, et d'autre part de baisser la charge de travail des contrôleurs. Les contrôleurs stagiaires ont obtenu une meilleure performance avec le mode explicite dans lequel beaucoup de tâches partageables ont été allouées à SAINTEX. Cependant, ils ont préféré le mode implicite parce qu'il leur permet de ne pas gérer le partage des tâches. Pour les contrôleurs certifiés, c'est le contraire. Ils n'ont en général pas confiance en SAINTEX. C'est pourquoi, ils lui ont attribué moins de conflits en mode explicite. C'est d'ailleurs le mode qu'ils préfèrent car il leur permet de rester maître de la situation. D'un autre côté, avec le mode implicite, ils ont obtenu de meilleurs résultats. En effet, les décisions d'affectation issues du mécanisme d'adaptation leur ont permis de gérer moins de conflits, d'affiner la résolution de ces derniers, et de mieux superviser l'ensemble du trafic. Pour l'ensemble des contrôleurs, le mode implicite, même si la politique d'allocation est imparfaite, semble néanmoins le plus efficace.

Par conséquent, cette première phase d'évaluation à partir d'une plate-forme simplifiée, mais réaliste, montre l'intérêt d'une répartition dynamique des tâches dans un domaine complexe tel que le contrôle du trafic aérien. Une seconde phase est néanmoins nécessaire afin de faire évoluer SPECTRA vers un environnement de travail encore plus réaliste, et de contrecarrer les divers inconvénients des politiques d'allocation des deux modes de répartition dynamique. A ce propos, le quatrième chapitre a développé une méthode générale d'allocation de tâches entre processeur principal humain et coprocesseur artificiel, basée sur un ordonnanceur dynamique, en vue d'élaborer une coopération multiniveau biposte dans SPECTRA.

La recherche sur le raisonnement temporel humain s'est orientée vers des études sur la génération de plans, sur la planification des actions ou sur l'ordonnancement des tâches. Par rapport aux caractéristiques humaines, nous avons assimilé notre application à un problème d'ordonnancement de tâches à une machine. Celle-ci représente la ressource humaine qui est considérée comme saturée lorsqu'il est impossible pour l'opérateur humain d'exécuter ses tâches séquentiellement, relativement aux contraintes temporelles de chacune d'entre elles. Les sous-ensembles de tâches pour lesquelles les exécutions se chevauchent représentent alors un risque pour la sécurité du système. Ils doivent donc être résolus en affectant certaines tâches au calculateur. La stratégie décisionnelle de l'ordonnanceur dynamique se décompose d'une part en une phase d'ordonnancement qui détecte, pour un nombre fini de tâches, les sous-ensembles strictement inadmissibles minimaux, et d'autre part en une phase d'affectation qui résout ces derniers.

Les problèmes d'ordonnancement et d'affectation sont des problèmes de programmation sous contraintes. Toutefois, la méthode proposée est algorithmique. Elle utilise d'une part les principes généraux de la programmation dynamique pour modéliser les systèmes d'ordonnancement et d'affectation, et d'autre part des heuristiques particulières relatives aux interactions entre les tâches, afin de raccourcir le parcours combinatoire de tous les sous-ensembles. A partir de données obtenues au cours de la première campagne expérimentale sur SPECTRA, ces concepts ont été ensuite validés dans le cinquième chapitre. La méthode décrite permet d'obtenir des temps de réponse et un encombrement mémoire acceptables. Dans une seconde partie, ce dernier chapitre a également proposé diverses perspectives relatives à notre étude.

L'architecture envisageable pour la nouvelle plate-forme expérimentale a donc été précisée. Elle intègre une aide à la résolution et au suivi des conflits dans le poste du contrôleur radar, et une aide à la régulation du trafic dans le poste du contrôleur organique. Pour le premier, il s'agit de SAINTEX, pour le second de l'ordonnanceur dynamique. Celui-ci permet d'effectuer un premier filtrage pour la répartition des tâches tactiques à partir d'une affectation prévisionnelle modifiable et non effective jusqu'à un certain délai prédéfini, et d'une affectation effective que le contrôleur radar subit et que le contrôleur organique sera autorisé ou non à modifier. L'ensemble de ces contraintes relatives à l'affectation des tâches devra être déterminé pour la nouvelle architecture de SPECTRA. Néanmoins, pour le futur protocole expérimental, la phase principale d'évaluation consistera à valider les principes de coopération homme-machine multiniveau biposte, et plus précisément la répartition des tâches tactiques, gérée par le contrôleur organique à partir de l'ordonnanceur dynamique.

Les spécifications pour la nouvelle architecture de SPECTRA serviront de base à un projet européen, appelé SWIFT, qui mettra en œuvre une répartition dynamique des tâches dans un environnement multimédia, pour une position de contrôle. Enfin, ce mémoire s'achève sur une autre perspective plus audacieuse pour le contrôle du trafic aérien. En effet, il s'agit d'une coopération homme-machine multiniveau multiposte dans laquelle le chef de salle, assisté d'un outil d'aide à la gestion prévisionnelle à moyen terme, optimiserait la mise en service des positions de contrôle d'une même salle de contrôle, en fonction des capacités prédéfinies de ces dernières.

---

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

**Abed M., 90**

Contribution à la modélisation de la tâche par des outils de spécification exploitant les mouvements oculaires: application à la conception et l'évaluation des interfaces homme-machine.

Thèse de doctorat, Université de Valenciennes, France.

**Abdennadher N., 91**

Conception de méthodes de placement et d'ordonnement de programmes parallèles sur un système multiprocesseur, évaluation sur un réseau de transputers.

Thèse de doctorat, Université de Valenciennes, France.

**Alabau M., Dechaize T., 92**

Ordonnement temps réel par échéance.

Technique et science informatique, 11, 3, 59-123.

**Allen J.F., 83**

Planning using a temporal world model

8th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Karlsruhe, Germany, pp. 741-747.

**Angerand L., Lejeannic H., 92**

Bilan du projet SAINTEX.

Rapport du CENA, R92009.

**Artiba A., 90**

Contribution à la construction d'un système d'aide à la planification et à l'ordonnement de lignes parallèles multiproduits.

Thèse de doctorat, Université de Valenciennes, France.

**Baindbridge L., 93**

The change in concepts needed to account for human behaviour in complex dynamic tasks.

Proceedings of the IEEE, International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Le Touquet, France, pp. 126-131.

**Baker D. P., Salas E., 92**

Principles for measuring teamwork skills.

Human Factors, 34, 4, 469-475.

**Beaudouin-Lafon M., 92**

Le collectif: vers un nouveau média informatique.

International Conference on Interface to Real & Virtual Worlds, Montpellier, France, pp. 48-51.

**Beka Be Nguema M., Malvache N., 92**

Contributing to the design of a human error tolerant man-machine interface during the control of a simple simulated industrial process.

11th European Annual Conference on Human Decision Making and Manual Control, Valenciennes, France.

**Bisson P., Soulard P., Raimondo A., Aknin P., 92**

Interfaces homme-machine multimodales et adaptatives pour systèmes opérationnels.  
International Conference on Interface to Real & Virtual Worlds, Montpellier, France, pp. 591-603.

**Bœttcher K.L., Levis A.H., 82**

Modeling the interacting decisionmaker with bounded rationality.  
IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 12, 3, pp. 334-344.

**Boudes N., 92**

La gestion cognitive du temps dans les systèmes socio-techniques de contrôle de processus: le cas des contrôleurs de trafic aérien dans le survol national.  
Rapport de DEA, Université Toulouse Mirail, France.

**Bouju F., Spérandio J.C., 78**

Effets du niveau de qualification et de la charge de travail des contrôleurs d'approche sur leurs stratégies opératoires.  
Rapport du CENA, CO7808R57.

**Brosselin S., 92**

Contrôle aérien : les chorégraphes du ciel.  
Approche/Approach, Aéroport de Paris magazine, 7, 58-63.

**Card S., Moran T., Newell A., 83**

The psychology of human-computer interaction (Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale).

**Calvet J.L., Bernussou J., 87**

Décomposition, parallélisme, distribution : méthodes et structures.  
Derniers développements en automatique, informatique, robotique, micro-électronique. Le séminaire du LAAS - CNRS (Cepadues Éditions, Toulouse), pp.41-65.

**Cartignies E., 93**

Outil d'aide à la décision pour la conduite des grands systèmes industrielles : application à la mobilisation de la réserve tertiaire d'Electricité de France.  
Thèse de doctorat. Université de Valenciennes, France.

**Carlier J., Chrétienne P., 88**

Problèmes d'ordonnancement, modélisation - complexité - algorithmes (Masson, Paris).

**Cazenave P., 93**

La fin du pilotage aveugle.  
Science & Vie, 909, 112-116.

**Cellier J.M., 90**

L'erreur humaine dans le travail.  
Les Facteurs Humains de la Fiabilité dans les Systèmes Complexes - J. Leplat et G. de Terssac (eds) (Octarés, Marseille), pp. 193-209.

**Chaib-Draa B., 90**

Contribution à la résolution distribuée de problème: une approche basée sur les états intentionnels.  
Thèse de doctorat, Université de Valenciennes, France.

**Chu Y., Rouse W. B., 79**

Adaptative allocation of decision-making responsibility between human and computer in multitask situations.

IEEE, Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 9, 12, 769-778.

**Courteix-Kherouf S., Navarro C., 92**

Evolutions technico-organisationnelles et modifications de la composante collective dans le travail, cas des IESSA en maintenance opérationnelle dans les CRNA.

XXVIIe congrès de la SELF sur les aspects collectifs du travail, Lille, France, pp 145-148.

**Coutaz J., 90**

Interfaces hommes-ordinateur: conception et réalisation (Dunod, Paris).

**Crevits I., Vanderhaegen F., Debernard S., Millot P., 92**

Etude d'un système de partage dynamique de tâches entre contrôleurs du trafic aérien et un système expert : aide au niveau tactique et mise en œuvre d'une aide au niveau stratégique.

Rapport final de contrat. Convention LAIH/CENA 91/C0008.

**Crevits I., Debernard S., Vanderhaegen F., Millot P., 93a**

Multi-level cooperation in air traffic control.

Human-Machine Interaction - Artificial Intelligence - Aerospace, Toulouse, France.

**Crevits I., Debernard S., Vanderhaegen F., Millot P., 93b**

Scheduling feasibility and two-processors allocation.

12th European Annual Conference on Human Decision Making and Manual Control, Kassel, Germany.

**Debernard S., Vanderhaegen F., Debbache N., Millot P., 90a**

Etude de la répartition dynamique de tâches entre contrôleurs et système automatisé.

Rapport final de contrat. Convention LAIH/CENA 87/C0009.

**Debernard S., Vanderhaegen F., Debbache N., Millot P., 90b**

Dynamic task allocation between controller and AI systems in air-traffic control.

9th European Annual Conference on Human Decision Making and Manual Control, Ispra, Italy, pp. 183-192.

**Debernard S., Vanderhaegen F., Millot P., 92**

An experimental investigation of dynamic allocation of tasks between air traffic controller and A.I. system.

5th IFAC/IFIP/IFORS/IEA, Symposium on Analysis, Design and Evaluation of Man-Machine Systems, The Hague, The Netherlands, §5.1.2, pp.1-6.

**Debernard S., 93**

Contribution à la répartition dynamique de tâches entre opérateur et système automatisé: application au contrôle du trafic aérien.

Thèse de doctorat, Université de Valenciennes, France.

**Decortis F., 88**

Dimension temporelle de l'activité cognitive lors des démarrages de systèmes complexes.

Le Travail Humain, 51, 2, 125-138.

**Decortis F., De Keyser V., Cacciabue P.C., Volta G., 91**

The temporal dimension of man-machine interaction.

Human-computer interaction and complex systems - G.R.S. Weir, J.L. Alty (eds) (London Academic Press), pp. 51-72.

**De Keyser V., 90**

Fiabilité humaine et la gestion du temps dans les systèmes complexes.

Les facteurs Humains de la Fiabilité dans les Systèmes Complexes - J. Leplat et G. de Terssac (eds) (Octarés, Marseille), pp. 85-108.

**Denis-Lempereur J., 81**

La sécurité aérienne menacée par manque d'argent.

Science & Vie, 760, pp 86-91 et 152.

**Desnoyers L., 92**

Les indicateurs et les traces de l'activité collective.

Résumés des exposés et synthèses.

XXVIIe congrès de la SELF sur les aspects collectifs du travail, Lille, France, 23-25 septembre.

**De Terssac G., Chabaud C., 91**

Référentiel opératif commun et fiabilité.

Les facteurs Humains de la Fiabilité dans les Systèmes Complexes - J. Leplat et G. de Terssac (eds) (Octarés, Marseille), pp. 85-108.

**Duarte F., Vidal M., 92**

Pour un regroupement de salles de contrôle: le travail en équipe est une condition de fiabilité.

XXVIIe congrès de la SELF sur les aspects collectifs du travail, Lille, France, pp 115-118.

**Dujardin P., 93**

The experimental validation process of the future controller working position in the SWIFT project.

Aeradays, Napoli, Italy.

**Durand C., 87**

Recherche : vers le neuro-ordinateur.

Micro-systèmes, 79, 85-95.

**Driskell J.E., Salas E., 92**

Collective behavior and team performance.

Human Factors, 34, 3, 277-288.

**Eden C., 92**

A framework for thinking about group decision support systems (GDSS).

Group Decision and Negotiation, (Kluwer Academic Publishers), 1, 199-218

**El Farouki L., Scapin D., Sebillote S., 91**

Prise en compte des tâches du contrôleur pour l'ergonomie des interfaces.

Rapport du CENA, N91223.

**El Mhamedi A., 90**

Sur l'intégration des aspects humains dans la conduite multiniveau d'atelier de production.

Thèse de doctorat, Université de Grenoble, France.

**Erschler J., Roubellat F., 87**

Ordonnancement et pilotage en temps réel d'ateliers.

Derniers développements en automatique, informatique, robotique, micro-électronique. Le séminaire du LAAS - CNRS (Cepadues Editions, Toulouse), pp. 67-100.

**Esquirol P., 87**

Règles et processus d'inférence pour l'aide à l'ordonnancement de tâches en présence de contraintes.

Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, France.

**Falzon P., 89**

Ergonomie cognitive du dialogue (Presse Universitaire de Grenoble).

**Faure P., 88**

Analyse numérique, notes d'optimisation (Ellipses, Edition Marketing, Paris).

**Faure R., 87**

Précis de recherche opérationnelle (Dunod, Paris).

**Filippi G., Theureau J., 92**

La coordination des activités dans la régulation du trafic du RER - l'action individuelle sociale des chefs de régulation et des aiguilleurs.

XXVIIe congrès de la SELF sur les aspects collectifs du travail, Lille, France, pp 41-44.

**Finin T., Klein D., 87**

On the requirements of active expert systems.

7ème journées internationales: les systèmes experts et leurs applications, Avignon, France, pp. 1199-1207.

**Froment B., Lesage J.J., 89**

Productique : les techniques de l'usinage flexible (Bordas, Paris).

**Garot J.M., 92**

Pour une stratégie de la recherche dans le domaine de l'automatisation de l'ATM.

Rapport du CENA , N92707.

**Gillet B., 90**

De l'usage-type aux types d'utilisateurs ou l'influence des différences individuelles dans l'adaptation homme-ordinateur.

Informatique et Différences Individuelles (Presses Universitaires de Lyon), pp. 111-123.

**Gotha, 93**

Les problèmes d'ordonnancement.

Publication collective parue dans : Recherche opérationnelle, 27, 1, 77-150.

**Greenstein J. S., Lam S. T., 85**

An experimental study of dialogue-based communication for dynamic human-computer task allocation.

International Journal of Man-Machine Studies, 23, 605-621.

**Greenstein J. S., Revesman M. E., 86**

Application of a Mathematical Model of Human Decision Making for a Human-Computer Communication.

IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 16, 1, 142-147.

**Guillevic C., De Terssac G., 90**

Gestion collective de la fiabilité: résolution de problèmes en groupe et régulations sociales.

Symposium sur la Psychologie du Travail et les Nouvelles Technologies, Liège, Belgique.

**Hancock P.A., Chignel M.H., 90**

Mental workload dynamics in adaptive interface design.

IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 18, 4, 647-657.

**Hart S.G., Staveland L.E., 88**

Development of NASA-TLX (Task Load index) : results of empirical and theoretical research.  
Human Mental Workload.

P.A. Hancock and N. Meshkati (eds) (Advances in psychology, North-Holland), pp 139-184.

**Hayes Roth B., Hayes-Roth F., 79**

Modeling planning as an incremental, opportunist process.

6th International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp. 375-383.

**Hellman R., 92**

Combining CSCW and user support techniques to design collaborative user interfaces.

Interacting with computers, 4, 1, 41-67.

**Hoc J.M., 90**

Planification de l'activité.

Traité de psychologie cognitive : traitement de l'informatique symbolique, Tome II - J.F. Richard (ed) (Dunod, Paris), pp 223-230.

**Hoc J.M., 93**

Main features of the human supervision of a long response latency process.

Proceedings of the IEEE, International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Le Touquet, France, pp. 114-119.

**Hollnagel E., 91**

The phenotype of erroneous actions: implications for HCI design.

Human-computer interaction and complex systems - G.R.S. Weir, J.L. Alty (eds) (London Academic Press), pp. 73-121.

**Hollnagel E., Warren C., Cacciabue P.C., 93**

Automation in aerospace and aviation applications : where are the limits ?

Summary of the Workshop on the Level of Automation.

Human-Machine Interaction - Artificial Intelligence - Aerospace, Toulouse, France.

**Hopkin V.D., 91,**

The impact of automation on air traffic control systems.

Automation and Systems Issues in Air Traffic Control - J.A Wise, V.D. Hopkin, M.L. Smith (eds) (NATO ASI Series - F73, Berlin), pp 3-19.

**Jacob F., Hoc J.M., 89**

Planning activities in continuous process operation.

2nd European Meeting on Cognitive Science Approaches to Process Control, Siena, Italy, pp. 323-331.

**Johannsen G., 91**

Integrated automation in complex man-machine systems.

European Control Conference, Grenoble, France, pp. 1013-1021.

**Kamoun A., 89**

Contribution à la Répartition Dynamique des tâches entre Opérateur et Calculateur pour la Supervision des Procédés Automatisés.

Thèse de Doctorat. Université de Valenciennes, France.

**Kasbi C., 92**

Informatisation des postes de contrôle et dimension collective du travail.

XXVIIe congrès de la SELF sur les aspects collectifs du travail, Lille, France, pp 149-151.

**Laurière J.L., 79**

Recherche opérationnelle appliquée : éléments de programmation dynamique (Collection programmation, Gauthiers-Villars, Paris).

**Lebart L., Morineau A., Felon J.P., 82**

Traitement de données statistiques - Méthode et programmes (Dunod, Paris).

**Lechevin J.P., Lanoë D., 92**

Le pontier, un individu "isolé" au coeur d'une régulation collective de la production.  
XXVIIe congrès de la SELF sur les aspects collectifs du travail, Lille, France, pp 83-86.

**Leplat J., 91a**

Organization of activity in collective tasks.

In Distributed Decision Making : Cognitive Models for Cooperative Work - J. Rasmussen, B. Brehmer and J. Leplat (eds) (John Woley & Sons Ltd), pp. 51-73.

**Leplat J., 91b**

Activités collectives et nouvelles technologies.

Revue Internationale de Psychologie Sociale, 4, 3/4, 335-356.

**Leroux M., 91**

Premier bilan des expérimentations du modèle ERATO - Spécification d'outils coopératifs pour le contrôleur.

Rapport du CENA, 91538.

**Ly S., Lejeannic H., 92**

Compte-rendu d'expérimentation de la maquette 2.0 - Projet PLATONS.

Rapport du C.E.N.A. CENA/AOC/PLATONS-CRE-2.0/Février92.

**MacDermott D., 82**

Temporal logic for reasoning about processes and plans.

Cognitive science, 6, 101-155

**Martensson L., Stahre J., 92**

Operator roles in advanced manufacturing.

Ergonomics of Hybrid Automated Systems III - P. Brödner and W. Karwowski (eds) (Elsevier Sciences Publishers B.V., Amsterdam), pp. 155-162

**Millot P., 88**

Supervision des procédés automatisés et ergonomie (Hermes, Paris).

**Millot P., Debernard S., 93**

Men-machine cooperative organizations : methodological and practical attempts in air traffic control.

Proceedings of the IEEE, International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Le Touquet, France, pp. 695-700.

**Mordchelles P., Angebault H., Angerand L., 89**

Système expert pour le contrôle automatique de nuit.

Rapport de stage de fin d'études.

**Navarro C., 87**

Communications fonctionnelles et complexité des tâches dans le pilotage d'un avion de ligne.

Le Travail Humain, 50, 4, 289-303.

**Navarro C., 91**

Une analyse cognitive de l'interaction dans les activités de travail.  
Le Travail Humain, 54, 2, 113-128.

**Navarro C., 92**

Aspects théoriques et méthodologiques de l'analyse des activités collectives de travail.  
Résumés des exposés et synthèses.  
XXVIIe congrès de la SELF sur les aspects collectifs du travail, Lille, France, pp 15-20.

**Phidias, 91**

PHIDIAS : le prochain partenaire du contrôleur aérien ou la transmutation informatique.  
Air Nav, les Echos de la Navigation Aérienne, 4, 7-12.

**Prome M., 92**

La dimension collective dans la maîtrise de la complexité.  
XXVIIe congrès de la SELF sur les aspects collectifs du travail, Lille, France, 159-161.

**Rasmussen J., 80**

The human as a system component.  
Human Interaction with Computer - H.T. Smith and T.R.G. Green (eds) (London Academic Press), pp. 67-96.

**Rasmussen J., 83**

Skills, rules and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models.  
IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 13, 3, pp. 257-266.

**Rasmussen J., 91**

Modelling distributed decision making.  
Human-computer interaction and complex systems - G.R.S. Weir, J.L. Alty (eds) (London Academic Press), pp. 111-142.

**Rieger C.A., Greenstein J.S., 82**

The allocation of tasks between the human and computer in automated systems.  
Proceedings of the IEEE, International Conference on Cybernetics and society, New York, pp. 204-208.

**Rouhet J.C., 88**

Système homme-machine.  
Technique de l'ingénieur, R 7610, 2-20.

**Sanderson P.M., 91**

Toward the Model Human Scheduler.  
International Journal of Human Factors in Manufacturing, 1, 3, 105-219.

**Sanderson P.M., Moray N., 90**

The human factors of scheduling behavior.  
Ergonomics of Hybrid Automated Systems II - W. Karwowski and M. Rahimi (eds) (Elsevier Sciences Publishers B.V., Amsterdam), pp 399-406.

**Savoyant A., 77**

Coordination et communication dans une équipe de travail.  
Le Travail Humain, 40, 1, 41-54.

**Savoyant A., 85**

Conditions et moyens de la coordination interindividuelle d'opérations d'exécution sensorimotrices.

Le Travail Humain, 48, 1, 59-79.

**Schmidt K., 89**

Modelling cooperative work in complex environnements.

2nd European Meeting on Cognitive Sciences Approaches to Process Control, Siena, Italy, pp. 173-183.

**Schmidt K., 91**

Cooperative work : a conceptual framework.

In Distributed Decision Making : Cognitive Models for Cooperative Work - J. Rasmussen, B. Brehmer and J. Leplat (eds) (John Woley & Sons Ltd), pp. 74-110.

**Sheridan T.B., 85**

Forty-five years of man-machine system: history and trends.

2nd IFAC on Analysis, Design and Evaluation of Man-Machine Systems, Varèse, Italy, September.

**Simolunas A.A., Bashinski H.S., 91**

Computerization and automation : updating the american air traffic control system.

Automation and Systems Issues in Air Traffic Control - J.A Wise, V.D. Hopkin, M.L. Smith (eds) (NATO ASI Series - F73, Berlin), pp 31-38.

**Spérandio J.C., 88**

Ergonomie du travail mental (Masson, Paris).

**Spérandio J.C., 90**

Travail, informatique et différences individuelles.

Informatique et Différences Individuelles (Presses Universitaires de Lyon), pp. 91-99.

**Spérandio J.C., 92**

Formalismes informatiques pour l'analyse des processus décisionnels partagés entre plusieurs opérateurs et pour l'analyse des ruptures de séquences. Application au contrôle aérien.

XXVIIe congrès de la SELF sur les aspects collectifs du travail, Lille, France, pp 49-52.

**Stammer R.B., Hallam J., 85**

Task allocation and the balancing of task demands in the multi-man-machine system - some case studies.

Applied Ergonomics, 16, 4, 251-257.

**Tang X., 89**

Contribution à la conception des systèmes à base de connaissance temps réel pour l'aide au contrôle de procédés continus.

Thèse de doctorat, Université de Valenciennes, France.

**Taborin V., Millot P., 89**

Cooperation between man and decision aid system in supervisory loop of continuous processes.

8th European Annual Conference on Decision Making and Manual Control, Copenhagen, Denmark.

**Tendjaoui M., 92**

Contribution à la conception d'interface "intelligente" pour le contrôle des procédés industriels: application au module décisionnel d'imagerie.

Thèse de doctorat, Université de Valenciennes, France.

**Titli A., 79**

Introduction : problèmes posés par les systèmes complexes.

Analyse et commande des systèmes complexes - A. Titli (eds) (Cepadues Editions, Toulouse), pp.19-30.

**Van Daele A., De Keyser V., 91**

Distributed decision making and time in the control of continuous processes.

In Distributed Decision Making : Cognitive Models for Cooperative Work - J. Rasmussen, B. Brehmer and J. Leplat (eds) (John Woley & Sons Ltd), pp. 261-274.

**Vanderhaegen F., Debernard S., Crévits I., Dubail C., Millot P., 91a**

SPECTRA : Système de Partage Expérimental de tâches pour le Contrôle de TRafic Aérien.

Rapport final du contrat. Convention LAIH/CENA 87/C0009.

**Vanderhaegen F., Debernard S., Millot P., 91b**

Man-machine cooperation in air traffic control.

10th European Annual Conference on Human Decision Making and Manual Control, Liège, Belgium, pp. 212-227.

**Vanderhaegen F., Crevits I., Debernard S., Millot P., 92a**

Multi-level cooperative organization in air traffic control.

Ergonomics of Hybrid Automated Systems III - P. Brodner and W. Karwowski (eds) (Elsevier Sciences Publishers B.V., Amsterdam), pp. 267-272.

**Vanderhaegen F., Crevits I., Debernard S., Millot P., 92b**

A dynamic tasks allocation in air traffic control : effects on controllers' behavior.

6th European Conference on Cognitive Ergonomics on Human-Computer Interaction : Tasks and Organization, Balatonfüred, Hungary, pp.59-70.

**Vanderhaegen F., Crevits I., Debernard S., Millot P., 92c**

A proposition for a multi-level cooperative organization in Air Traffic Control.

Proceedings of the Workshop on Air Traffic Control, Siena, Italia.

**Vanderhaegen F., Crevits I., Debernard S., Millot P., 94**

Men-machines cooperation : toward an activity regulation assistance for different air traffic control levels.

International Journal on Human-Computer Interaction, acceptée en juin 93. A paraître dans le Volume 6, Numéro 1 de 1994.

**Wanner J.C., 89**

L'homme dans la sécurité des systèmes pilotés.

Supplément La Recherche, 212, 36-39.

**Woods D.D., 88**

Coping with complexity : the psychology of human behaviour in complex systems.

Tasks, Errors and Mental Models - L.P. Goodstein, H.B. Andersen, S.E. Olsen (eds) (Taylor & Francis, London), pp. 128-148.

---

## INDEX DES FIGURES

---

Figure I-1:	Architecture d'un système de contrôle et de supervision .....	11
Figure I-3:	Commande décentralisée .....	12
Figure I-4:	Commande hiérarchisée.....	13
Figure I-5:	Structures des systèmes de conduite .....	14
Figure I-6:	Modèle du processeur humain .....	16
Figure I-7:	Modèle de résolution de problème .....	17
Figure I-8:	Cellule Dynamique de Travail.....	19
Figure I-9:	Modèle de l'opérateur humain face à une tâche.....	22
Figure I-10:	Répartition des tâches entre deux décideurs humains .....	23
Figure I-11:	Régulation de l'activité humaine par anticipation.....	24
Figure I-12:	Structures des organisations du travail .....	26
Figure I-13:	Facteurs contribuant à la complexité d'un système homme-machine.....	27
Figure I-14:	Couplage entre un système de supervision et un système d'assistance.....	28
Figure I-15:	Coopération verticale.....	29
Figure I-16:	Coopération horizontale.....	30
Figure I-17:	Structure générale d'une répartition dynamique implicite .....	31
Figure I-18:	Répartition implicite basée sur la théorie des files d'attente.....	32
Figure I-19:	Répartition implicite basée sur un modèle prédictif .....	32
Figure I-2:	Commande centralisée.....	12
Figure I-20:	Répartition implicite basée sur la commande optimale.....	32
Figure I-21:	Répartition implicite basée sur la commande adaptative en boucle fermée .....	33
Figure I-22:	Organisation homme-machine .....	35
Figure II-1:	Conception / Evaluation d'un système homme-machine .....	38
Figure II-2:	Structure d'un poste de contrôle.....	41
Figure II-3:	Exemple de structures organisationnelles.....	43
Figure II-4:	Compétences des décideurs d'une organisation multiposte .....	44
Figure II-5:	Régulation de l'activité dans un poste de contrôle.....	46
Figure II-6:	Niveaux décisionnels dans une coopération horizontale, pour un poste A .....	48
Figure II-7:	Rôle du poste B sur la répartition des tâches du poste A, dans une coopération multiniveau .....	49
Figure II-8:	Organisation globale pour la gestion du contrôle aérien .....	50
Figure II-9:	Gestion du contrôle du trafic aérien.....	52
Figure II-10:	Exemple de Strip.....	53
Figure II-11:	Position de contrôle comportant le poste radar et le poste organique .....	54
Figure II-12:	Postes de contrôle radar et organique actuels .....	55
Figure II-13:	Fonctions tactiques et stratégiques dans une unité de contrôle .....	56
Figure II-14:	Structure fonctionnelle dans le contrôle du trafic aérien .....	60
Figure II-15:	Coopération multiniveau dans une position de contrôle.....	61

Figure III-1:	Exemple d'enchaînement des tâches de contrôle .....	64
Figure III-2:	Description de SAINTEX .....	65
Figure III-3:	Structures de commande intégrées dans SPECTRA .....	66
Figure III-4:	Détermination des exigences de tâches .....	67
Figure III-5:	Exemple d'évolution des exigences de tâches en fonction du temps .....	68
Figure III-6:	Vue radar de SPECTRA .....	69
Figure III-7:	Stripping électronique de SPECTRA .....	70
Figure III-8:	Démarche expérimentale pour la validation de SPECTRA .....	72
Figure III-9:	Méthode TLX .....	74
Figure III-10:	Description du plan expérimental .....	76
Figure III-11:	Charge de travail globale par la méthode TLX .....	80
Figure III-12:	Comparaison entre exigences de tâches mesurées et charge de travail subjective .....	82
Figure III-13:	Critère de performance globale .....	83
Figure III-14:	Influence du niveau de coopération sur la performance globale .....	84
Figure III-15:	Liaison entre exigences de tâches et performance globale .....	86
Figure IV-1:	Horizons temporels de décision .....	89
Tableau IV-2:	Relations temporelles entre événements .....	90
Figure IV-3:	Modèle de l'ordonnanceur humain .....	92
Figure IV-4:	Exemple de modélisation des tâches .....	96
Figure IV-5:	Algorithme général de caractérisation d'un ensemble quelconque I de tâches .....	101
Figure IV-6:	Algorithme général de partitionnement d'un ensemble I strictement inadmissible .....	102
Figure IV-7:	Modélisation de la caractérisation des ensembles de tâches .....	105
Figure IV-8:	Modélisation du partitionnement des tâches par .....	106
Figure IV-9:	Algorithme de base pour le parcours de toutes les combinaisons à traiter .....	108
Figure IV-10:	exemple de parcours de combinaison, avec rupture de connexité .....	110
Figure V-1:	Exemple de chronogramme illustrant les tâches de contrôle .....	115
Figure V-2:	Algorithme principal pour les décisions d'ordonnancement .....	119
Figure V-3:	Primitives de base pour les décisions d'ordonnancement .....	120
Figure V-4:	Décisions d'ordonnancement .....	121
Figure V-5:	Algorithme principal pour les décisions d'affectation .....	122
Figure V-6:	Primitives de base pour les décisions d'affectation .....	123
Figure V-7:	Décisions d'affectation .....	124
Figure V-8:	Organisation homme-machine biposte de la future version de SPECTRA .....	126
Figure V-9:	Structure de commande intégrée dans SPECTRA pour une coopération multiniveau .....	127
Figure V-10:	Perspectives expérimentales .....	129
Figure V-11:	Organisation multiniveau multiposte dans une salle de contrôle .....	131

Bibliothèque Universitaire de Valenciennes



00904841