



Gestion de contraintes et expertise dans les stratégies d'ordonnancement

Clément Guerin

► **To cite this version:**

Clément Guerin. Gestion de contraintes et expertise dans les stratégies d'ordonnancement. Psychologie. Université Rennes 2, 2012. Français. <NNT : 2012REN20025>. <tel-00744251>

HAL Id: tel-00744251

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00744251>

Submitted on 22 Oct 2012

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.



THESE de l'Université de Rennes 2
sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne
pour obtenir le titre de
DOCTEUR DE RENNES 2
Mention : Psychologie Ergonomique
Ecole doctorale Sciences Humaines et Sociales

présentée par

Clément GUERIN

Préparée à l'IRCCyN, CNRS, Nantes

Gestion de contraintes et expertise dans les stratégies d'ordonnancement

Thèse soutenue le 06 juillet 2012
devant le jury composé de :

Christine CHAUVIN

Professeure, Université de Bretagne-Sud / *Président*

Françoise DARSEZ

Professeure, Université de Paris-Sud / *Rapporteur*

René JORNA

Professeur, University of Groningen / *Rapporteur*

Pierre LOPEZ

Directeur de Recherche, CNRS, Toulouse / *Examineur*

Nasser MEBARKI

Maître de conférences, Université de Nantes / *Co-encadrant de thèse*

Jean-Michel HOC

Directeur de Recherche, CNRS, Nantes / *Directeur de thèse*

À Ninon

REMERCIEMENTS

Je tiens en premier lieu à exprimer ma gratitude à mon directeur de thèse, Jean-Michel Hoc, Directeur de Recherche au CNRS qui s'apprête à profiter d'une retraite bien méritée. Je le remercie d'abord pour avoir éveillé chez moi cet intérêt pour la recherche en psychologie ergonomique alors que je n'étais qu'à l'aube de mon parcours universitaire. Je le remercie surtout pour avoir accepté de superviser mon travail de Master puis de Doctorat. Au-delà de ses conseils, critiques et remarques qui m'ont toujours amené à réfléchir pour mener à bien mes travaux scientifiques, il a toujours su se rendre très disponible, mais aussi m'encourager pendant les périodes difficiles.

En co-dirigeant également mon travail depuis mon Master, Nasser Mebarki, Maître de Conférences à l'Université de Nantes, m'a énormément aidé pour appréhender la thématique de cette thèse. Grâce à lui, les concepts fondamentaux de l'ordonnancement m'ont apparus bien moins obscurs qu'ils n'y paraissent. Surtout, son regard critique sur notre travail de psycho-ergonome a souvent été pour moi une source de réflexion. Je tiens donc à le remercier pour tous ces enseignements.

Je remercie également Françoise Darses, Professeure à l'Université de Paris-Sud, ainsi que René Jorna, Professeur à l'Université de Groningen, d'avoir accepté d'examiner ce travail en tant que rapporteurs et pour leur participation au Jury. Mes remerciements vont également à Christine Chauvin, Professeure à l'Université de Bretagne-Sud, et à Pierre Lopez, Directeur de Recherche au CNRS, pour avoir bien voulu participer au Jury de thèse.

Cette thèse m'a permis d'appréhender un domaine d'application : la planification des travaux de maintenance à la SNCF. Pour nos différentes discussions et le soutien qu'ils m'ont apporté, je tiens également à remercier Christian Blatter, Nicolas Roux, Fredy Bouillaud et Sébastien Alusse. Je remercie particulièrement Philippe Fraslin qui m'a aidé à mieux comprendre le jargon utilisé dans ce domaine et qui s'est souvent rendu disponible pour répondre à toutes mes interrogations.

Les travaux présentés dans cette thèse ont été développés au sein de l'Institut de Recherche et de Communications en Cybernétique de Nantes. Je remercie donc l'équipe PsyCoTec pour leur aide : Franck, Isabelle, Camilo, Robert, Patricia, Céline et Ilya. Et pour toutes nos petites discussions autour d'un café, je remercie amicalement Mathieu qui vient de démarrer une nouvelle aventure chez les Toulousains.

Un énorme merci également à mes parents, à mes beaux-parents, à Jérémy et Sarah, à Estelle, à Sophie et Yohann, à Marco, à Renaud, et à Thomas et Aurélia. Votre soutien, votre bonne humeur ou l'aide que vous m'avez apportée au cours de la réalisation de cette thèse ont été pour moi très précieux. Merci également à mes copains de Blues Stuff, Swami, Cyril, Jérôme, Uriell et Daggi, qui m'ont permis de me détendre le vendredi soir en jouant du Blues alors que j'avais parfois le Blues.

Enfin, rien n'aurait pu être pareil sans l'amour de la femme de ma vie. Merci Ninon de m'avoir soutenu au quotidien et d'avoir été aussi compréhensive tout au long de ce chemin.

“Il ne faut pas penser à l'objectif à atteindre, il faut seulement penser à avancer. C'est ainsi, à force d'avancer, qu'on atteint ou qu'on double ses objectifs sans même sans apercevoir.”

Bernard Werber, La révolution des fourmis.

SOMMAIRE GENERAL

INTRODUCTION GENERALE	16
1 UNE VARIETE DE SITUATIONS ET DE PROBLEMES D'ORDONNANCEMENT	16
2 D'UNE DEFINITION "CLASSIQUE" DE L'ORDONNANCEMENT A UNE APPROCHE EN TERMES DE GESTION DE CONTRAINTES	17
3 L'EXPERTISE EN ORDONNANCEMENT : UN POINT DE VUE PROCEDURAL	18
4 ADOPTER LE POINT DE VUE COMPLEMENTAIRE DES REPRESENTATIONS	21
5 LA PROBLEMATIQUE DE LA COOPERATION HOMME-MACHINE POUR RESOUDRE LES PROBLEMES D'ORDONNANCEMENT	21
6 LES SITUATIONS ET PROBLEMES D'ORDONNANCEMENT ETUDIES DANS CETTE THESE	22
7 DE LA REALITE DES SITUATIONS D'ORDONNANCEMENT AUX LIMITES DE LA THESE	23
8 OBJECTIFS DE LA THESE	25
9 PLAN DE LA THESE	25
10 BIBLIOGRAPHIE	26
CHAPITRE 1 : L'ACTIVITE D'ORDONNANCEMENT, UN CAS PARTICULIER DE RESOLUTION DE PROBLEME DE CONCEPTION	32
1 INTRODUCTION	32
2 LA RESOLUTION DE PROBLEME	32
3 LE PROBLEME D'ORDONNANCEMENT COMME PROBLEME DE CONCEPTION	33
3.1 UNE DEFINITION DU PROBLEME DE CONCEPTION	33
3.2 LES CARACTERISTIQUES COMMUNES DES PROBLEMES DE CONCEPTION	34
3.2.1 DES PROBLEMES COMPLEXES.....	34
3.2.2 LA STRATEGIE OPPORTUNISTE.....	34
3.2.3 LA STRATEGIE DE MOINDRE COMPROMISSION.....	35
3.2.4 LA TRADUCTION DE REPRESENTATIONS	36
4 MECANISMES DE PLANIFICATION ET CONTROLE COGNITIF DANS LA RESOLUTION DE PROBLEME.....	36
4.1 UNE SITUATION PRIVILEGIEE POUR OBSERVER LES MECANISMES DE PLANIFICATION	36
4.2 LE CONTROLE COGNITIF	37
4.3 HIERARCHIE DE DECOMPOSITION ET HIERARCHIE D'ABSTRACTION.....	38
5 BIBLIOGRAPHIE	39
CHAPITRE 2 : GESTION DE CONTRAINTES ET SYSTEMES DE REPRESENTATION ET DE TRAITEMENT DANS L'ACTIVITE D'ORDONNANCEMENT.....	42
1 INTRODUCTION.....	42
2 LA GESTION DE CONTRAINTES DANS LA RESOLUTION DE PROBLEME EN GENERAL	42
3 LA GESTION DE CONTRAINTES DANS LES PROBLEMES DE CONCEPTION EN PARTICULIER : LE POINT DE VUE DES SYSTEMES DE REPRESENTATION ET DE TRAITEMENT	43
4 LA GESTION DE CONTRAINTES DANS L'ACTIVITE D'ORDONNANCEMENT	44
5 UNE FORMALISATION DE LA NOTION DE CONTRAINTE	45
5.1 DES EXEMPLES DE DEFINITION DANS LA LITTERATURE.....	45
5.2 LA NOTION DE CONTRAINTE DANS LES TRAVAUX DE STEFIK.....	46

5.2.1	TROIS OPERATIONS SUR LES CONTRAINTES	46
5.2.2	LA DEFINITION DE LA CONTRAINTE PAR STEFIK	46
5.3	PROLONGER LA DEFINITION DE STEFIK : CONTRAINTES ET OBJETS	47
5.4	EXEMPLES DE SRTs EXTERNES REPRESENTANT UNE SOLUTION AU PROBLEME D'ORDONNANCEMENT	47
5.4.1	L'EMPLOI DU TEMPS	47
5.4.2	LE DIAGRAMME DE GANTT	49
6	UNE PROPOSITION DE DEFINITION DE L'ORDONNANCEMENT.....	51
7	BIBLIOGRAPHIE	51
 CHAPITRE 3 : CARACTERISTIQUES DE L'EXPERTISE.....		54
1	INTRODUCTION	54
2	L'ABSENCE DE DEFINITION CONSENSUELLE DE L'EXPERTISE	54
3	LES CARACTERISATIONS OBJECTIVES DE L'EXPERTISE	54
4	L'EXPERTISE EN ORDONNANCEMENT INDUSTRIEL : UNE EXPERTISE EN GESTION DE PRODUCTION ?	55
5	LES PROPRIETES GENERALES DE L'EXPERTISE EN LIEN AVEC L'ORDONNANCEMENT	56
5.1	DU GUIDAGE A PARTIR DE LA STRUCTURE PROFONDE DU PROBLEME A UN CONTROLE COGNITIF EXTERNE.....	56
5.2	L'ANTICIPATION ET L'ABSTRACTION.....	57
5.3	LA SIMPLIFICATION DES PROBLEMES.....	58
5.4	LA RECONNAISSANCE DE PATTERNS SIGNIFICATIFS	59
5.5	LA VARIABILITE INTERINDIVIDUELLE	59
6	QUESTIONS ET HYPOTHESES DE RECHERCHE.....	59
7	BIBLIOGRAPHIE	60
 CHAPITRE 4 : COOPERATION HOMME-MACHINE POUR L'ORDONNANCEMENT.....		64
1	INTRODUCTION	64
2	LA REPARTITION DE FONCTIONS ENTRE L'HOMME ET LA MACHINE	65
3	COOPERATION HOMME-MACHINE ET CONTROLE MUTUEL	67
4	QUESTIONS ET HYPOTHESES DE RECHERCHE.....	68
5	BIBLIOGRAPHIE	69
 CHAPITRE 5 : METHODES D'ETUDE DE L'ORDONNANCEMENT.....		72
1	INTRODUCTION	73
2	APPROCHES METHODOLOGIQUES ET TECHNIQUES DE RECUEIL DE DONNEES	73
2.1	METHODES DE DECOMPOSITION DE LA TACHE OU DU DOMAINE DE TRAVAIL.....	73
2.2	L'ETUDE DE TERRAIN POUR APPREHENDER LES PRATIQUES D'ORDONNANCEMENT.....	74
3	LA METHODOLOGIE DES PROTOCOLES VERBAUX POUR ANALYSER L'ACTIVITE D'ORDONNANCEMENT	76
3.1	JUSTIFICATIONS QUANT A L'UTILISATION DE LA METHODE DES PROTOCOLES VERBAUX	76
3.2	L'ANALYSE DE L'ACTIVITE	77
3.3	L'USAGE DES VERBALISATIONS POUR ACCEDER AUX PROCESSUS MENTAUX	77
3.4	LA CONSIGNE DE VERBALISATION SIMULTANEE	79
3.5	LE CODAGE DE PROTOCOLES ET L'UTILISATION DE MACSHAPA	79
4	LE SCHEME DE CODAGE	80

4.1	AVANT-PROPOS.....	80
4.2	DESCRIPTION GENERALE	81
4.3	ACTIVITES STRATEGIQUES	82
4.3.1	FORMULATION DE PLAN D'ACTION (PLAN)	82
4.3.2	FORMULATION DE PROCEDURE (F-PR).....	82
4.3.3	FORMULATION DE BUT (F-BUT).....	83
4.3.4	ÉVALUATION DE BUT (EV-BUT)	84
4.3.5	VIOLATION DE CONTRAINTE (VIOL-CTR)	84
4.4	ACTIVITES TACTIQUES	84
4.4.1	OPERATIONS DE TRANSITION DES SPECIFICATIONS OU PREFERENCES VERS L'ESPACE DES CONTRAINTES	85
4.4.1.1	Formulation de contrainte (F-CTR)	85
4.4.2	OPERATIONS A L'INTERIEUR DE L'ESPACE DES CONTRAINTES.....	86
4.4.2.1	Propagation de contraintes (PRG-CTR).....	86
4.4.2.2	Précision de contrainte (PRC-CTR).....	87
4.4.2.3	Relâchement de contrainte (REL-CTR)	88
4.4.3	OPERATIONS DE TRANSITION DE L'ESPACE DES CONTRAINTES VERS L'ESPACE DES OBJETS.....	88
4.4.3.1	Satisfaction de contrainte (SAT-CTR).....	88
4.4.3.2	Faisabilité de satisfaction de contrainte (FAIS-CTR)	90
4.4.3.3	Remise en cause de satisfaction de contrainte (RMS-SAT-CTR)	90
4.4.4	OPERATIONS A L'INTERIEUR DE L'ESPACE DES OBJETS	91
4.4.4.1	Modification d'objet (M-OBJ)	91
4.4.4.2	Particularisation d'objet (P-OBJ).....	91
4.4.5	OPERATIONS DE TRANSITION DE L'ESPACE DES OBJETS VERS L'ESPACE DES CONTRAINTES.....	92
4.4.5.1	Formulation de contrainte (F-CTR)	92
4.5	PARTICULARITE DU SCHEME DE CODAGE SELON LA SITUATION ETUDIEE.....	93
4.5.1	DIFFERENCES DANS LE CODAGE DES ACTIVITES STRATEGIQUES	93
4.5.2	DIFFERENCES DANS LE CODAGE DES ACTIVITES TACTIQUES	94
5	METHODES STATISTIQUES.....	95
5.1	L'INFERENCE FIDUCIO-BAYESIENNE	95
5.2	L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES	95
6	BIBLIOGRAPHIE	96
CHAPITRE 6 : LA NATURE DE L'EXPERTISE EN ORDONNANCEMENT : LE CAS DE LA CONCEPTION D'EMPLOI DU TEMPS.....		100
1	RESUME.....	101
1.1	INTRODUCTION.....	101
1.2	OBJECTIFS ET QUESTIONS DE RECHERCHE	101
1.3	METHODE UTILISEE	102
1.4	PRINCIPAUX RESULTATS.....	102
2	ABSTRACT	104
3	INTRODUCTION	104
4	THEORETICAL FRAMEWORK.....	106
4.1	SCHEDULING AS DESIGN PROBLEM SOLVING.....	106
4.1.1	SCHEDULING AND TIMETABLING.....	106
4.1.2	CONSTRAINT AND OBJECT.....	107
4.2	SCHEDULING EXPERTISE.....	108
5	METHOD.....	109

5.1	PARTICIPANTS	109
5.2	EXPERIMENTAL TASK.....	109
5.3	DATA COLLECTION AND CODING METHOD	110
5.4	CODING SCHEME	111
5.4.1	TRANSITION OPERATIONS FROM THE SPECIFICATIONS OR DESIGNER'S PREFERENCE TO THE CONSTRAINTS SPACE.....	112
5.4.2	OPERATIONS WITHIN THE CONSTRAINTS SPACE	113
5.4.3	TRANSITION OPERATIONS FROM THE CONSTRAINTS SPACE TO THE OBJECTS SPACE	113
5.4.4	OPERATIONS WITHIN THE OBJECTS SPACE	114
5.4.5	TRANSITION OPERATION FROM THE OBJECTS SPACE TO THE CONSTRAINTS SPACE.....	114
5.4.6	ACTION PLAN FORMULATION	114
6	RESULTS.....	114
6.1	DESCRIPTIVE ANALYSIS	114
6.1.1	GLOBAL STRATEGY.....	114
6.1.2	PERFORMANCE.....	115
6.2	OPERATIONS IMPLYING THE CONSTRAINTS SPACE VERSUS OPERATIONS WITHIN THE OBJECTS SPACE	116
6.3	TYPES OF OBJECTS AND ACTION PLANS.....	116
7	DISCUSSION	116
8	CONCLUSION.....	118
9	APPENDIX: ILLUSTRATIONS OF PREDICATES	120
10	ACKNOWLEDGEMENTS.....	121
11	REFERENCES.....	121

CHAPITRE 7 : LA NATURE DE L'EXPERTISE EN ORDONNANCEMENT MANUFACTURIER : PROCESSUS STRATEGIQUES ET TACTIQUES, GESTION DE CONTRAINTES ET D'OBJETS..... 124

1	RESUME.....	125
1.1	INTRODUCTION.....	125
1.2	OBJECTIFS ET QUESTIONS DE RECHERCHE	126
1.3	METHODE UTILISEE	127
1.4	PRINCIPAUX RESULTATS.....	127
2	ABSTRACT	130
3	INTRODUCTION	130
4	LEVEL OF COGNITIVE CONTROL IN PLANNING AND SCHEDULING	133
5	COORDINATING MULTIPLE RPS IN AN EXTERNAL RPS: CONSTRAINT AND OBJECT MANAGEMENT.....	134
6	THE SCHEDULING EXPERTISE	137
7	HYPOTHESES	138
8	METHOD.....	139
8.1	PARTICIPANTS	139
8.2	EXPERIMENTAL TASK.....	140
8.3	DATA COLLECTION, CODING METHOD AND CODING SCHEME	141
8.3.1	STRATEGIC ACTIVITIES.....	142
8.3.2	TACTICAL ACTIVITIES	143
8.4	STATISTICAL METHODS	144

9 RESULTS.....	144
9.1 LEVELS OF CONTROL	144
9.2 ALL STRATEGIC OPERATIONS VERSUS TACTICAL OPERATIONS.....	145
9.3 TYPES OF GOALS FORMULATED	146
9.4 OPERATIONS IMPLYING THE CONSTRAINTS SPACE VERSUS OPERATIONS WITHIN THE OBJECTS SPACE	147
9.4.1 SCHEDULING STAGE	147
9.4.2 RESCHEDULING STAGE.....	147
9.5 ANALYSIS OF DIRECT TRANSITIONS FROM A CONSTRAINT FORMULATION	148
9.6 PERFORMANCE.....	148
10 DISCUSSION	150
11 CONCLUSION.....	152
12 APPENDIX: ILLUSTRATIONS OF PREDICATES	154
13 ACKNOWLEDGEMENTS.....	155
14 REFERENCES.....	155

CHAPITRE 8 : COOPERATION HOMME-MACHINE POUR L'ORDONNANCEMENT : LE CAS DE L'ORDONNANCEMENT DE GROUPES..... 159

1 INTRODUCTION.....	159
2 METHODOLOGIE	160
2.1 TACHE DU PARTICIPANT ET OUTIL D'ASSISTANCE A L'ORDONNANCEMENT	160
2.2 PROTOCOLE EXPERIMENTAL	164
2.3 FACTEURS EXPERIMENTAUX	165
2.4 DESCRIPTION DES PARTICIPANTS ET DU PLAN D'ANALYSE	166
2.5 METHODE DE RECUEIL DES DONNEES : PRISE D'INFORMATION, PRISE DE DECISION ET PERFORMANCE	166
3 QUESTIONS ET HYPOTHESES DE RECHERCHE.....	167
4 RESULTATS	169
4.1 PRESENTATION GLOBALE DES RESULTATS	169
4.2 AVANT LA PROPOSITION DE LA MACHINE.....	169
4.2.1 PERFORMANCE "LOCALE" D'ORDONNANCEMENT.....	169
4.2.2 DUREE DE PRISE DE DECISION	170
4.2.3 NOMBRE DE PRISES D'INFORMATION	170
4.2.4 TYPES D'INDICATEURS CONSULTES AU COURS DES PRISES D'INFORMATION	171
4.3 APRES LA PROPOSITION DE LA MACHINE.....	172
4.3.1 EFFET DE LA PROPOSITION DE LA MACHINE SUR LA PERFORMANCE "LOCALE" D'ORDONNANCEMENT	172
4.3.2 DESCRIPTION "CLINIQUE" DE LA RELANCE DE L'ANALYSE DES INDICATEURS	173
4.3.3 ÉVOLUTION DE LA PRISE DE DECISION	174
4.4 PERFORMANCE GLOBALE D'ORDONNANCEMENT.....	175
4.4.1 RETARD ALGEBRIQUE MAXIMUM.....	175
4.4.2 DUREE TOTALE DE MISE EN ŒUVRE DE L'ORDONNANCEMENT.....	176
5 DISCUSSION	177
6 CONCLUSION.....	179
7 BIBLIOGRAPHIE.....	180

CHAPITRE 9 : PERSPECTIVES : LA PLANIFICATION DES TRAVAUX DE MAINTENANCE FERROVIAIRE 183

1	INTRODUCTION	183
2	LA PLANIFICATION DE LA MAINTENANCE DE LA SIGNALISATION A LA SNCF	184
2.1	L'ACTIVITE D'ORDONNANCEMENT S'ARTICULE AUTOUR DE PLUSIEURS TACHES	184
2.2	L'INCERTITUDE DES INFORMATIONS ET LA GESTION DES ALEAS	184
2.3	LA GESTION DE CONTRAINTES DANS L'ORDONNANCEMENT DES OPERATIONS DE MAINTENANCE	185
2.4	LE SYSTEME DE REPRESENTATION ET DE TRAITEMENT EXTERNE UTILISE	186
3	PERSPECTIVES : DESCRIPTION DU PROJET DE RECHERCHE	187
3.1	CONTEXTE DE RECHERCHE : L'INTRODUCTION D'UNE GMAO.....	187
3.2	NOS OBJECTIFS DE RECHERCHE.....	188
3.3	QUESTIONS DE RECHERCHE	188
3.4	FACTEURS EXPERIMENTAUX	189
3.5	HYPOTHESES DE RECHERCHE	189
3.6	PROTOCOLE DE RECHERCHE.....	191
3.6.1	<i>DESCRIPTION DES PARTICIPANTS</i>	<i>191</i>
3.6.2	<i>DESCRIPTION DES PRINCIPALES PHASES DU PROTOCOLE.....</i>	<i>191</i>
3.6.3	<i>DESCRIPTION DE LA TACHE EXPERIMENTALE ET DE L'INTERFACE</i>	<i>191</i>
3.7	METHODE DE RECUEIL DES DONNEES	193
4	CONCLUSION.....	193
5	BIBLIOGRAPHIE	193

DISCUSSION GENERALE..... 195

1	RAPPEL DES OBJECTIFS DE LA THESE	195
1.1	DESCRIPTION DES STRATEGIES D'ORDONNANCEMENT ET NATURE DE L'EXPERTISE	195
1.2	ROLE DE L'OPERATEUR DANS LE CONTEXTE DE L'ORDONNANCEMENT DE GROUPES	196
2	RAPPEL DES QUESTIONS DE RECHERCHE.....	197
2.1	ÉTUDES SUR LA CONCEPTION D'EMPLOI DU TEMPS ET SUR L'ORDONNANCEMENT MANUFACTURIER	197
2.2	ÉTUDE SUR LA COOPERATION HOMME-MACHINE POUR L'ORDONNANCEMENT.....	197
3	RESULTATS OBTENUS ET INTERPRETATIONS	198
3.1	ÉTUDES SUR LA CONCEPTION D'EMPLOI DU TEMPS ET SUR L'ORDONNANCEMENT MANUFACTURIER	198
3.1.1	<i>PERTINENCE DE L'APPROCHE GESTION DE CONTRAINTES ET ARTICULATION AVEC LA PLANIFICATION</i>	<i>198</i>
3.1.2	<i>NATURE DE L'EXPERTISE DANS L'ACTIVITE D'ORDONNANCEMENT</i>	<i>198</i>
3.1.3	<i>COMPARAISON DES SITUATIONS D'ORDONNANCEMENT ETUDIEES</i>	<i>200</i>
3.2	ÉTUDE SUR LA COOPERATION HOMME-MACHINE POUR L'ORDONNANCEMENT.....	201
3.2.1	<i>ÉVALUATION DE L'OUTIL D'ASSISTANCE A L'ORDONNANCEMENT</i>	<i>201</i>
3.2.2	<i>EFFET DU CONTROLE MUTUEL.....</i>	<i>202</i>
3.2.3	<i>GESTION DES RISQUES DE PANNES</i>	<i>202</i>
4	BIBLIOGRAPHIE	203

CONCLUSION 205

1	LES PRINCIPAUX APPORTS DE CETTE THESE	205
1.1	STRATEGIES DE GESTION DE CONTRAINTES ET EXPERTISE.....	205

1.2	ABSTRACTION ET EXPERTISE	206
1.3	IMPLICATIONS SUR LA CONCEPTION D'INTERFACES	206
2	DES LIMITES DE LA THESE AUX PROPOSITIONS POUR LES DEPASSER	207
2.1	L'APPROCHE EXPERIMENTALE POUR ETUDIER LES STRATEGIES D'ORDONNANCEURS EXPERTS	207
2.2	L'EVALUATION DE LA PERFORMANCE D'ORDONNANCEMENT	210
3	PERSPECTIVES : DES QUESTIONS DE RECHERCHE APPARUES AU COURS DE LA THESE.....	211
3.1	EXAMINER LES LIENS ENTRE EXPERTISE ET INTERFACES	211
3.2	PROLONGER LES QUESTIONS AUTOUR DES SRTS ET DE LA GESTION DES CONTRAINTES	212
3.3	ÉVALUER L'INTERET DE LA METHODE "ORDONNANCEMENT DE GROUPES" D'UN POINT DE VUE PSYCHOLOGIQUE.....	214
3.4	APPROFONDIR LA QUESTION DE LA GESTION DES SITUATIONS À RISQUES	215
3.5	DES SITUATIONS D'ORDONNANCEMENT AUX SITUATIONS PLUS GENERALES DE CONCEPTION	215
4	BIBLIOGRAPHIE	215
	BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE	217
	LISTE DES FIGURES.....	231
	LISTE DES TABLEAUX.....	235

INTRODUCTION GENERALE

1	UNE VARIETE DE SITUATIONS ET DE PROBLEMES D'ORDONNANCEMENT	16
2	D'UNE DEFINITION "CLASSIQUE" DE L'ORDONNANCEMENT A UNE APPROCHE EN TERMES DE GESTION DE CONTRAINTES	17
3	L'EXPERTISE EN ORDONNANCEMENT : UN POINT DE VUE PROCEDURAL	18
4	ADOPTER LE POINT DE VUE COMPLEMENTAIRE DES REPRESENTATIONS	21
5	LA PROBLEMATIQUE DE LA COOPERATION HOMME-MACHINE POUR RESOUDRE LES PROBLEMES D'ORDONNANCEMENT	21
6	LES SITUATIONS ET PROBLEMES D'ORDONNANCEMENT ETUDIES DANS CETTE THESE	22
7	DE LA REALITE DES SITUATIONS D'ORDONNANCEMENT AUX LIMITES DE LA THESE	23
8	OBJECTIFS DE LA THESE	25
9	PLAN DE LA THESE	25
10	BIBLIOGRAPHIE	26

Encore très peu de travaux de psychologie ergonomique se sont penchés sur l'activité d'ordonnement, par exemple dans la planification des tâches, de l'occupation des personnels et des machines dans des ateliers. Toutefois, il s'agit d'une question cruciale pour la performance d'une entreprise car la fonction d'ordonnement joue un rôle essentiel dans la gestion d'un système de production industrielle (MacCarthy & Wilson, 2001 ; Sanderson, 1989). Satisfaire les clients en respectant les dates de livraison tout en minimisant les délais de production pour réduire les coûts, sont autant d'objectifs conditionnés par une organisation temporelle efficace de la production. Bien qu'il s'agisse d'une question cruciale pour la survie d'une entreprise, peu de personnes sont concernées par cette tâche et les enjeux ergonomiques sont mal perçus. En revanche, à partir de méthodes mathématiques, la recherche opérationnelle a toujours été très active sur ces questions, en se posant plus comme une pourvoyeuse d'outils logiciels pour automatiser l'ordonnement (par ex., les APS – *Advanced Planning and Scheduling*¹) que comme une conceptrice d'assistance à l'activité. Paradoxalement, ce sont souvent des opérateurs² humains qui réalisent ces tâches d'ordonnement en atteignant des performances acceptables malgré la complexité des situations (Sanderson, 1989).

1 UNE VARIETE DE SITUATIONS ET DE PROBLEMES D'ORDONNANCEMENT

Il serait réducteur de résumer l'activité d'ordonnement dans le seul contexte de l'ordonnement manufacturier, car cette activité est présente dans une variété de situations. Chaque situation d'ordonnement peut être décrite par ses propres caractéristiques qui fondent sa propre complexité. C'est cette variabilité des situations qui génère une variété de problèmes d'ordonnement (MacCarthy & Wilson, 2001).

¹ Ces logiciels commerciaux sont présents dans de nombreuses entreprises (par ex., Toyota, Thalès, etc.). Ils peuvent gérer en parallèle plusieurs contraintes (par ex., matière, capacité, main d'œuvre, transport).

² Dans cette thèse, le terme d'opérateur fera toujours référence à un opérateur humain.

Esquirol et Lopez (1999) ainsi que Hoc, Mebarki et Cegarra (2004) ont proposé de distinguer les problèmes statiques des problèmes dynamiques. Dans les problèmes statiques, les informations nécessaires à la résolution du problème sont fixées *a priori* et ne sont pas remises en cause durant la résolution. On parle alors de plan prévisionnel et d'ordonnancement prédictif. Généralement, cette catégorie de problèmes est résolue à partir de formulations mathématiques (méthodes formelles) ou par l'usage de règles de priorité appliquées par un opérateur ou par une machine (par ex., ordonnancer en fonction des dates d'échéance, ordonnancer en fonction des durées, etc.). Mais dans de nombreuses situations, le plan prévisionnel est souvent remis en question car une information nouvelle apparaît (par ex., une commande urgente, une panne machine, l'absence d'un opérateur, etc.). Cette évolution du plan implique une approche dynamique de l'ordonnancement, soit en termes d'ordonnancement en temps réel³, soit en termes d'ordonnancement réactif⁴.

Quel que soit le type de problème (statique ou dynamique), l'ordonnancement a été étudié dans une multitude de situations. L'organisation opérationnelle de la production dans les ateliers reste néanmoins un cas typique et a fait l'objet de nombreux travaux dans plusieurs secteurs industriels. Citons par exemple l'assemblage de circuits imprimés (par ex., McKay, Buzacott, Charness, & Safayeni, 1992 ; McKay, Safayeni, & Buzacott, 1995), la production agroalimentaire (par ex., Akkerman & van Donk, 2009 ; Beishon, 1974), le textile (Vernon, 2001) ou la sidérurgie (McKay, Safayeni, & Buzacott, 1988). Dans le domaine du transport, le secteur ferroviaire (par ex., van Wezel & Jorna, 2009, sur la gestion des pleins et du nettoyage des trains dans les gares) ou celui des tournées de véhicules (par ex., Gacias, Cegarra, & Lopez, 2010) ont également été étudiés. On trouve aussi de l'ordonnancement dans le secteur médical, car des travaux se sont intéressés à la gestion du flux des patients dans les hôpitaux (par ex., Sakphisal & Higgins, 2010) ou à l'organisation du travail d'équipes soignantes (par ex., Mietus, 1994, sur les équipes d'infirmières). Pour Esquirol et Lopez (1999), le point commun entre toutes les situations d'ordonnancement est qu'il existe une interdépendance de tâches qui doivent être coordonnées, alors que les ressources humaines et techniques nécessaires pour la réalisation de ces tâches sont en quantité limitée, et qu'elles doivent satisfaire un certain nombre de contraintes (notamment des contraintes temporelles). Ces caractéristiques communes aux situations fondent une définition "classique" de l'ordonnancement.

2 D'UNE DEFINITION "CLASSIQUE" DE L'ORDONNANCEMENT A UNE APPROCHE EN TERMES DE GESTION DE CONTRAINTES

Dans la littérature, l'ordonnancement est généralement défini par l'affectation temporelle de ressources à des tâches pour atteindre des objectifs, et en tenant compte de contraintes (Baker, 1974 ; Crawford, MacCarthy, Wilson, & Vernon, 1999 ; Esquirol & Lopez, 1999 ; Hoc et al., 2004 ; Jorna, 2006 ; Kiewiet, Jorna, & van Wezel, 2005 ; van Wezel, Cegarra, & Hoc, 2011 ; Wiers, 1997a). Appliquée à la production manufacturière par exemple, les ressources sont des machines ou des opérateurs, les objectifs peuvent être de maximiser l'utilisation des machines ou de minimiser les retards, et les contraintes concernent la disponibilité des

³ Certaines tâches sont ordonnancées puis d'autres qui arrivent progressivement sont intégrées dans le plan.

⁴ L'ordonnancement a été réalisé, puis sa mise en œuvre est interrompue par une perturbation.

ressources ou définissent par exemple un ordre opératoire (par ex., la contrainte de succession : l'opération "peinture" après l'opération "soudure").

Dans les différentes descriptions de situations, la tâche de l'ordonnanceur est notamment décrite comme la prise en compte d'une multitude d'informations, liées aux caractéristiques de ces situations.

Au sein d'une même entreprise, Wiers (1996) a observé que chaque unité peut être définie par ses propres caractéristiques, par exemple en termes d'encours et de temps de traitement. Akkerman et van Donk (2009) ont noté que, dans le contexte de la production agroalimentaire, l'ordonnanceur doit considérer des informations liées à la capacité limitée des machines, aux ressources partagées, aux coûts et durées de livraison, à la nécessité ou non de maintenir un niveau de stock, au caractère périssable d'un produit, ou encore aux incertitudes sur les temps de traitement. Chacune de ces caractéristiques et leurs interactions va avoir un effet sur les décisions d'ordonnement. C'est également le cas dans la production industrielle de gâteau (Beishon, 1974). L'ordonnement des fours de cuisson doit prendre en compte des durées de cuisson ou des températures en fonction du type de gâteau. Chaque fournée doit alors respecter les spécifications du cahier des charges à propos de l'uniformité ou de la couleur des gâteaux. Dans le contexte de la production de textile, Vernon (2001) a noté que les prises de décision de l'ordonnanceur étudié, s'appuyaient sur un recueil d'informations formelles ou informelles (par ex., pendant une pause café), et que les sources d'information étaient multiples et dispersées géographiquement et temporellement dans l'atelier. Dans son travail de thèse sur l'ordonnement des infirmières, Mietus (1994) a indiqué qu'un ensemble de règles (formelles ou informelles) doit être considéré par l'ordonnanceur. Elle note par exemple que le personnel à plein temps est autorisé à travailler au maximum quarante heures par semaine, que les infirmières doivent avoir au moins vingt-deux week-ends de congés par an, qu'elles doivent avoir douze journées de courte durée par an, avec obligatoirement deux journées en trois mois, etc. En plus de ces règles, il faut considérer tout un ensemble d'informations comme par exemple les périodes de formation des infirmières étudiantes.

De notre point de vue, ces informations, ces règles, ou ces caractéristiques que l'ordonnanceur doit considérer, peuvent être appréhendées comme un ensemble de contraintes que doit nécessairement gérer l'ordonnanceur pour concevoir son ordonnancement. Pour McKay (2001, p.53), la gestion de contraintes apparaît comme centrale dans l'ordonnement :

« Scheduling is an activity that involves a wide assortment of inputs and a large number of constraints with an equally large set of rules for constraint relaxation and enforcement ».

Or, des auteurs comme Hoc et al. (2004) rappellent que les modèles psychologiques de gestion de contraintes sont absents de la littérature sur l'ordonnement. Un des aspects fondamentaux de cette thèse sera de chercher à décrire l'activité de gestion de contraintes comme impliquée dans les stratégies humaines d'ordonnement.

3 L'EXPERTISE EN ORDONNEMENT : UN POINT DE VUE PROCEDURAL

L'expertise est souvent décrite comme le résultat d'une expérience prolongée dans un domaine particulier (Charness & Tuffiash, 2008 ; Chi, Glaser, & Farr, 1988 ; Ericsson & Smith,

1991 ; Ericsson & Charness, 1994 ; Farrington-Darby & Wilson, 2006 ; Garrett, Caldwell, Harris, & Gonzalez, 2009 ; Glaser & Chi, 1988 ; Hoc & Amalberti, 2007 ; Hoffman, 1992 ; Larkin & Reif, 1979). Mais malgré une littérature abondante sur l'expertise, il n'existe pas de définition consensuelle à propos de ce concept (Cellier, Eyrolle, & Mariné, 1997).

L'expertise en ordonnancement n'échappe pas à ce constat (MacCarthy & Wilson, 2001). Mais malgré la complexité qui caractérise les situations d'ordonnancement, les experts trouvent généralement des solutions très acceptables car ils sont capables de gérer cette complexité (Cegarra, 2004). Bien que plusieurs auteurs soulignent le rôle central de l'humain dans les tâches d'ordonnancement (Higgins, 1996 ; Jackson, Wilson, & MacCarthy, 2004 ; Wiers, 1996), on ne dispose que de peu de connaissances sur la nature de l'expertise en ordonnancement si ce n'est en termes d'heuristiques construites par l'expérience et par l'observation (McKay, 2001 ; Sanderson, 1989).

Beaucoup de travaux s'intéressant à l'expertise humaine dans l'ordonnancement sont de nature descriptive. Par exemple, pour décrire les pratiques d'ordonnancement, McKay et al. (1988) ont mené une enquête exploratoire auprès de quarante ordonnanceurs. On retrouve aussi de nombreuses études de terrain sous forme d'observations et d'analyses de cas impliquant la description d'un petit nombre d'ordonnanceurs (Vernon, 2001 ; Webster, 2001a ; Webster, 2001b). Par exemple, dans le contexte d'une usine produisant des cartes à circuits imprimés, McKay et al. (1995) se sont intéressés de manière très détaillée aux décisions d'ordonnancement d'un ordonnanceur en particulier. L'objectif des auteurs était d'automatiser dans un système d'aide à la décision les heuristiques utilisées par cet ordonnanceur. Parmi les 128 heuristiques référencées, certaines étaient qualifiées de routinières, et d'autres de moins routinières car appliquées dans des conditions exceptionnelles (par ex., pour la gestion de situations à risques). Les heuristiques routinières étaient décrites en termes de règles de production ou de décision (si...alors...), alors que les moins routinières étaient formulées en termes de "sens commun", et considérées comme difficilement transposables dans des algorithmes. De la même manière, Webster (2001a) a fait une description des stratégies d'ordonnancement d'un expert travaillant dans une usine de production d'outils de coupe (par ex., des forets, tarauds, fraises, etc.). Ces stratégies étaient décrites en termes de règles et de routines guidant les décisions d'ordonnancement. Un exemple de routine est "d'ordonnancer en priorité le poste goulot car il a un impact sur la performance de l'atelier". Cette règle va alors conditionner l'ordonnancement des autres postes de la chaîne. Webster (2001b) a décrit également une heuristique utilisée dans le séquençage des opérations : "les commandes des clients externes d'abord, les clients internes ensuite, le réapprovisionnement des stocks enfin".

Dans une perspective plus expérimentale d'étude de laboratoire, d'autres auteurs ont également adopté le point de vue procédural. Par exemple Dessouky, Moray et Kijowski (1995), Moray, Dessouky, Kijowski et Adapathya (1991) ou encore Nakamura et Salvendy (1988) ont cherché à comparer les heuristiques humaines d'ordonnancement aux règles classiques de l'approche formelle. Il s'agissait par exemple des règles du type :

- SPT (*Shortest Processing Time*) : l'ordonnancement des opérations s'effectue selon un ordre croissant des durées (des plus petites aux plus grandes).
- LPT (*Longest Processing Time*) : l'ordonnancement des opérations s'effectue selon un ordre décroissant des durées (des plus grandes aux plus petites).

- EDD (*Earliest Due Date*) : l'ordonnement des opérations s'effectue selon un ordre croissant des dates d'échéance (par ex., selon les dates de livraison).
- FCFS (*First-Come First-Served*) : l'ordonnement des opérations s'effectue selon l'ordre d'arrivée (premier arrivé, premier servi).

Bien que les résultats obtenus soient à modérer, ces comparaisons ont permis aux auteurs d'observer une supériorité de la performance humaine. A partir de ce type de travaux, des modèles spécifiques, mettant en évidence les connaissances procédurales impliquées dans la réalisation de la tâche d'ordonnement, ont été proposés (par ex., des modèles de type GOMS⁵ – Tabe & Salvendy, 1988 ; Tabe, Yamamuro, & Salvendy, 1990).

Dans une même perspective procédurale, mais en utilisant un modèle de résolution de problème (le modèle de l'échelle double de décision de Rasmussen, 1986), Sanderson (1991) a cherché à modéliser les heuristiques humaines des ordonnanceurs sous forme de vingt-sept règles de production (condition et action) représentant différentes activités cognitives. Toutefois, Crawford et al. (1999) ont noté deux limites à son modèle : il n'a été testé ni par des études de terrain ni par des expériences de laboratoire, et aucune méthode ne propose de la mettre en pratique.

Un autre aspect procédural a été examiné dans les travaux sur l'ordonnement : la gestion des buts. Les conflits entre buts caractérisent les situations d'ordonnement (Higgins, 1996 ; Mietus, 1994), et ils sont généralement résolus par des pondérations. Par exemple, Tabe et Salvendy (1988) ont noté que lorsque des conflits apparaissent, les ordonnanceurs favorisent un but (par ex., minimiser les retards) aux dépens d'un autre (par ex., maximiser l'utilisation de l'atelier).

Cet aperçu des travaux dans le domaine de l'ordonnement montre qu'une importance particulière a été accordée aux procédures (heuristiques, règles de décision) mises en œuvre par l'ordonneur humain. Pour Crawford et Wiers (2001), l'ordonnement serait même à considérer comme une activité très routinière, régie par des règles de décision, et dans laquelle l'ordonneur se concentrerait uniquement sur les changements de situation liés à l'apparition d'un aléa (par ex., une panne machine, un retard de livraison des matériaux, etc.).

Toutefois, en cherchant à décrire les heuristiques humaines d'ordonnement, le point de vue complémentaire des représentations manipulées par l'ordonneur – à notre sens, celui des contraintes gérées – n'a pas été exploité. De plus, peu de travaux sur l'ordonnement ont réalisé des comparaisons contrôlées entre experts et novices. Nous avons considéré que l'utilisation de ce paradigme était pertinente pour décrire précisément les caractéristiques de l'expertise dans l'activité d'ordonnement et plus spécifiquement dans cette activité de gestion de contraintes.

⁵ *Goal, Operators, Methods, Selection rules*. Ces modèles s'appuient sur des méthodes d'analyse de la tâche.

4 ADOPTER LE POINT DE VUE COMPLEMENTAIRE DES REPRESENTATIONS

Kiewiet et al. (2005) ont mené une étude empirique dans le contexte des chemins de fer néerlandais (*Netherlands Railways*) pour déterminer des cartes cognitives (ou modèles mentaux) manipulés par les ordonnanceurs. En utilisant des cartes, la tâche des participants était de produire des graphes, que les auteurs ont interprétés comme un modèle de leurs connaissances et représentations pour résoudre des problèmes d'ordonnement. Les résultats ont montré une importante variabilité des représentations manipulées par les experts.

En considérant la gestion de contraintes comme centrale dans l'activité d'ordonnement, cette thèse adoptera le point de vue complémentaire des représentations – à notre sens des contraintes – traitées par l'ordonneur. Nous tenterons alors de formaliser ce type de représentation, en empruntant à la littérature sur la résolution des problèmes de conception une définition de la contrainte.

Par ailleurs, l'idée selon laquelle les ordonnanceurs utilisent des formes de représentations internes (ou modèles mentaux) pour prendre des décisions d'ordonnement a été suggérée par des travaux (MacCarthy & Wilson, 2001). Dans la terminologie de Hoc (1987), ces modèles mentaux sont des Systèmes de Représentation et de Traitement (SRTs) dans lesquels s'expriment les contraintes. Au cours de la résolution du problème d'ordonnement, les contraintes doivent être intégrées dans le SRT externe requis par la solution (par ex., un emploi du temps, un diagramme de *Gantt*). Nous chercherons dans cette thèse à examiner les différences liées à l'expertise, dans la gestion des contraintes, en lien avec l'utilisation du SRT externe.

5 LA PROBLEMATIQUE DE LA COOPERATION HOMME-MACHINE POUR RESOUDRE LES PROBLEMES D'ORDONNANCEMENT

Des travaux montrent que les performances d'ordonnement sont meilleures lorsque qu'un opérateur est placé dans une situation de "partenariat" avec un ordinateur, alors même que la "machine" seule produit une performance moins bonne. Sanderson (1989) parle d'approche hybride pour résoudre les problèmes d'ordonnement. Pour Crawford et Wiers (2001, p.27), la complémentarité entre l'humain et la machine semble même évidente « *humans and algorithms appeared to have complementary strengths that could be effectively combined* ». De ce constat se pose alors la question d'une coopération entre l'opérateur et la machine pour résoudre des problèmes d'ordonnement, et de la répartition des rôles pour chacun des partenaires.

A partir de la décomposition de la tâche d'ordonnement en sous-tâches élémentaires, il est possible d'automatiser certaines d'entre elles pour développer un système d'aide à la décision (van Wezel, Jorna, & Mietus, 1996). Une autre approche de la répartition des rôles consiste à laisser à l'opérateur humain la décision finale d'ordonnement et à la machine le calcul des conséquences d'une décision (Hoc et al., 2004).

A la suite d'un travail antérieur mené par la recherche opérationnelle autour de la méthode "ordonnement de groupes", nous avons examiné plusieurs questions de recherche. Cette méthode pour résoudre des problèmes d'ordonnement propose que la machine

ordonnance des groupes d'opérations avant que l'opérateur procède aux décisions finales quant à l'ordre des opérations au sein de chaque groupe (ordonnancement intra-groupes). Un ensemble de questions de recherche ont guidé notre étude. Notamment quel pouvait être l'apport d'un système proposant des indicateurs d'aide à la décision, et qu'allait produire chez l'humain une proposition de la machine (problématique du contrôle mutuel).

6 LES SITUATIONS ET PROBLEMES D'ORDONNANCEMENT ETUDIÉS DANS CETTE THÈSE

Dans cette thèse, nous avons étudié trois situations d'ordonnancement en proposant aux participants essentiellement des problèmes statiques selon la typologie de Hoc et al. (2004).

Tout d'abord, nous avons examiné un problème d'ordonnancement prédictif dans une *situation de conception d'emploi du temps universitaire* par des experts et des novices. Ce travail, qui n'a été qu'exploré pendant le Master 2, a fait l'objet d'un article actuellement sous presse dans la revue *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries* (Hoc, Guerin, & Mebarki, sous presse). Cet article, rapportant les résultats de notre premier travail de doctorat, sera inséré dans cette thèse.

Puis nous avons mené deux études assimilées à deux *situations d'ordonnancement manufacturier*. La première était un cas d'école d'ordonnancement prédictif impliquant des étudiants et des experts en gestion de production. Puisqu'il s'agit d'une population spécifique, il faut noter que le recrutement des participants experts a été fastidieux. Cette étude a été soumise à *International Journal of Industrial Ergonomics* (Guerin, Hoc, & Mebarki, 2011, actuellement en révision) ; la version soumise sera également intégrée dans cette thèse. La deuxième étude d'ordonnancement manufacturier s'inscrit dans un contexte pluridisciplinaire entre l'équipe PsyCoTec⁶ et l'équipe ACSED⁷ à l'IRCCyN⁸. Son objectif était d'évaluer un outil d'assistance à l'ordonnancement, développé par Pinot (2008), dans une perspective de coopération homme-machine). Selon l'approche "ordonnancement de groupes" proposée par ce travail en recherche opérationnelle, la machine ordonnance des groupes d'opérations puis l'humain ordonnance les opérations au sein de chaque groupe (ordonnancement intra-groupes). Contrairement aux deux précédentes études, il s'agissait d'une situation impliquant un problème d'ordonnancement dynamique. Le manuscrit d'article n'étant pas encore soumis, cette étude donnera lieu à un chapitre de la thèse.

Enfin, la dernière étude a concerné une *situation ferroviaire* : la planification de travaux de maintenance à la SNCF. Ce travail, qui a été réalisé en parallèle des autres études, a été guidé par une demande issue du terrain. Il s'inscrit en marge d'un projet d'introduction d'un outil de Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO), d'un montant de 18 millions d'euros. De nombreux problèmes techniques et organisationnels n'ont pas permis de réaliser les expérimentations avant la rédaction du manuscrit de thèse, mais des réflexions permettent de tracer des perspectives dans le prolongement direct de nos travaux achevés. Notons que du point de vue de la catégorie des problèmes, ce travail cherchera à

⁶ Psychologie, Cognition, Technologie.

⁷ Analyse et Commandes des Systèmes à Événements Discrets.

⁸ Institut de Recherche en Communication et Cybernétique de Nantes.

examiner un problème d'ordonnancement prédictif. Nous ferons également de ce travail un chapitre de la thèse.

7 DE LA REALITE DES SITUATIONS D'ORDONNANCEMENT AUX LIMITES DE LA THESE

Comme le soulignent clairement Bart MacCarthy et John Wilson dans l'introduction du livre *Human Performance in Planning and Scheduling* édité en 2001, mieux comprendre les situations d'ordonnancement nécessite d'adopter un point de vue holistique en considérant simultanément les aspects techniques (processus de production), organisationnels (sociaux) et humains (par ex., les processus cognitifs de prise de décision). Par ailleurs, en reconduisant le constat d'un fossé existant entre théorie mathématique et pratique industrielle, déjà discuté antérieurement (MacCarthy & Liu, 1993), les auteurs insistent sur l'importance de décrire la réalité de terrain des problèmes d'ordonnancement et du travail de l'ordonnanceur.

Les problèmes d'ordonnancement sont dynamiques, marqués par l'incertitude et par l'apparition fréquente d'aléas.

Le fossé qui existe entre théorie et pratique, et qui est régulièrement relevé par les chercheurs sur la planification et l'ordonnancement (par ex., McKay et al., 1988 ; Wiers, 1997a) proviendrait notamment des limites auxquelles serait confrontée l'approche formelle (mathématique). Considérée comme fondatrice de la théorie de l'ordonnancement (Baker, 1974), la recherche opérationnelle a considérablement développé de travaux dans ce domaine. Pour cette discipline, le problème d'ordonnancement appartient à une classe de problèmes mathématiques marquée par l'explosion combinatoire (problèmes NP-complets⁹). Les chercheurs dans ce domaine utilisent des méthodes de résolution mathématique (par ex., Pinedo, 1994), et particulièrement :

- Les méthodes exactes (ou algorithmes) comme par exemple la méthode SEP (procédure d'optimisation par séparation et évaluation progressive), qui recherchent des solutions optimales à partir d'algorithmes mathématiques complexes qui nécessitent souvent des temps de calcul importants.
- Les méthodes approximatives (ou heuristiques), qui recherchent plutôt une solution sous-optimale mais admissible. Ces heuristiques, définies par exemple en appliquant des règles de priorité, permettent des temps de calcul plus raisonnables.

Cependant Wiers (1997a) critique cette approche car beaucoup de travaux reposent sur l'utilisation de problèmes simplifiés, avec l'idée sous-jacente que les environnements sont prédictibles et sans perturbations. Or, la gestion de la production dans les ateliers manufacturiers est caractérisée par des incertitudes sur l'environnement et sur les outils de production (Hoc et al., 2004). De nombreux événements extérieurs et non contrôlés (aléas)

⁹ Catégorie de problèmes pour lesquels il n'existe pas d'algorithme de résolution de complexité polynomiale. On mesure la complexité d'un algorithme par le nombre d'opérations nécessaires à sa résolution. Pour un problème NP-complet, résoudre le problème (dans ce cas, déterminer si une solution est optimale ou non) nécessite d'évaluer les solutions les unes après les autres, ce qui fait que le nombre d'opérations nécessaires à sa résolution (et donc le temps de résolution du problème) croît exponentiellement avec la taille du problème.

apparaissent dans les ateliers (McKay et al., 1995 ; Sanderson, 1989). Citons par exemple une commande urgente, une annulation de commande, l'absence d'un opérateur, une panne machine, un retard dans les approvisionnements (Hoc et al., 2004). Une des critiques adressées alors à l'approche mathématique est que les problèmes d'ordonnancement ne se résolvent pas uniquement à partir de calculs combinatoires.

Pour Crawford et al. (1999), l'ordonnancement manufacturier est difficile à étudier car il s'agit d'un environnement complexe et dynamique ne pouvant être étudié que dans son contexte. Pour Akkerman et van Donk (2009), il est nécessaire d'étudier l'ordonnancement dans son contexte pour tenir compte de l'ensemble des caractéristiques du processus de production et des tâches accomplies par l'ordonnanceur. En effet, il apparaît que l'activité d'ordonnancement est caractérisée par un ensemble de tâches.

Le travail de l'ordonnanceur n'est pas uniquement d'ordonnancer.

Définir l'ordonnancement uniquement en termes d'affectation de ressources dans le temps pour effectuer un ensemble de tâches ne permet pas d'en décrire la pratique (Crawford et al., 1999). En effet, bien que ces auteurs considèrent qu'il s'agit d'un but général, l'ordonnancement va au-delà de cette définition, puisque l'ordonnanceur a plusieurs rôles et responsabilités. Par conséquent, il devient difficile d'en proposer une définition générale : « *Obtaining a general definition of scheduling as practised in industry is a particularly difficult issue* » (MacCarthy & Wilson, 2001, p.7).

Puisque plusieurs tâches incombent à l'ordonnanceur, il peut même être rare d'identifier dans les entreprises un métier d'ordonnanceur : « *Very rarely can a person be found who holds the job title of 'scheduler'. People who schedule have a variety of different job titles, have varying degrees of authority and power and also a variety of different primary or secondary tasks for which they are responsible other than scheduling. So people who schedule do not always spend the majority of their time generating a schedule. They may have other quality, people management or material management responsibilities for example.* » (Vernon, 2001, p.146). En raison de cette pluralité de tâches, la planification et l'ordonnancement peuvent être vus comme un continuum d'activités et de rôles (MacCarthy, Wilson, & Crawford, 2001).

Parmi ces tâches, le recueil d'informations semble être une tâche particulièrement importante. Par exemple, du fait de la présence d'incertitudes dans les ateliers, l'ordonnanceur humain passe beaucoup de temps à obtenir des informations précises sur l'état de la production (Crawford & Wiers, 2001). Il peut s'agir d'informations formelles ou moins formelles dispersées dans tout l'atelier (Vernon, 2001). Par exemple, Webster (2001a) a noté que l'ordonnanceur interagit avec une variété de sources d'informations (contremaître, opérateurs, directeur des achats, directeur des ventes, ingénieur qualité, directeur de la production, personnel R&D, etc.) ce qui lui permet d'anticiper de futurs problèmes (démarche proactive). Dans ses travaux, Fox (1980) avait déjà mis en évidence que 80 à 90% du temps de l'ordonnanceur consiste à identifier les problèmes et le reste à ordonnancer.

Une autre tâche caractéristique du travail de l'ordonnanceur est la négociation, par exemple lorsque les cellules planification et ordonnancement d'une même entreprise sont séparées

géographiquement, et que des buts conflictuels apparaissent (Vernon, 2001). Higgins (1996) donne aussi l'exemple de la négociation des dates de livraison avec les clients. Ainsi, l'humain joue un rôle important dans l'ordonnancement d'une production car il est élément de flexibilité du système (McKay, Buzacott, & Safayeni, 1989 ; Wiers & van Der Schaaf, 1996).

Nous sommes conscient que cette thèse n'a pas approfondi la question du recueil d'informations et de la négociation. De plus, les problèmes proposés dans le cadre des expérimentations pourraient être critiqués et considérés comme suffisamment simples pour être résolus par l'application de méthodes formelles comme celles utilisées par la recherche opérationnelle. Puisque la question des représentations manipulées par les ordonnanceurs n'avait été que marginalement traitée, et que des modèles psychologiques de gestion de contraintes n'avaient pas encore été exploités pour décrire l'activité d'ordonnancement, le cœur de cette thèse s'est attaché à tester la pertinence d'une telle approche. Nous avons donc fait le choix d'une approche expérimentale, dans laquelle une réduction de la complexité doit être nécessairement réalisée pour être gérable du point de vue du participant. Pour Hoc (2001a), on peut réduire la complexité d'une tâche pour l'étudier en laboratoire et maintenir toujours une certaine validité écologique. Pour cela, il est nécessaire qu'une analyse des exigences des situations réelles soit réalisée en amont. Tout au long de cette thèse, nous avons cherché à adopter cette démarche.

8 OBJECTIFS DE LA THESE

Nous chercherons tout d'abord à décrire les processus cognitifs impliqués dans l'activité d'ordonnancement. En adoptant le point de vue complémentaire des représentations traitées par les ordonnanceurs, nous décrirons ces processus en termes de gestion de contraintes, en relation avec les représentations externes de la solution au problème d'ordonnancement (emploi du temps, diagramme de *Gantt*).

Puisqu'une meilleure compréhension de l'expertise est nécessaire pour améliorer les systèmes d'aide à la décision, nous chercherons alors à spécifier les stratégies expertes de gestion de contraintes par rapport à celles des débutants.

A partir du travail mené antérieurement par la recherche opérationnelle, nous chercherons enfin à fournir des éléments de réponse quant à l'évaluation d'un outil d'assistance à l'ordonnancement intra-groupes. Cette étude nous permettra également d'examiner des questions de recherche sur l'effet d'un contrôle mutuel de la machine sur l'activité de l'ordonnanceur et sur la gestion des risques par l'opérateur. Ce travail pluridisciplinaire ne sera par ailleurs pas guidé par des objectifs de description de l'activité d'ordonnancement en termes de gestion de contraintes.

9 PLAN DE LA THESE

Dans une première partie, nous développerons le socle théorique qui nous permettra de décrire l'activité d'ordonnancement en termes de gestion de contraintes. Tout d'abord, nous justifierons l'idée adoptée selon laquelle le problème d'ordonnancement peut être considéré comme un problème de conception (chapitre 1). Nous emprunterons alors à la littérature sur la résolution des problèmes de conception une définition de la contrainte

ainsi que le concept de Systèmes de Représentation et de Traitement (chapitre 2). Cette première partie sera également l'occasion de rappeler quelques caractéristiques de l'expertise en général, et de l'expertise en ordonnancement en particulier (chapitre 3). Puis nous décrirons quelques aspects théoriques sur la répartition de fonctions entre un opérateur et une machine, et sur le cadre de la coopération homme-machine (chapitre 4). Ces aspects théoriques nous permettront d'éclairer l'étude pluridisciplinaire réalisée autour de l'approche sur l'ordonnancement de groupes, à partir du travail mené antérieurement par la recherche opérationnelle.

Une deuxième partie méthodologique (chapitre 5) sera ensuite l'occasion de rappeler quelques méthodes d'études de l'ordonnancement et de justifier l'usage, central dans cette thèse, de l'analyse des protocoles verbaux. Un soin tout particulier sera accordé à l'explicitation du schème de codage que nous avons développé, et qui nous a permis de décrire les stratégies humaines d'ordonnancement dans deux des trois études expérimentales.

Dans une troisième partie, nous présenterons les expérimentations qui ont été menées au cours de cette thèse. Le chapitre 6 sera consacré à l'étude de la conception d'emploi du temps qui sera décrite sous la forme d'un article sous presse (Hoc et al., sous presse). Un article soumis décrira ensuite la première situation d'ordonnancement manufacturier (Guerin et al., 2011 – chapitre 7). Enfin, nous développerons le travail pluridisciplinaire sur la coopération homme-machine pour l'ordonnancement, dans le contexte particulier de l'ordonnancement de groupes (chapitre 8).

Nous tracerons dans une quatrième partie des perspectives d'un travail de recherche issu du terrain et actuellement en cours : la planification de la maintenance ferroviaire à la SNCF par des dirigeants de proximité (chapitre 9). A partir d'un ensemble d'entretiens menés auprès de ces dirigeants, nous proposerons une analyse descriptive de cette situation d'ordonnancement. Cette analyse nous permettra de formuler quelques questions et hypothèses de recherche. Le protocole expérimental qui doit être mis en œuvre sera également décrit.

Une discussion générale cherchera ensuite à mettre en parallèle les principaux apports de ce travail de thèse. Une conclusion nous permettra enfin de tracer quelques perspectives de recherche.

10 BIBLIOGRAPHIE

- Akkerman, R., & van Donk, D.P. (2009). Analyzing scheduling in the food-processing industry. *Cognition, Technology & Work*, 11, 215-266.
- Baker, K.R. (1974). *Introduction to sequencing and scheduling*. New York: Wiley.
- Beishon, R.J. (1974). An analysis and simulation of an operator's behavior in controlling continuous baking ovens. In E. Edwards & F.P. Lees (Eds.), *The human operator in process control* (pp. 79-90). London: Taylor & Francis.
- Cegarra, J. (2004). *La gestion de la complexité dans la planification : le cas de l'ordonnancement*. Thèse, Université Paris 8, France.

- Cellier, J.M., Eyrolle, H., & Mariné, C. (1997). Expertise in dynamic environnements. *Ergonomics*, 40, 28-50.
- Charness, N., & Tuffiash, M. (2008). The role of expertise research and human factors in capturing, explaining, and producing superior performance. *Human Factors*, 50, 427-432.
- Chi, M., Glaser, R., & Farr, M. (1988). *The Nature of Expertise*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Crawford, S., & Wiers, V.C.S. (2001). From anecdotes to theory: a review of existing knowledge on human factors of planning and scheduling. In B.L. MacCarthy & J.R. Wilson (Eds.), *Human performance in planning and scheduling: fieldwork studies, methodologies and research issues* (pp. 15-43). London: Taylor & Francis.
- Crawford, S., MacCarthy, B.L., Wilson, J.R., & Vernon, C. (1999). Investigating the work of industrial schedulers through field study. *Cognition, Technology & Work*, 1, 63-77.
- Dessouky, M.I., Moray, N., & Kijowski, B. (1995). Taxonomy of scheduling systems as a basis for the study of strategic behavior. *Human factors*, 37, 443-472.
- Ericsson, K.A., & Charness, N. (1994). Expert performance: Its structure and acquisition. *American Psychologist*, 49, 725-747.
- Ericsson, K.A., & Smith, J. (Eds.). (1991). *Toward a general theory of expertise*. New York: Cambridge University Press.
- Esquirol, P., & Lopez, P. (1999). *L'ordonnancement*. Paris : Economica.
- Farrington-Darby, T., & Wilson, J.R. (2006). The nature of expertise: a review. *Applied Ergonomics*, 37, 17-32.
- Fox, M.S. (1990). Constraint-guided scheduling - a short history of research at CMU. *Computers in Industry*, 14, 79-88.
- Gacias, B., Cegarra, J., & Lopez, P. (2010). Work domain analysis and ecological interface for the vehicle routing problem. *11th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems* Valenciennes, France, August 31-September 3.
- Garrett, S.K., Caldwell, B.S., Harris, E.C., & Gonzalez, M.C. (2009). Six dimensions of expertise: a more comprehensive definition of cognitive expertise for team coordination. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 10, 93-105.
- Glaser, R., & Chi, M.T.H. (1988). Overview. In M.T.H. Chi, R. Glaser, & M.J. Farr (Eds.), *The Nature of Expertise* (pp.15-36). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Guerin, C., Hoc, J.M., & Mebarki, N. (2011). *The nature of expertise in industrial scheduling: strategic and tactical processes, constraint and object management*. (Manuscript submitted for publication).
- Higgins, P.G. (1996). Interaction in hybrid intelligent scheduling. *International Journal of Human Factors in Manufacturing*, 6, 185-203.
- Hoc, J.M. (1987). *Psychologie cognitive de la planification*. Grenoble: Presses Universitaires de Grenoble.

- Hoc, J.M. (2001a). Toward ecological validity of research in cognitive ergonomics. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 2, 278-288.
- Hoc, J.M., & Amalberti, R. (2007). Cognitive control dynamics for reaching a satisficing performance in complex dynamic situations. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1, 22-55.
- Hoc, J.M., Guerin, C., & Mebarki, N. (sous presse). The nature of expertise in scheduling: the case of timetabling. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*.
- Hoc, J.M., Mebarki, N., & Cegarra, J. (2004). L'assistance à l'opérateur humain pour l'ordonnement dans les ateliers manufacturiers. *Le Travail Humain*, 67, 181-208.
- Hoffman, R.R. (Ed.). (1992). *The psychology of expertise*. New York: Springer Verlag.
- Jackson, S., Wilson, J.R., & MacCarthy, B.L. (2004). A new model of scheduling in manufacturing : tasks, roles, and monitoring. *Human Factors*, 46, 533-550.
- Jorna, R.J. (2006). Cognition, planning, and domains: an empirical study into the planning processes of planners. In W. van Wezel, R.J. Jorna, & A.M. Meystel (Eds.), *Planning in intelligent systems* (pp. 101-135). Hoboken, NJ: Wiley.
- Kiewiet, D.J., Jorna, R.J., & van Wezel, W. (2005). Planners and their cognitive maps: An analysis of domain representations using multi dimensional scaling. *Applied Ergonomics*, 36, 695-708.
- Larkin, J., & Reif, F. (1979). Understanding and teaching problem solving in physics. *European Journal of Science Education*, 1, 191-203.
- MacCarthy, B.L., & Liu, J. (1993). Addressing the gap in scheduling research: a review of optimization and heuristic methods in production scheduling. *International Journal of Production Research*, 31, 59-79.
- MacCarthy, B.L., & Wilson, J.R. (2001). The human contribution to planning, scheduling and control in manufacturing industry. In B.L. MacCarthy, & J.R. Wilson (Eds.), *Human performance in planning and scheduling* (pp. 3-14). London: Taylor & Francis.
- MacCarthy, B.L., Wilson, J.R., & Crawford, S. (2001). Human performance in industrial scheduling: a framework for understanding. *International Journal of Human Factors in Manufacturing*, 11, 63-77.
- McKay, K.N. (2001). Lessons from the factory floor. In B.L MacCarthy & J.R. Wilson (Eds.), *Human Performance in planning and scheduling* (pp. 45-64). London: Taylor & Francis.
- McKay, K.N., Buzacott, J.A., & Safayeni, F.R. (1989). The scheduler's knowledge of uncertainty: the missing link. In J. Browne (Ed.), *Knowledge Based Production Management System* (pp.171-189). Amsterdam: North-Holland.
- McKay, K.N., Safayeni, F.R., & Buzacott, J.A. (1988). Job-shop scheduling theory: what is relevant? *Interfaces*, 18, 84-90.
- McKay, K.N., Safayeni, F.R., & Buzacott, J.A. (1995). 'Common Sense' realities of planning and scheduling in printed circuit board production. *International Journal of Production Research*, 33, 1587-1603.

- McKay, K.N., Buzacott, J.A., Charness, N., & Safayeni, F.R. (1992). The scheduler's predictive expertise: an interdisciplinary perspective. In G.I. Doukidis & R.J. Paul (Eds.), *Artificial Intelligence in Operational Research* (pp. 139-150). London: MacMillan Press.
- Mietus, D. (1994). *Understanding planning for effective decision support. A cognitive task analysis of nurse scheduling*. Doctoral Dissertation, University of Groningen, The Netherlands.
- Moray, N., Dessouky, M.I., Kijowski, B.A., & Adapathya, R. (1991). Strategic behavior, workload, and performance in task scheduling. *Human Factors*, 33, 607-629.
- Nakamura, N., & Salvendy, G. (1988). An experimental study of human decision-making in computer-based scheduling of flexible manufacturing system. *International Journal of Production Research*, 26, 567-583.
- Pinedo, M. (1994). *Scheduling: Theory, Algorithms and Systems*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Pinot, G. (2008). *Coopération homme-machine pour l'ordonnancement sous incertitudes*. Thèse, Université de Nantes, France.
- Rasmussen, J. (1986). *Information processing and human-machine interaction*. Amsterdam: Elsevier.
- Sakphisal, A., & Higgins, P.G. (2010). Studying the existing service process of three hospital outpatient departments. *International Journal of Health Management and Information*, 1, 111-130.
- Sanderson, P.M. (1989). The human planning and scheduling role in advanced manufacturing systems: An emerging human factors domain. *Human Factors*, 31, 635-666.
- Sanderson, P.M. (1991). Towards the model human scheduler. *International Journal of Human Factors in Manufacturing*, 1, 195-219.
- Tabe, T., & Salvendy, G. (1988). Toward a hybrid intelligent system for scheduling and rescheduling of FMS. *International Journal of Compute Integrated Manufacturing*, 1, 154-164.
- Tabe, T., Yamamuro, S., & Salvendy, G. (1990). Knowledge elicitation in scheduling FMS: towards a hybrid intelligent system. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 5, 17-27.
- van Wezel, W., & Jorna, R.J. (2009). Cognition, tasks, and planning: supporting the planning of shunting operations at Netherlands Railways. *Cognition, Technology & Work*, 11, 165-176.
- van Wezel, W., Cegarra, J., & Hoc, J.M. (2011). Allocating functions to human and algorithm in Scheduling. In J.C. Fransoo, T. Wäfler, & J. Wilson (Eds.), *Behavioral Operations in Planning and Scheduling* (pp. 339-370). Berlin: Springer-Verlag.
- van Wezel, W., Jorna, R.J., & Mietus, D.M. (1996). Scheduling in a generic perspective: knowledge-based decision support by domain analysis. *International Journal of Expert Systems: research and applications*, 3, 357-381.
- Vernon, C. (2001). Lingerin amongst the lingerie: an observation-based study into support for scheduling at a garment manufacturer. In B.L. MacCarthy & J.R. Wilson (Eds.),

-
- Human performance in planning and scheduling* (pp. 135-163). London: Taylor & Francis.
- Webster, S. (2001a). A case study of scheduling practice at a machine tool manufacturer. In B.L. MacCarthy & J.R. Wilson (Eds.), *Human performance in planning and scheduling* (pp. 67-81). London: Taylor & Francis.
- Webster, S. (2001b). A Field Test of a Prototype Scheduling System. In B.L. MacCarthy & J.R. Wilson (Eds.), *Human performance in planning and scheduling* (pp. 231-243). London: Taylor & Francis.
- Wiers, V.C.S. (1996). A quantitative field study of the decision behaviour of four shop floor schedulers. *Production Planning and Control*, 7, 383–392.
- Wiers, V.C.S. (1997a). *Human-computer interaction in production scheduling: analysis and design of decision support systems for production scheduling tasks*. Doctoral dissertation, Technische Universiteit Eindhoven, The Netherlands.
- Wiers, V.C.S., & van der Schaaf, T.W. (1996). A framework for decision support in production scheduling tasks. *Production Planning & Control*, 25, 533-544.

CHAPITRE 1 : L'ACTIVITE D'ORDONNANCEMENT, UN CAS PARTICULIER DE RESOLUTION DE PROBLEME DE CONCEPTION

1	INTRODUCTION	32
2	LA RESOLUTION DE PROBLEME	32
3	LE PROBLEME D'ORDONNANCEMENT COMME PROBLEME DE CONCEPTION	33
3.1	UNE DEFINITION DU PROBLEME DE CONCEPTION	33
3.2	LES CARACTERISTIQUES COMMUNES DES PROBLEMES DE CONCEPTION	34
3.2.1	DES PROBLEMES COMPLEXES.....	34
3.2.2	LA STRATEGIE OPPORTUNISTE.....	34
3.2.3	LA STRATEGIE DE MOINDRE COMPROMISSION.....	35
3.2.4	LA TRADUCTION DE REPRESENTATIONS	36
4	MECANISMES DE PLANIFICATION ET CONTROLE COGNITIF DANS LA RESOLUTION DE PROBLEME.....	36
4.1	UNE SITUATION PRIVILEGIEE POUR OBSERVER LES MECANISMES DE PLANIFICATION	36
4.2	LE CONTROLE COGNITIF	37
4.3	HIERARCHIE DE DECOMPOSITION ET HIERARCHIE D'ABSTRACTION.....	38
5	BIBLIOGRAPHIE	39

1 INTRODUCTION

Du point de vue de l'opérateur humain, ordonnancer consiste à résoudre un problème (concevoir un ordonnancement) et ne se réduit pas simplement à une tâche computationnelle (McKay & Wiers, 1999). Dans la littérature psychologique sur la résolution de problème, plusieurs typologies de problèmes sont proposées. Par exemple, Hoc (1987) distingue les problèmes de transformation d'état¹⁰, les problèmes d'induction de structure¹¹ et les problèmes de conception. L'objectif de ce chapitre est de justifier que l'activité d'ordonnancement peut être appréhendée comme la résolution d'un problème de conception.

2 LA RESOLUTION DE PROBLEME

La paternité des travaux de modélisation de la résolution de problème en termes de processus de traitement de l'information est généralement attribuée à deux chercheurs

¹⁰ Dans les problèmes de transformation d'état, le sujet se représente le problème à la manière d'un cheminement à trouver dans un espace d'états. Des règles de transformation permettent de passer d'un état à un autre. Pour la tour de Hanoï par exemple, on représente cet espace d'états par des triangles équilatéraux emboîtés.

¹¹ Dans les problèmes d'induction de structure, le sujet se représente le problème comme la construction d'une représentation adéquate de la situation pour trouver une solution, en cherchant des relations dans un ensemble d'éléments. Dans le diagnostic médical par exemple, le médecin tente de dégager la structure d'un syndrome à partir de l'ensemble des symptômes du patient.

américains de l'*Université de Carnegie-Mellon* : Alan Newell (du Département d'Informatique) et Herbert Simon (du département de Psychologie). En utilisant la méthode de recueil des verbalisations, Newell et Simon (1972) ont construit un modèle général de résolution de problème, implémenté dans leur célèbre *General Problem Solver (GPS)*. Pour ces auteurs, la résolution de problème est définie comme la recherche d'un cheminement à l'intérieur d'un espace-problème. A partir d'états de connaissance sur le problème (état initial, états intermédiaires ou sous-buts, état final ou but), d'un ensemble d'opérateurs (règles permettant le passage d'un état à un autre) et de contraintes, la résolution du problème consiste à trouver un cheminement conduisant à l'état but. Plus précisément, le GPS analyse à tout moment l'écart au but et cherche un opérateur permettant de réduire cet écart. Puisque chaque opérateur est défini par ses conditions d'application, si ces conditions révèlent un écart entre l'état actuel et l'état but, alors le GPS cherche à nouveau un opérateur permettant de réduire cet écart. Le modèle GPS utilise donc une stratégie récursive¹² de type "fins et moyens" : une hiérarchie des buts (fins) est définie, puis des règles ou opérateurs (moyens) sont appliquées de manière récursive jusqu'à atteindre l'état but.

La résolution d'un problème dans les termes du modèle GPS (espace-problème, états, opérateurs, contraintes) fait référence à la catégorie des problèmes de transformation d'états selon Hoc (1987), pour laquelle de nombreux travaux ont été menés (par ex., le problème de la tour d'Hanoï – Anzaï & Simon, 1979 ; ou le problème des missionnaires et des cannibales – Richard, 1999). Ces problèmes sont généralement qualifiés de "bien définis" car les opérateurs, les buts et les contraintes sont connus *a priori* (Wilson & Keil, 2001), les états (initial, but, et intermédiaires) peuvent être représentés dans un espace-problème et la solution (l'état final) est unique. Mais lorsque ces conditions ne sont pas remplies, notamment lorsque les buts sont sous-spécifiés ou ambigus, les problèmes sont alors considérés comme "mal structurés" (Goel & Pirolli, 1992 ; Simon, 1973) ou "mal définis" (Reitman, 1964). A partir de connaissances en mémoire à long terme, des spécifications du problème et d'informations recueillies dans l'environnement, une part importante de la résolution consiste alors à structurer le problème (Simon, 1973). Parmi les problèmes "mal définis" se trouve la catégorie des problèmes de conception (Hoc, 1987). Nous pensons que le problème d'ordonnancement peut être appréhendé comme un problème de conception.

3 LE PROBLEME D'ORDONNANCEMENT COMME PROBLEME DE CONCEPTION

3.1 UNE DEFINITION DU PROBLEME DE CONCEPTION

Pour Hoc (1987, p.64), « *dans un problème de conception, le sujet se représente la tâche comme la construction d'une représentation détaillée du but. (...) Le but est le plus souvent défini au départ comme un ensemble de contraintes à satisfaire, mais rarement exprimé dans les termes de la représentation du but à construire* ». A partir de l'introduction progressive de contraintes, la représentation du but devient complètement spécifiée. De

¹² La récursivité est la propriété d'une fonction qui se définit en faisant appel à elle-même jusqu'à la satisfaction d'un critère d'arrêt.

même pour Lebahar (1997, p.77), « *Concevoir un produit, c'est parvenir à en construire le modèle en fonction de contraintes et d'objectifs plus ou moins bien définis au départ du travail de conception* ».

De notre point de vue, le problème d'ordonnement peut être défini comme un problème de conception, comme d'autres auteurs ont pu le faire (par ex., Thomas & Carroll, 1979, cités par Goel & Pirolli, 1992). La description de certaines caractéristiques liées à cette catégorie de problèmes (par ex., Lebahar, 1997 ; Visser, 2006, 2009) nous permet de considérer le problème d'ordonnement comme un cas particulier du problème de conception.

3.2 LES CARACTERISTIQUES COMMUNES DES PROBLEMES DE CONCEPTION

3.2.1 DES PROBLEMES COMPLEXES

Les problèmes de conception sont *complexes* car la spécification des buts est souvent incomplète voire ambiguë. Visser (2009) a proposé que pour gérer la complexité, le concepteur peut être amené à décomposer les problèmes pour les rendre plus gérables et plus faciles à résoudre. Du point de vue du concepteur, il est donc nécessaire de redéfinir les buts et de se construire une représentation du problème. Puisque cette redéfinition peut varier selon de nombreux facteurs (par ex., selon le niveau expertise), la résolution du problème de conception n'aboutit généralement pas à une unique solution optimale. Des travaux ont montré que des concepteurs confrontés à un même problème parviennent à différentes solutions acceptables.

Par exemple, à l'issue d'une tâche de conception de plans de carrefour cherchant à régler le trafic automobile, Bisseret, Figeac-Letang et Falzon (1988) ont observé que les six concepteurs ayant participé à l'expérience avaient produit six solutions différentes. Pourtant les spécifications initiales en termes de tâche prescrite (agencer des dispositifs de signalisation) et d'objectifs (sécurité et fluidité du trafic et des piétons) étaient identiques.

Dans la définition du problème d'ordonnement qu'ont proposée McKay, Safayeni et Buzacott (1988, p.85), son caractère complexe est lié à ses caractéristiques : « *how to schedule and dispatch work in such a way that many stated and unstated conflicting goals are satisfied using hard and soft information that is possibly incomplete, ambiguous, biased, outdated, and erroneous.* ». En adoptant le point de l'ordonneur, Cegarra (2004, 2008) a décrit la complexité des situations d'ordonnement. Cet auteur a proposé plusieurs caractéristiques contribuant à cette complexité : l'incertitude des informations, l'instabilité du processus, la pression temporelle, différents cycles temporels, la continuité du processus, la complexité structurale, des objectifs multiples et contradictoires.

D'un point de vue mathématique, les problèmes d'ordonnement sont complexes car ils appartiennent à la catégorie des problèmes NP-complets. L'ensemble des contraintes qui pèsent sur les tâches et sur les ressources conduit rapidement à une explosion combinatoire et à une multiplicité de solutions (Esquirol & Lopez, 1999).

3.2.2 LA STRATEGIE OPPORTUNISTE

Une autre caractéristique liée à la résolution des problèmes de conception est l'utilisation par le concepteur d'une démarche opportuniste.

Dans leur modèle *Blackboard*, Hayes-Roth et Hayes-Roth (1979) ont proposé une stratégie opportuniste de planification, reposant sur un compromis entre une méthode descendante¹³ et une méthode ascendante². La planification évoluerait alors dans des espaces plus ou moins abstraits. A partir de l'analyse de protocoles verbaux de sujets ayant réalisé une tâche de planification de courses ménagères (planifier des courses dans une ville en un temps limité), ils ont observé plusieurs types de processus au cours de la réalisation de la tâche : raffinement de plans par l'exécution d'actions, simulation mentale d'exécution de plans locaux, élaboration de plans à partir de l'identification de contraintes, ou abandon de plans.

Au cours de la tâche de conception de plans de carrefour décrite précédemment, les concepteurs ont montré des changements opportunistes d'objectifs (Bisseret et al., 1988). Dans la conception architecturale, les concepteurs articulent une démarche descendante et une démarche ascendante, car le dessin est à la fois une représentation du problème, et une simulation de solution, qui apporte des informations pour évaluer l'état actuel du projet (Lebahar, 1983). Ainsi, en réalisant des croquis, les architectes peuvent mettre en évidence des conflits entre contraintes techniques ce qui va permettre de modifier le plan (démarche ascendante).

Au cours d'une tâche d'ordonnancement, Tabe, Yamamuro et Salvendy (1990) ont noté que pour atteindre de meilleurs résultats, les ordonnanceurs changent de règle d'ordonnancement de manière opportuniste. Puisque de nombreuses perturbations peuvent apparaître dans l'environnement et que chaque changement a des répercussions sur l'ordonnancement, les règles peuvent n'être utilisées que sur des horizons temporels très courts (McKay et al., 1988).

3.2.3 LA STRATEGIE DE MOINDRE COMPROMISSION

Une troisième caractéristique commune aux problèmes de conception et d'ordonnancement concerne la *stratégie de moindre compromission*, que Stefik (1981a) a observée dans le contexte d'expériences de clonage en génétique moléculaire¹⁴. A partir d'un raffinement progressif de la solution, les concepteurs, et particulièrement les experts, reportent leurs décisions car les informations nécessaires peuvent ne pas être disponibles immédiatement.

Dans la conception de sites Web par exemple, la satisfaction des contraintes est différée par rapport à leur formulation, ce qui permet aux concepteurs experts de ne pas se compromettre trop rapidement dans des solutions qui risqueraient de devoir être profondément modifiées (Chevalier & Bonnardel, 2003). Dans la conception de réseaux informatiques, Darses (1997) a observé que l'apparition progressive de nouvelles contraintes au cours du processus de conception impose au concepteur de gérer des interactions entre

¹³ La stratégie descendante consiste à raffiner un plan jusqu'à sa mise en œuvre. Les buts, des représentations abstraites, sont décomposés en sous-buts puis ils sont particularisés. Au cours de ce raffinement progressif, les interférences entre buts sont gérées. Dans la stratégie ascendante, le plan est construit à partir de représentations détaillées de la situation (identification des contraintes). Par exemple, un plan peut être évoqué directement à partir d'indices détectés dans l'environnement (Hoc, 1987).

¹⁴ Au cours du raffinement progressif des plans (stratégie descendante de particularisation d'un but), les choix sous-contraints étaient différés.

contraintes ce qui peut l'obliger à ne pas se compromettre trop tôt ou à remettre en cause et modifier des décisions prises antérieurement.

Dans le domaine de l'ordonnancement manufacturier, McKay, Buzacott, Charness et Safayeni (1992) ont noté que les ordonnanceurs affectent en priorité les tâches les moins flexibles, se laissant alors un maximum de degrés de liberté en affectant ultérieurement les tâches les plus flexibles. Dans le domaine de la conception d'emploi du temps, Hoc, Guérin et Mebarki (sous presse – chapitre 6) ont observé cette stratégie chez les experts, qui commencent par planifier des cours sur l'emploi du temps en satisfaisant d'abord un certain type de contraintes (par ex., la disponibilité des enseignants) avant de traiter d'autres types de contraintes (par ex., la disponibilité des salles). Ce comportement montre que les experts ont tendance à différer la satisfaction de certaines contraintes, alors que les novices cherchent à tout spécifier (salle, enseignant, période, etc.) lorsqu'ils s'engagent dans la planification d'un cours.

3.2.4 LA TRADUCTION DE REPRÉSENTATIONS

La résolution d'un problème de conception nécessite surtout la traduction de représentations dans les termes de la solution. Goel (1995, p.128) définit la résolution du problème de conception comme « *at some very abstract level, is the process of transforming one set of representations (the design brief) into another set of representations (the contract document)* ». Le premier ensemble de représentations, "hétérogènes", correspond au cahier des charges (*design brief*). Ces représentations doivent être traduites dans d'autres représentations imposées par les termes de la solution (*the contract document*).

Ce processus de traduction, que l'on considère fondamental au cours de la résolution d'un problème d'ordonnancement, fera l'objet du chapitre 2. Pour le préciser, nous emprunterons à Hoc (1987) le concept de Systèmes de Représentation et de Traitement et à Stefik (1981a) son approche de la gestion de contraintes.

L'objectif principal d'un ordonnanceur consiste à concevoir un plan qui sera exécuté par des entités (opérateurs, machines). Ce plan peut être vu à la fois comme un résultat (un ordonnancement) et comme un outil de résolution de problème¹⁵ (Hoc, 1987). L'étude de l'ordonnancement devient alors une situation privilégiée pour observer les mécanismes de planification.

4 MECANISMES DE PLANIFICATION ET CONTROLE COGNITIF DANS LA RESOLUTION DE PROBLEME

4.1 UNE SITUATION PRIVILEGIEE POUR OBSERVER LES MECANISMES DE PLANIFICATION

Pour Hoc (1987), deux mécanismes peuvent être articulés au cours de la résolution d'un problème : l'exécution et l'élaboration de procédures. Un but peut-être atteint à partir de

¹⁵ En Français, le terme d'ordonnancement désigne à la fois une activité et le résultat de cette activité, ce qui peut prêter à confusion. Cette confusion disparaît en Anglais (*scheduling* pour l'activité et *schedule* pour le résultat).

l'exécution d'une séquence d'opérations organisée et stockée en mémoire. Dans ce cas, le sujet ne résout pas un problème puisqu'il lui suffit d'exécuter la procédure dont il dispose. En revanche, en l'absence d'une procédure immédiatement disponible, celle-ci doit être élaborée (Visser, 2009). C'est particulièrement ce processus de construction de procédure qui est défini comme une activité de résolution de problème. Pour Hoc (1987), il s'agit d'une situation privilégiée pour observer les *mécanismes de planification*.

Parmi les mécanismes décrits par l'auteur, la hiérarchisation et la schématisation (abstraction) nous intéressent particulièrement. En effet, *la planification se développe dans des espaces abstraits ce qui implique des changements de représentation et différents niveaux de contrôle des processus cognitifs*.

4.2 LE CONTROLE COGNITIF

Hoc et Amalberti (2007) ont proposé un cadre théorique pour décrire les différents niveaux de contrôle cognitif (figure 1). Nous ne développerons que certains aspects du modèle. Plus précisément, deux dimensions orthogonales permettent de caractériser les différents modes de contrôle cognitif : le niveau d'abstraction des données nécessaires au contrôle (symboliques contre subsymboliques), et l'origine de ces données (internes contre externes).

Parmi ces deux dimensions orthogonales, nous emprunterons aux auteurs la dimension "origine des données" pour distinguer le contrôle cognitif interne du contrôle externe (figure 1). Le mode de contrôle externe s'appuie notamment sur les travaux de Zhang et Norman (1994), pour qui la cognition ne dépend pas seulement de représentations internes mais repose aussi sur des représentations externes qui permettent à la fois de réduire la charge mentale et de structurer l'activité cognitive.

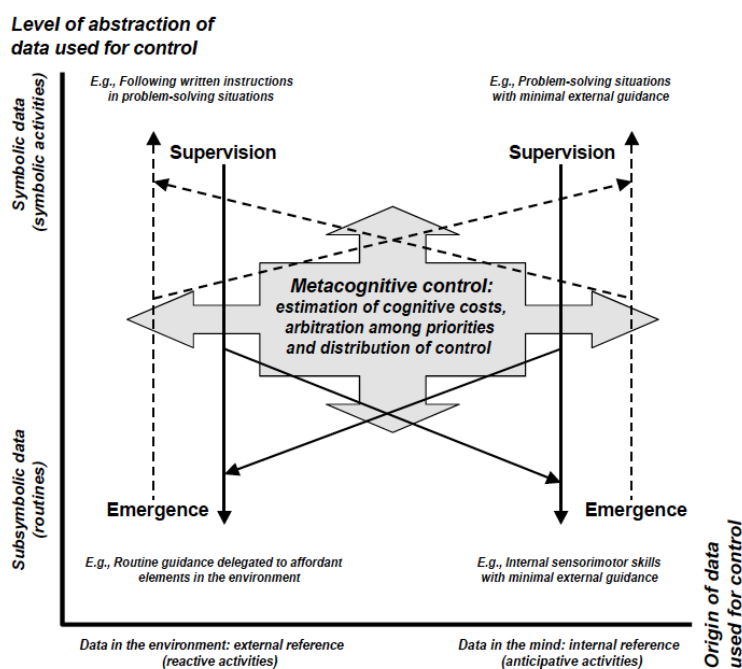


Figure 1 : Modèle du contrôle cognitif proposé par Hoc & Amalberti (2007). Deux dimensions orthogonales sont distinguées : en ordonnée, le niveau d'abstraction des données (symboliques contre subsymboliques), et en abscisse, l'origine des données (internes contre externes).

La planification (et donc l'ordonnement) implique également des changements de représentation dans des espaces abstraits. Pour décrire ces changements, Rasmussen (1985, 1986) a proposé deux hiérarchies orthogonales : la hiérarchie de décomposition et la hiérarchie d'abstraction.

4.3 HIERARCHIE DE DECOMPOSITION ET HIERARCHIE D'ABSTRACTION

Dans ses travaux, Rasmussen (1985, 1986) a examiné le raisonnement et la résolution de problèmes dans un contexte industriel de diagnostic de pannes, mais aussi et surtout pour décrire les activités des concepteurs (par ex., la conception de machines à laver). Cet auteur a proposé deux dimensions orthogonales dans l'abstraction :

- La hiérarchie tout/partie ou de décomposition (ou hiérarchie de raffinement selon Hoc, 1987) qui permet de décrire la décomposition d'un tout en ses parties. Par exemple, le sommaire d'un livre est un plan qui peut être décomposé en chapitres. Ainsi plus on monte dans la hiérarchie, plus les détails sont supprimés.
- La hiérarchie d'abstraction (ou hiérarchie de mise en œuvre selon Hoc, 1987) qui permet une décomposition fonctionnelle à partir de relations "comment" et "pourquoi". Les plus hauts niveaux de la hiérarchie définissent des fonctions (buts et objectifs), alors que les plus bas niveaux décrivent les composants physiques permettant leur mise en œuvre. Par exemple, la fonction générale de chauffage peut être implémentée par différents systèmes techniques (gaz, électricité, fuel) ce qui implique l'utilisation de différents composants physiques (qui appartiennent à différents Systèmes de Représentation et de Traitement – chapitre 2).

La résolution d'un problème peut alors être représentée comme un parcours à l'intérieur du croisement de ces deux dimensions (figure 2).

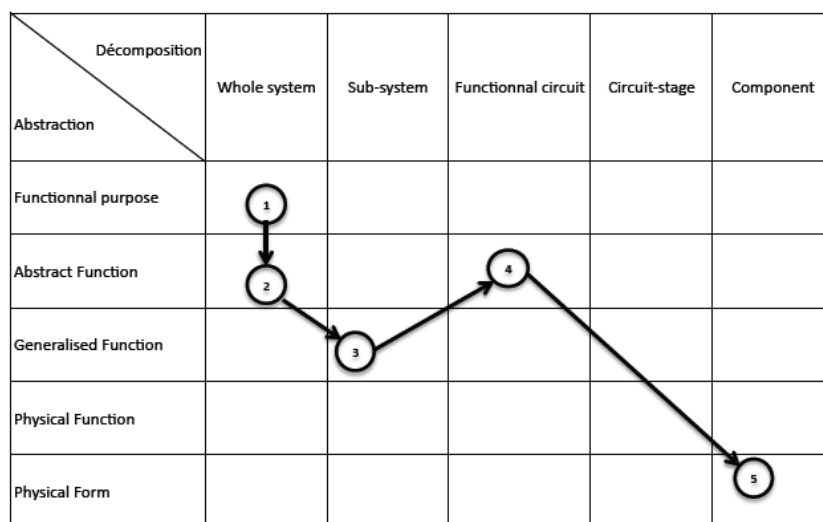


Figure 2 : Deux dimensions orthogonales dans l'abstraction selon Rasmussen (1985, 1986) : la hiérarchie de décomposition et la hiérarchie d'abstraction. Des parcours de résolution de problèmes peuvent être représentés à l'intérieur du croisement des deux dimensions.

Par ailleurs, l'utilisation des niveaux d'abstraction de Rasmussen (1986) pour étudier l'activité d'ordonnement avait été suggérée par MacCarthy, Wilson et Crawford (2001, p.308) : « *If scheduling is to be studied via the mental models of the schedulers, then*

methods must be found (perhaps using Rasmussen's (1986) levels of abstraction) to investigate, exemplify, and differentiate models of the manufacturing facility, the scheduling information system or display, and the schedule itself ».

Dans la suite de cette thèse, les concepts de contrôle cognitif et de hiérarchie d'abstraction vont nous permettre de définir deux *niveaux de représentation et de contrôle des processus cognitifs dans la résolution du problème d'ordonnancement*: le plus haut niveau d'abstraction concernera les plans (buts et procédures) considérés par l'ordonnanceur et le plus bas niveau décrira leur mise en œuvre en termes de gestion de contraintes et d'objets (chapitre 2).

5 BIBLIOGRAPHIE

- Anzai, Y., & Simon, H.A. (1979). The theory of learning by doing. *Psychological Review*, 86, 124-140.
- Bisseret, A., Figeac-Letang, C., & Falzon, P. (1988). Modélisation de raisonnements opportunistes : l'activité des spécialistes de régulation des carrefours à feux. *Psychologie Française*, 33, 161-169.
- Cegarra, J. (2004). *La gestion de la complexité dans la planification : le cas de l'ordonnancement*. Thèse, Université Paris 8, France.
- Cegarra, J. (2008). A cognitive typology of scheduling situations: a contribution to laboratory and field studies. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 9, 201-222.
- Chevalier, A., & Bonnardel, N. (2003). Prise en compte et gestion de contraintes : une étude dans la résolution d'un problème créatif de conception. *Bulletin de Psychologie*, 56, 33-48.
- Darses, F. (1997). Contraintes & Gestion des contraintes. In M. de Montmollin (Ed.), *Vocabulaire de l'Ergonomie*, (pp. 99-106). Toulouse : Octarès (seconde édition revue et augmentée).
- Esquirol, P., & Lopez, P. (1999). *L'ordonnancement*. Paris : Economica.
- Goel, V. (1995). *Sketches of thought*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Goel, V., & Pirolli, P. (1992). The structure of design problem spaces. *Cognitive Science*, 16, 395-429.
- Hayes-Roth, B., & Hayes-Roth, F. (1979). A cognitive model of planning. *Cognitive Science*, 3, 275-310.
- Hoc, J.M. (1987). *Psychologie cognitive de la planification*. Grenoble: Presses Universitaires de Grenoble.
- Hoc, J.M., & Amalberti, R. (2007). Cognitive control dynamics for reaching a satisficing performance in complex dynamic situations. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1, 22-55.
- Hoc, J.M., Guerin, C., & Mebarki, N. (sous presse). The nature of expertise in scheduling: the case of timetabling. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*.

- Lebahar, J.C. (1983). *Le dessin d'architecte*. Roquevaire, France: Editions Parenthèses.
- Lebahar, J.C. (1997). La simulation, instrument de représentation et de régulation dans la conception de produit. In P. Béguin & A. Weill-Fassina (Eds.), *La simulation en ergonomie : connaître, agir et interagir* (pp. 77-96). Toulouse : Octarès Editions.
- MacCarthy, B.L., Wilson, J.R., & Crawford, S. (2001). Human performance in industrial scheduling: a framework for understanding. *International Journal of Human Factors in Manufacturing*, 11, 63-77.
- McKay, K.N., & Wiers, V.C.S. (1999). Unifying the theory and practice of production scheduling. *Journal of Manufacturing Systems*, 18, 241-255.
- McKay, K.N., Safayeni, F.R., & Buzacott, J.A. (1988). Job-shop scheduling theory: what is relevant? *Interfaces*, 18, 84-90.
- McKay, K.N., Buzacott, J.A., Charness, N., & Safayeni, F.R. (1992). The scheduler's predictive expertise: an interdisciplinary perspective. In G.I. Doukidis & R.J. Paul (Eds.), *Artificial Intelligence in Operational Research* (pp. 139-150). London: MacMillan Press.
- Newell, A., & Simon, H.A. (1972). *Human Problem Solving*. Englewoods Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Rasmussen, J. (1985). The role of hierarchical knowledge representation in decision-making and system management. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, SMC-15*, 234-243.
- Rasmussen, J. (1986). *Information processing and human-machine interaction*. Amsterdam: Elsevier.
- Reitman, W. (1964). Heuristic decision procedures, open constraints, and the structure of ill-defined problems. In M.W. Shelley & G.L. Bryan (Eds.), *Human judgments and optimality*. New York: Wiley.
- Richard, J.F. (1999). Comportements, buts et représentations. *Psychologie Française*, 44, 75-90.
- Simon, H.A. (1973). The structure of ill structured problems. *Artificial Intelligence*, 4, 181-201.
- Stefik, M. (1981a). Planning with constraints (MOLGEN: Part1). *Artificial Intelligence*, 16, 111-140.
- Tabe, T., Yamamuro, S., & Salvendy, G. (1990). Knowledge elicitation in scheduling FMS: towards a hybrid intelligent system. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 5, 17-27.
- Thomas, J.C., & Carroll, J.M. (1979). The psychological study of design. *Design Studies*, 1, 5-11.
- Visser, W. (2006). *The cognitive artifacts of designing*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Visser, W. (2009). La conception : de la résolution de problèmes à la construction de représentations. *Le Travail Humain*, 72, 61-78.

- Wilson, R.A., & Keil, F.C. (2001). *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Zhang, J., & Norman, D.A. (1994). Representations in distributed cognitive tasks. *Cognitive Science*, 18, 87-122.

CHAPITRE 2 : GESTION DE CONTRAINTES ET SYSTEMES DE REPRESENTATION ET DE TRAITEMENT DANS L'ACTIVITE D'ORDONNANCEMENT

1	INTRODUCTION.....	42
2	LA GESTION DE CONTRAINTES DANS LA RESOLUTION DE PROBLEME EN GENERAL.....	42
3	LA GESTION DE CONTRAINTES DANS LES PROBLEMES DE CONCEPTION EN PARTICULIER : LE POINT DE VUE DES SYSTEMES DE REPRESENTATION ET DE TRAITEMENT.....	43
4	LA GESTION DE CONTRAINTES DANS L'ACTIVITE D'ORDONNANCEMENT.....	44
5	UNE FORMALISATION DE LA NOTION DE CONTRAINTE.....	45
5.1	DES EXEMPLES DE DEFINITION DANS LA LITTERATURE.....	45
5.2	LA NOTION DE CONTRAINTE DANS LES TRAVAUX DE STEFIK.....	46
5.2.1	TROIS OPERATIONS SUR LES CONTRAINTES.....	46
5.2.2	LA DEFINITION DE LA CONTRAINTE PAR STEFIK.....	46
5.3	PROLONGER LA DEFINITION DE STEFIK : CONTRAINTES ET OBJETS.....	47
5.4	EXEMPLES DE SRTs EXTERNES REPRESENTANT UNE SOLUTION AU PROBLEME D'ORDONNANCEMENT.....	47
5.4.1	L'EMPLOI DU TEMPS.....	47
5.4.2	LE DIAGRAMME DE GANTT.....	49
6	UNE PROPOSITION DE DEFINITION DE L'ORDONNANCEMENT.....	51
7	BIBLIOGRAPHIE.....	51

1 INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre est de considérer l'activité d'ordonnancement comme impliquant la gestion de contraintes qui peuvent s'exprimer dans différents Systèmes de Représentation et de Traitement (SRTs). Il s'agira alors d'emprunter le concept de SRT proposé par Hoc (1987) et de préciser que des contraintes doivent être intégrées dans un SRT externe, système représentant une solution au problème d'ordonnancement. Une distinction fondamentale entre la notion de contrainte et celle d'objet nous permettra ensuite de décrire les stratégies humaines mises en œuvre dans la conception d'emploi du temps et dans l'ordonnancement manufacturier.

2 LA GESTION DE CONTRAINTES DANS LA RESOLUTION DE PROBLEME EN GENERAL

Les travaux sur la résolution de problème en général ont déjà identifié et modélisé l'activité de gestion de contraintes (par ex., Richard, Poitrenaud, & Tijus, 1993). Pour Richard (2004, p.227) : « *fondamentalement, résoudre un problème, c'est essayer de satisfaire à un certain nombre de contraintes* ». Dans le cadre théorique développé par Jean-François Richard (Richard, 1999 ; Richard et al., 1993), la contrainte est définie comme une restriction des réponses comportementales (actions) *a priori* possibles. A un instant "t", la représentation d'un problème peut être décrite sous forme d'une liste de contraintes de trois types, résultant de trois éléments :

- L'interprétation de la consigne. Par exemple, dans le célèbre problème de transformation d'états de la tour d'Hanoï (figure 3), la contrainte "ne pas déplacer plus d'un disque à la fois" est une bonne interprétation de la consigne. En revanche, une interprétation erronée de la consigne peut conduire à des contraintes comme "ne pas sauter une tige", ou même, plus précisément "lorsque je transporte un disque d'une tige à l'autre, je ne dois pas sauter une tige comportant un disque plus petit que le disque transporté".
- Des heuristiques générales de résolution de problème. Il s'agit là par exemple de "règles de bon sens" comme "ne pas réaliser un mouvement qui annule celui qui vient d'être fait" (retour en arrière).
- Des buts que se fixe l'individu. Un but étant défini comme un état, les contraintes sur les buts sont des écarts entre un état actuel et un état attendu après un mouvement envisagé. L'action permet alors de réduire ce type de contrainte. Par exemple, le passage du disque 1 de la tige A vers la tige B (but n°1) nécessite une seule action (figure 3). Il y a donc un écart de 1 entre ces deux états. En revanche, le passage du disque 2 de la tige A vers la tige B (but n°2), nécessite deux actions (le disque 1 sur la tige C puis le disque 2 sur la tige B). Il y a donc un écart de 2 entre ces deux états. Le but n°2 est donc plus contraignant que le but n°1.

Le problème de la tour d'Hanoï consiste à déplacer, en un minimum de coups, des disques de diamètres différents d'une tige de "départ" (tige A) vers une tige "d'arrivée" (tige C) en utilisant autant que de besoin la tige "intermédiaire" (tige B). Les règles suivantes doivent être respectées :

- on ne peut pas déplacer plus d'un disque à la fois ;
- on ne peut déplacer un disque que sur un autre disque plus grand ou sur une tige vide.

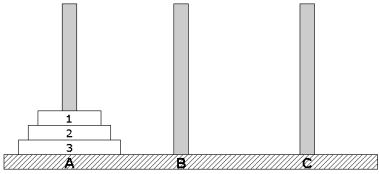


Figure 3 : Le problème de la tour d'Hanoï. La tâche est de déplacer des disques de la tige A vers la tige C en respectant des règles.

3 LA GESTION DE CONTRAINTES DANS LES PROBLEMES DE CONCEPTION EN PARTICULIER : LE POINT DE VUE DES SYSTEMES DE REPRESENTATION ET DE TRAITEMENT

La gestion de contraintes a également été mise en évidence dans des travaux sur la résolution de problèmes de conception en particulier, dans des situations aussi variés que la conception architecturale (Lebahar, 1983, 1997), la conception d'expériences de clonage en génétique moléculaire (Stefik, 1981a), la conception de réseaux informatiques (Darses, 1991, 1994), ou la conception de sites Web (Chevalier & Bonnardel, 2003).

Pour Hoc (1987), les contraintes d'un problème peuvent s'exprimer dans différents Systèmes de Représentation et de Traitement (SRTs), un SRT étant défini comme « *le produit de l'intériorisation d'un domaine de tâches, reliant des représentations et des traitements associés aux objets, aux propriétés et aux opérations du domaine, donc au dispositif de ce domaine* » (p.34).

La notion de domaine de tâches se rapproche de celle de domaine de travail, utilisée par Vicente (1999) dans sa méthode d'analyse permettant d'identifier les contraintes imposées par un domaine de travail. Le domaine de tâches est une classe de tâches pouvant être

réalisées grâce à un dispositif. Le dispositif utilisé pour réaliser une tâche (par ex., exécuter la solution d'un problème) est défini par un ensemble de règles d'utilisation et de fonctionnement. Par exemple, l'utilisation d'un langage de programmation pour concevoir un programme informatique doit respecter un ensemble de règles propres à ce langage (par ex., la syntaxe, le lexique). Au cours de ses expériences, l'individu va se construire une structure de connaissances, ou modèle interne¹⁶, liée à l'utilisation d'un dispositif. C'est cette structure de connaissances que Hoc (1987) appelle SRT, et qui est une représentation intériorisée d'un domaine de tâches. Pendant la réalisation d'une tâche de résolution de problème, l'activation de SRTs va permettre à l'individu de générer des représentations compatibles avec le langage du dispositif, en lien avec des traitements associés. Il s'agira donc pour l'individu de traduire ces représentations afin de les rendre compatibles dans les termes de la solution au problème, un SRT externe unique.

Par exemple, la conception d'un programme informatique nécessitera d'intégrer, dans le SRT externe (le programme), différents types de connaissances sur la programmation, comme l'algorithmique (Soloway, Adelson, & Ehrlich, 1988), le langage de programmation utilisé, mais aussi des connaissances liées au problème traité. Au cours d'une expérience sur un problème de programmation d'une distributrice de tickets de métro, Hoc (1977) a observé la mise en œuvre de plusieurs SRTs dont certains étaient liés au domaine de la programmation informatique et d'autres à celui des mathématiques ou de la compatibilité. Des confusions entre ces SRTs pouvaient être à la source d'erreurs, par exemple l'addition de codes numériques d'identification de pièces de monnaie pour calculer une somme d'argent.

Dans le cas de la conception d'un plan architectural, Lebahar (1983) a noté que les spécifications du cahier des charges d'un bâtiment expriment une variété de contraintes : propriétés fonctionnelles, contraintes topologiques, contraintes métriques, coût et type matériaux, etc. L'ensemble de ces contraintes doit alors être intégré dans un même SRT, une représentation graphique tridimensionnelle d'un bâtiment, permettant la mise en œuvre du plan. Par ailleurs, l'activité de conception (par ex., de cockpits d'hélicoptères, de carrosseries automobiles – Lebahar, 1997) peut aussi impliquer de considérer des informations émises par différents services (marketing, bureaux d'études techniques, etc.) comme c'est le cas, nous le verrons plus loin, dans l'ordonnancement. Le concepteur peut alors être amené à régler des conflits entre contraintes par le moyen de négociations.

4 LA GESTION DE CONTRAINTES DANS L'ACTIVITE D'ORDONNACEMENT

La présence de contraintes temporelles dans l'ordonnancement est une caractéristique importante de cette activité. Pour Crawford et Wiers (2001, p.35), ces contraintes fondent même l'existence de ces problèmes : « *If there were no time constraints, there would be no scheduling problem* ». Même si les contraintes temporelles restent une catégorie de

¹⁶ Le concept de SRT proposé par Hoc (1987) se rapproche de la notion de modèle mental lié au dispositif (Wilson & Rutherford, 1989) ou de l'idée de "point de vue" développée en Intelligence Artificielle (Par ex. : Attardi & Simi, 1995). Par ailleurs, l'idée selon laquelle les ordonnanceurs utiliseraient des formes de représentations internes (ou modèles mentaux) pour prendre des décisions d'ordonnancement a été suggérée par des auteurs comme McKay, Safayeni et Buzacott (1988) ou MacCarthy et Wilson (2001).

contraintes très prégnante, d'autres types de contraintes sont généralement considérés par l'ordonnanceur.

A partir d'une série d'enquêtes et d'études de terrain menées par McKay, Safayeni et Buzacott (1988) dans le secteur manufacturier, ces auteurs ont pu mettre en évidence la diversité des contraintes existantes, et auxquelles l'ordonnanceur accorde plus ou moins d'importance. Parmi les quelques 200 contraintes recueillies, et classées dans les catégories contraintes opérationnelles, physiques, administratives, humaines, etc., étaient présentes des contraintes aussi variées que les durées de traitement des machines, le climat (au sens de la météo) voire l'humeur des ouvriers.

Par ailleurs, plusieurs auteurs (Crawford & Wiers, 2001 ; Fox, 1990 ; McKay, Safayeni, & Buzacott, 1988 ; Sanderson, 1989) ont noté que l'ordonnanceur passe 80 à 90 % du temps à déterminer les contraintes pertinentes à traiter, notamment celles qui pourraient affecter l'ordonnancement, et le reste à ordonnancer. Pour cela, il va communiquer avec d'autres employés : avec l'atelier pour connaître les pannes de machines ou pour savoir si des opérations alternatives sont envisageables, avec le service client pour être au courant de modification dans des dates de livraison, etc. Cette importance que revêt la considération des contraintes par les ordonnanceurs illustre bien la complexité des problèmes d'ordonnancement.

Dans un autre domaine, la conception d'emploi du temps universitaire (Hoc, Guerin, & Mebarki, sous presse – chapitre 6), plusieurs types de contraintes sont également considérées par l'ordonnanceur et concernent différents points de vue (SRT) : celui des enseignants (par ex., la compétence à enseigner un type de module), celui des étudiants (par ex., la répartition de la charge de travail), celui des salles (par ex., la disponibilité), ou celui des modules d'enseignement (par ex., un cours magistral doit précéder des travaux pratiques).

Malgré une gestion de contraintes qui apparaît centrale dans l'ordonnancement, ce type de représentations manipulées par l'ordonnanceur n'a pas été formalisé dans ce contexte (Hoc, Mebarki, & Cegarra, 2004 ; McKay, 2001). Dans cette thèse, on se propose d'emprunter à la littérature sur la résolution de problèmes de conception, une conceptualisation de la gestion de contraintes, puis de la mettre en perspective avec le concept de SRT proposé par Hoc (1987).

5 UNE FORMALISATION DE LA NOTION DE CONTRAINTE

5.1 DES EXEMPLES DE DEFINITION DANS LA LITTERATURE

Dans les travaux issus de l'intelligence artificielle et de la psychologie de la résolution de problème, plusieurs définitions de la contrainte ont été proposées (Chevalier & Cegarra, 2008). Par exemple en intelligence artificielle, Sutherland (1963) a défini la contrainte comme une représentation spécifique d'une relation entre variables qui réduit le nombre de degrés de liberté du système. Dans le domaine de la résolution de problème, Richard (1999) a défini la contrainte comme une restriction des actions possibles. Dans le domaine plus spécifique de la conception, Lebahar (1983) a proposé de définir la contrainte comme une interprétation des données initiales du problème. Pour étudier la

conception de réseaux informatiques, Darses (1991, 1994) a proposé qu'une contrainte soit notamment une relation de dépendance entre variables. Par exemple, dans l'expression "selon la taille du bâtiment, on mettrait des routeurs plus ou moins grands", la contrainte met en relation la variable "capacité des routeurs" avec la variable "taille du bâtiment". Dans le domaine de l'ordonnancement, une contrainte est définie comme une règle limitant la solution d'un problème (van Wezel & Jorna, 2006), définition se rapprochant alors de celle proposée par Jean-François Richard.

Pour décrire l'activité de gestion de contraintes dans l'ordonnancement, nous avons privilégié une interprétation de la contrainte proposée par Stefik (1981a).

5.2 LA NOTION DE CONTRAINTE DANS LES TRAVAUX DE STEFIK

5.2.1 TROIS OPERATIONS SUR LES CONTRAINTES

Dans le domaine de la génétique moléculaire, Stefik (1981a) a proposé de concevoir des expériences de clonage de gène¹⁷ à partir d'une planification hiérarchique, qu'il a formalisée dans son programme informatique MOLGEN. Cette approche adoptait une stratégie descendante, dans laquelle le problème était décomposé en sous-problèmes quasi indépendants. Pour traiter des interactions entre sous-problèmes, l'auteur a introduit la notion de contrainte et a proposé trois opérations : la formulation de contrainte, la propagation de contraintes et la satisfaction de contrainte.

Dans la présentation de notre schème de codage (chapitre 5), nous verrons que la résolution du problème d'ordonnancement sera décrite à partir de ces opérations et d'autres que nous introduirons. Sur la base du travail de Stefik (1981a), on proposera que l'activité d'ordonnancement consiste notamment à prendre connaissance des contraintes du problème (contraintes formulées), qui peuvent être combinées entre elles pour générer de nouvelles contraintes (contraintes propagées), avant de trouver une solution (contraintes satisfaites).

Par ailleurs, ces opérations sont depuis plusieurs années exploitées dans des travaux menés par l'intelligence artificielle ou par la recherche opérationnelle, et ont permis de développer plusieurs méthodes. Par exemple des méthodes de satisfaction de contraintes (Fox, 1990) qui explorent l'espace des solutions admissibles en exploitant "intelligemment" les contraintes du problème. Cette méthode utilise le principe de la propagation de contraintes en faisant appel à un ensemble de techniques de filtrage, à partir de l'interaction entre contraintes. L'approche permet alors d'affiner la connaissance des valeurs admissibles des variables qui définissent les contraintes (Esquirol & Lopez, 1999).

5.2.2 LA DEFINITION DE LA CONTRAINTE PAR STEFIK

Pour Stefik (1981a), une contrainte est une relation entre variables permettant de décrire partiellement un objet (« *a relationship among plan variables [...] A constraint is essentially a*

¹⁷ Le but des expériences de clonage de gène (séquence d'ADN) est d'utiliser des bactéries comme des systèmes biologiques permettant de synthétiser une protéine. Stefik (1981a, 1981b) a particulièrement travaillé sur une expérience de clonage de gène permettant la synthèse de l'insuline chez le rat.

partial description of an object », p.114). Pour transmettre un gène à une bactérie, il faut que le vecteur qui le porte puisse passer à travers la membrane cellulaire de cette bactérie. La bactérie et le vecteur doivent donc être biologiquement compatibles. Dans cet exemple, la contrainte est définie par une relation entre la variable "bactérie" et la variable "vecteur". Cette relation permet de définir partiellement un objet (c'est à dire la solution) puisque tous les vecteurs qui ne sont pas compatibles avec la bactérie sont éliminés.

Dans cette définition de la contrainte proposée par Stefik (1981a), la distinction entre la notion de contrainte et celle d'objet nous apparaît floue. Nous proposons donc de préciser ces concepts en prolongeant la définition de l'auteur.

5.3 PROLONGER LA DEFINITION DE STEFIK : CONTRAINTES ET OBJETS

A la suite de Stefik (1981a), nous proposons de distinguer un sens large et un sens strict pour différencier la contrainte de l'objet. Au sens large, la contrainte et l'objet sont définis par une relation entre variables. Mais en adoptant un sens strict, *la contrainte n'est pas représentée dans les termes de la solution au problème, alors que l'objet représente la satisfaction de contrainte(s) dans les termes de la solution.*

Plus précisément, du point de vue des Systèmes de Représentation et de Traitement (Hoc, 1987), *la contrainte n'est pas représentée dans le SRT requis par la solution, alors que l'objet représente la satisfaction de contrainte(s) dans ce SRT externe.* Le SRT de la solution permet donc de rendre visible la satisfaction de certaines contraintes (des relations entre variables), que l'on appelle des objets. En d'autres termes, la structure des objets n'exprime que la satisfaction visible de certaines contraintes.

Pour illustrer cette définition, nous donnerons dans le paragraphe suivant des exemples de contraintes et d'objets en nous appuyant sur deux SRT externes, l'emploi du temps et le diagramme de *Gantt*, qui ont spécifiquement été utilisés pour deux études (chapitres 6 et 7).

5.4 EXEMPLES DE SRTs EXTERNES REPRESENTANT UNE SOLUTION AU PROBLEME D'ORDONNANCEMENT

La résolution d'un problème requiert un SRT externe pour représenter la solution. *A priori*, il existe une multitude de SRT externes, différents selon les activités de conception, y compris dans les activités d'ordonnancement. L'emploi du temps et le diagramme de *Gantt* sont deux exemples pouvant être utilisés dans l'ordonnancement.

5.4.1 L'EMPLOI DU TEMPS

Dans la conception d'emploi du temps universitaire, les contraintes sont liées à différents types de relations parmi cinq variables : groupe d'étudiants, salle, enseignant, module¹⁸ et période. Lorsque l'on conçoit un emploi du temps, on peut choisir de représenter en lignes les jours de la semaine et les groupes d'étudiants, et en colonnes les créneaux horaires (figure 4). Chaque "case" de l'emploi de temps est un objet qui représente la satisfaction de certaines contraintes.

¹⁸ Un module est défini par l'association d'une discipline (ex. mathématiques, français, ordonnancement, etc.) et d'une modalité pédagogique (ex. : cours magistral, travaux dirigés, travaux pratiques, devoir surveillé).

		8h	9h15	9h30	10h45	11h	12h15		13h45	15h	15h15	16h30	16h45	18h
LUNDI	Gpe1	TD ANGLAIS - MURPHY		TD OPTION - EVRARD - Salle TD1		TD GEOGRAPHIE - LECUYER - Salle TD1		Repas	CM ECONOMIE - BOCHET - Amphi 1				TD ECONOMIE - BOCHET - Salle TD1	
	Gpe2			TD ANGLAIS - MURPHY		TD OPTION - EVRARD - Salle TD2								
	Gpe3	TD OPTION - EVRARD - Salle TD3		TD GEOGRAPHIE - LECUYER - Salle TD4										
MARDI	Gpe1	TP CHIMIE - SEVESTRE - Salle TP1						Repas	TD MATHÉMATIQUES		TD MATHÉMATIQUES			
	Gpe2												TD ECONOMIE - BOCHET - Salle TD1	
	Gpe3			TD ECONOMIE - BOCHET - Salle TD1		TP CHIMIE			TD FRANÇAIS - MOUNIR - Salle TD3		TD FRANÇAIS - MOUNIR - Salle TD3			
MERCREDI	Gpe1	TP PHYSIQUE - BEAUJARD - Salle TP2		TP PHYSIQUE - BEAUJARD - Salle TP2		TP PHYSIQUE - BEAUJARD - Salle TP2		Repas						
	Gpe2			TD MATHÉMATIQUES		TD MATHÉMATIQUES - COUVRAND - Salle TD2			TP PHYSIQUE - BEAUJARD - Salle TP2		TP PHYSIQUE - BEAUJARD - Salle TP2		TP PHYSIQUE - BEAUJARD - Salle TP2	
	Gpe3			TP INFORMATIQUE - COURONNE - Salle TP1		TP INFORMATIQUE - COURONNE - Salle TP1								
JEUDI	Gpe1							Repas						
	Gpe2								TD FRANÇAIS - MOUNIR		TD FRANÇAIS - MOUNIR		TP CHIMIE - SEVESTRE - Salle TP1	
	Gpe3								TP PHYSIQUE - BEAUJARD - Salle TP2		TP PHYSIQUE - BEAUJARD - Salle TP2		TP PHYSIQUE - BEAUJARD - Salle TP2	
VENDREDI	Gpe1			DS HISTOIRE - PELLERIN				Repas	TD FRANÇAIS - MOUNIR - Salle TD3		TD FRANÇAIS - MOUNIR - Salle TD3			
	Gpe2													
	Gpe3													

Figure 4 : Représentation d'un emploi du temps universitaire. En lignes sont indiqués les jours de la semaine et les numéros de groupe. Les créneaux horaires sont en colonnes. Chaque "case" de l'emploi du temps correspond à un objet.

Par exemple, une contrainte peut être "un Cours Magistral d'économie doit être planifié pour les 3 groupes d'étudiants". La satisfaction de cette contrainte peut être représentée dans un objet de l'emploi du temps. La figure 4 montre que cette contrainte est satisfaite puisque le cours magistral d'économie est planifié pour les trois groupes le lundi après-midi et il apparaît dans un objet de l'emploi du temps (CM économie). Mais pour satisfaire cette contrainte, on peut distinguer deux types d'objets (figure 5) :

- Les *objets abstraits* (ou partiellement définis). Pour qu'un objet abstrait "existe", il faut qu'au minimum les valeurs de trois variables soient renseignées dans l'emploi du temps : groupe(s) d'étudiants, période, et salle et/ou enseignant et/ou module. La figure 5 donne l'exemple d'un objet abstrait défini par un triplet de valeurs (groupes 1-2-3, SALLE ?, ENSEIGNANT ?, CM économie, lundi 13h45-16h30). Ici, la valeur des variables "salle" et "enseignant" n'est pas renseignée.
- Les *objets concrets* (entièrement définis). La valeur des cinq variables est renseignée dans l'emploi du temps. La figure 5 donne l'exemple d'un objet concret (groupes 1-2-3, amphithéâtre 1, M. Bochet, CM économie, lundi 13h45-16h30) qui est donc un quintuplet de valeurs.

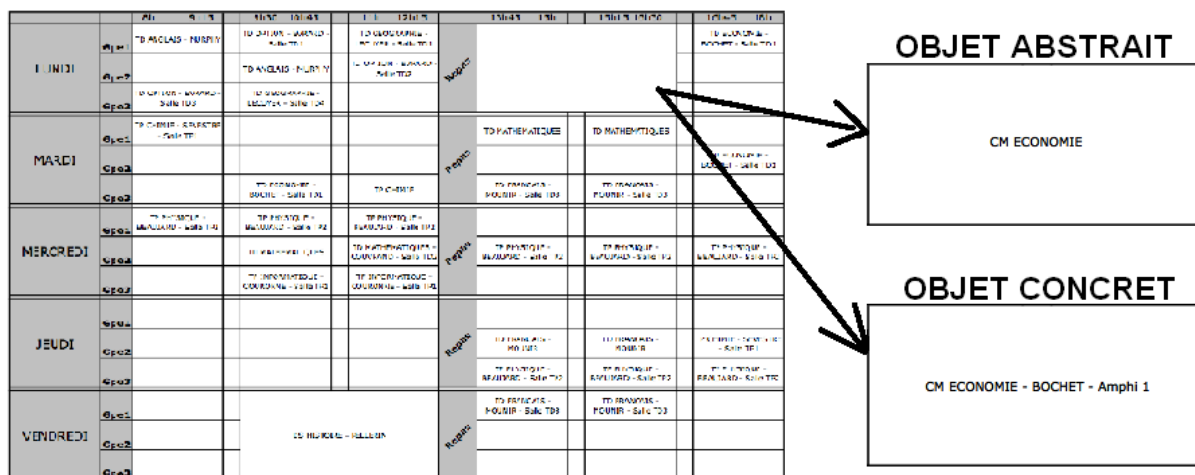


Figure 5 : L'objet qui satisfait de manière visible la contrainte "un Cours Magistral doit être planifié pour les 3 groupes d'étudiants" peut être abstrait (partiellement défini) ou concret (entièrement défini).

Par ailleurs, certaines satisfactions de contraintes ne sont pas rendues visibles par les objets. Prenons la contrainte "M. Bochet ne peut pas enseigner le mercredi car il est indisponible". Avec cet exemple, tous les objets de l'emploi du temps impliquant cet enseignant et un jour différent du mercredi satisferont cette contrainte (le lundi après-midi y compris, Cf. figure 5). Mais il est impossible de représenter cette contrainte directement sur cet emploi du temps qui adopte le point de vue des étudiants. Cette contrainte pourrait toutefois être représentée dans un SRT séparé, selon le point de vue de l'emploi du temps de l'enseignant. De même, la contrainte "les CM se font dans des amphithéâtres", est rendue visible par tous les objets définis par la combinaison des valeurs "CM" et "amphi". En revanche, la contrainte "l'amphithéâtre n°1 n'est pas disponible le mercredi" n'est pas rendue visible par un objet particulier. Cette contrainte pourrait être représentée selon le point de vue de l'emploi du temps de cette salle.

5.4.2 LE DIAGRAMME DE GANTT

Le diagramme de *Gantt* (Clark, 1952) est un SRT externe qui permet de visualiser graphiquement l'exécution des tâches et/ou l'occupation des ressources au cours du temps. Il existe différents formats de diagramme de *Gantt* : celui basé sur les machines (le temps est indiqué en abscisse et les machines sont en ordonnée) ou celui basé sur les tâches (le temps est en abscisse et les tâches en ordonnée).

Dans un diagramme de *Gantt* basé sur les tâches (figure 6), celles-ci sont représentées par des segments de couleur différente, et dont la longueur est proportionnelle à la durée prévue. Toutefois, ce type de représentation ne permet pas de visualiser l'utilisation des ressources requises.

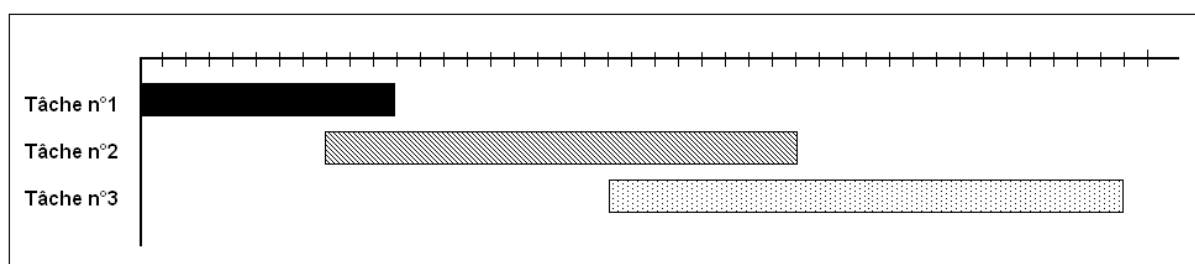


Figure 6 : Exemple de diagramme de *Gantt* basé sur les tâches (3 tâches).

Dans l'ordonnancement manufacturier, on accorde une importance supplémentaire à la disponibilité des ressources. C'est pourquoi le diagramme de *Gantt* basé sur les machines est utilisé (figure 7). Pour ce diagramme de *Gantt*, les opérations de chaque ordre de fabrication sont également représentées par des segments dont la longueur est proportionnelle à la durée de traitement requise. Ces segments de droite sont assemblés bout à bout dans l'ordre des opérations, chaque opération se distinguant par une couleur différente. Ce type de diagramme de *Gantt* permet donc de visualiser à la fois les contraintes de précédence entre opérations mais surtout l'utilisation des ressources.

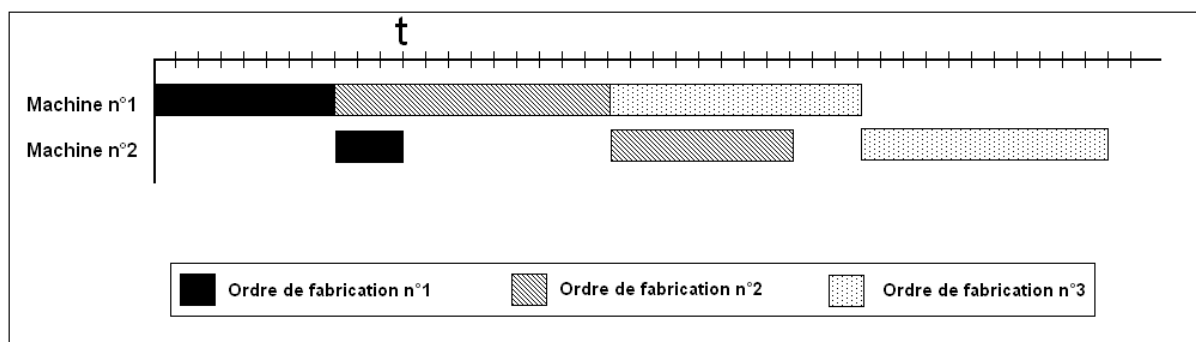


Figure 7 : Exemple de diagramme de *Gantt* basé sur les machines. 3 ordres de fabrication (ou 3 tâches) sont traités par 2 machines.

Par ailleurs, dans l'ordonnancement manufacturier les contraintes sont liées à différents types de relations entre trois variables : commande (ou Ordre de Fabrication : OF), machine et période. Comme c'est le cas pour l'emploi du temps, des objets sont identifiables dans un diagramme de *Gantt* (figure 8).

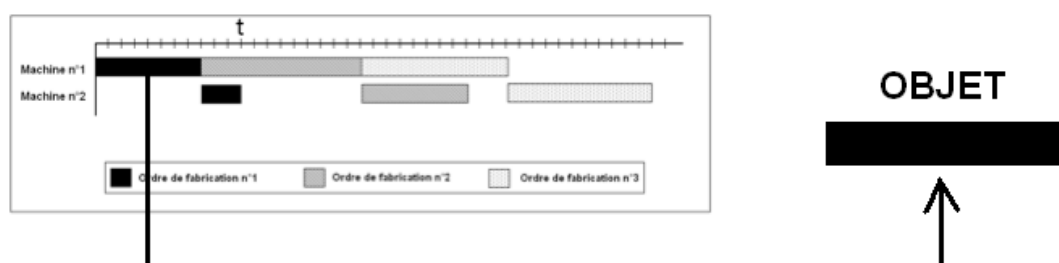


Figure 8 : Exemple d'un objet sur le diagramme de *Gantt* (un segment). L'objet permet de rendre visible la satisfaction de la contrainte liée à la durée de traitement de l'opération sur la machine n°1. En revanche, la contrainte concernant la date de livraison n'est pas exprimée directement dans le diagramme de *Gantt*.

Contrairement aux emplois du temps, tous les objets sont entièrement définis car une valeur pour chacune des trois variables est renseignée. De plus, certaines contraintes sont visibles et d'autres sont cachées. Par exemple dans le diagramme de *Gantt* de la figure 7, l'OF1 est livré à la date t . Mais la date d'échéance pourrait être $t+1$. La contrainte "date d'échéance" n'est pas directement exprimée dans le diagramme de *Gantt*. Par ailleurs, la contrainte de précédence peut être inférée à partir de ce SRT externe : pour tous les OF, l'opération sur la machine 1 est avant l'opération sur la machine 2 (figure 7). Enfin, la durée de la première opération de l'OF1 est une contrainte dont la satisfaction est exprimée dans l'objet par une longueur de segment proportionnelle à la durée (figure 7).

6 UNE PROPOSITION DE DEFINITION DE L'ORDONNANCEMENT

A partir des propositions théoriques concernant la hiérarchie d'abstraction (Rasmussen, 1985, 1986), le contrôle cognitif (Hoc & Amalberti, 2007), les Systèmes de Représentation et de Traitement (Hoc, 1987), et en partant de la définition d'une contrainte proposée par Stefik (1981a), nous proposons de définir l'activité de résolution de problème d'ordonnancement :

L'activité d'ordonnancement articule deux niveaux d'abstraction dans le contrôle cognitif des processus symboliques :

- *Un haut niveau d'abstraction, composé d'activités stratégiques de planification (gestion de plans d'action, de buts et de procédures).*
- *Un bas niveau d'abstraction, composé d'activités tactiques de gestion de contraintes et d'objets. A ce niveau, il s'agit de traduire dans un Système de Représentation et de Traitement externe la satisfaction de contraintes, qui s'expriment souvent dans des SRTs différents.*

Dans l'ordonnancement manufacturier par exemple, les contraintes "durée d'une opération", "date de livraison d'une commande", "succession des opérations", "compétence d'un opérateur liée à l'utilisation d'une machine", etc. vont devoir être considérées dans la représentation de la solution (par ex., un diagramme de *Gantt*). Par exemple dans la conception d'un emploi du temps universitaire, les contraintes "durée d'un enseignement", "correspondance entre le type d'enseignement et le type de salle", "disponibilité d'un enseignant", devront être traduites dans la solution au problème (un emploi du temps).

Enfin, la distinction entre objectif et contrainte qui peut exister dans les définitions de l'ordonnancement n'est pas, selon nous, fondamentale. En effet, nous considérons qu'un objectif peut être exprimé sous forme de contraintes à gérer. Par exemple dans l'ordonnancement manufacturier, l'objectif "minimiser le retard des commandes" consiste à satisfaire le maximum de contraintes liées à la date de livraison des commandes. Crawford et Wiers (2001, p.35) semblent également ne pas faire cette distinction du point de vue de l'ordonnanceur : « *the scheduler had to meet the objectives of maximising material usage and minimising wastage. These constraints bounded the task of schedule generation* ».

Dans la suite de cette thèse, nous chercherons à tester la pertinence de notre définition de l'ordonnancement en termes d'activités stratégiques et tactiques. En particulier, nous examinerons quel est le rôle de l'expertise dans ces activités (chapitre 3).

7 BIBLIOGRAPHIE

- Attardi, G., & Simi, M. (1995). *A formalization of viewpoints. Fundamenta Informaticae*, 23, 149-174.
- Chevalier, A., & Bonnardel, N. (2003). Prise en compte et gestion de contraintes : une étude dans la résolution d'un problème créatif de conception. *Bulletin de Psychologie*, 56, 33-48.
- Chevalier, A., & Cegarra, J. (2008). Une approche psychologique de la notion de contrainte en résolution de problèmes. *Le Travail Humain*, 71, 173-198.

- Clark, N. (1952). *The Gantt chart*. London: Pitman and sons.
- Crawford, S., & Wiers, V.C.S. (2001). From anecdotes to theory: a review of existing knowledge on human factors of planning and scheduling. In B.L. MacCarthy & J.R. Wilson (Eds.), *Human performance in planning and scheduling: fieldwork studies, methodologies and research issues* (pp. 15-43). London: Taylor & Francis.
- Darses, F. (1991). The constraint satisfaction approach to design: A psychological investigation. *Acta Psychologica*, 78, 307-325.
- Darses, F. (1994). *Gestion de contraintes dans la résolution de problèmes de conception*. Thèse, Université de Paris 8, France.
- Esquirol, P., & Lopez, P. (1999). *L'ordonnancement*. Paris : Economica.
- Fox, M.S. (1990). Constraint-guided scheduling - a short history of research at CMU. *Computers in Industry*, 14, 79-88.
- Hoc, J.M. (1977). Role of mental representation in learning a programming language. *International Journal of Man-Machine Studies*, 9, 87-105.
- Hoc, J.M. (1987). *Psychologie cognitive de la planification*. Grenoble: Presses Universitaires de Grenoble.
- Hoc, J.M., & Amalberti, R. (2007). Cognitive control dynamics for reaching a satisficing performance in complex dynamic situations. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1, 22-55.
- Hoc, J.M., Guerin, C., & Mebarki, N. (sous presse). The nature of expertise in scheduling: the case of timetabling. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*.
- Hoc, J.M., Mebarki, N., & Cegarra, J. (2004). L'assistance à l'opérateur humain pour l'ordonnancement dans les ateliers manufacturiers. *Le Travail Humain*, 67, 181-208.
- Lebahar, J.C. (1983). *Le dessin d'architecte*. Roquevaire, France: Editions Parenthèses.
- Lebahar, J.C. (1997). La simulation, instrument de représentation et de régulation dans la conception de produit. In P. Béguin & A. Weill-Fassina (Eds.), *La simulation en ergonomie : connaître, agir et interagir* (pp. 77-96). Toulouse : Octarès Editions.
- MacCarthy, B.L., & Wilson, J.R. (2001). The human contribution to planning, scheduling and control in manufacturing industry. In B.L. MacCarthy, & J.R. Wilson (Eds.), *Human performance in planning and scheduling* (pp. 3-14). London: Taylor & Francis.
- McKay, K.N. (2001). Lessons from the factory floor. In B.L. MacCarthy & J.R. Wilson (Eds.), *Human Performance in planning and scheduling* (pp. 45-64). London: Taylor & Francis.
- McKay, K.N., Safayeni, F.R., & Buzacott, J.A. (1988). Job-shop scheduling theory: what is relevant? *Interfaces*, 18, 84-90.
- Rasmussen, J. (1985). The role of hierarchical knowledge representation in decision-making and system management. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-15, 234-243.
- Rasmussen, J. (1986). *Information processing and human-machine interaction*. Amsterdam: Elsevier.

- Richard, J.F. (1999). Comportements, buts et représentations. *Psychologie Française*, 44, 75-90.
- Richard, J.F. (2004). *Les activités mentales. De l'interprétation de l'information à l'action*. Paris: Armand Colin.
- Richard, J.F., Pointreud, S., & Tijus, C. (1993). Problem-solving restructuring: elimination of implicit constraints. *Cognitive Science*, 17, 497-529.
- Sanderson, P.M. (1989). The human planning and scheduling role in advanced manufacturing systems: an emerging human factors domain. *Human Factors*, 31, 635-666.
- Soloway, E., Adelson, B., & Ehrlich, K. (1988). Knowledge and processes in the comprehension of computer programs. In M. Chi, R. Glaser, & M. Farr (Eds.), *The nature of expertise* (pp. 129-152). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Sutherland, I.E. (1963). *Sketchpad, a man-machine graphical communication system*. Ph.D. Dissertation, MIT, Cambridge, MA.
- Stefik, M. (1981a). Planning with constraints (MOLGEN: Part1). *Artificial Intelligence*, 16, 111-140.
- Stefik, M. (1981b). Planning with constraints. MOLGEN: part 2. *Artificial Intelligence*, 16, 141-170.
- van Wezel, W., & Jorna, R.J. (2006). Introduction. In W. van Wezel, R.J. Jorna, & A.M. Meystel (Eds.), *Planning in intelligent systems* (pp. 1-22). Hoboken, NJ: Wiley.
- Vicente, K. (1999). *Cognitive work analysis: towards safe, productive, and healthy computer-based work*. NJ : Lawrence Erlbaum Associates.
- Wilson, J.R., & Rutherford, A. (1989). Mental models: theory and application in human factors. *Human Factors*, 31, 617-634.

CHAPITRE 3 : CARACTERISTIQUES DE L'EXPERTISE

1	INTRODUCTION	54
2	L'ABSENCE DE DEFINITION CONSENSUELLE DE L'EXPERTISE	54
3	LES CARACTERISATIONS OBJECTIVES DE L'EXPERTISE	54
4	L'EXPERTISE EN ORDONNANCEMENT INDUSTRIEL : UNE EXPERTISE EN GESTION DE PRODUCTION ?	55
5	LES PROPRIETES GENERALES DE L'EXPERTISE EN LIEN AVEC L'ORDONNANCEMENT	56
5.1	DU GUIDAGE A PARTIR DE LA STRUCTURE PROFONDE DU PROBLEME A UN CONTROLE COGNITIF EXTERNE.....	56
5.2	L'ANTICIPATION ET L'ABSTRACTION.....	57
5.3	LA SIMPLIFICATION DES PROBLEMES.....	58
5.4	LA RECONNAISSANCE DE PATTERNS SIGNIFICATIFS	59
5.5	LA VARIABILITE INTERINDIVIDUELLE	59
6	QUESTIONS ET HYPOTHESES DE RECHERCHE.....	59
7	BIBLIOGRAPHIE	60

1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous rappellerons qu'il n'existe pas de consensus lorsqu'il s'agit de définir le concept d'expertise et que deux principales caractérisations objectives sont généralement utilisées dans la littérature. Puis nous proposerons l'idée qu'il existe des proximités entre l'expertise en ordonnancement et l'expertise en gestion de production. Nous développerons alors quelques unes des caractéristiques de l'expertise, pertinentes pour l'interprétation ultérieure de nos résultats. Enfin, nous proposerons des questions et hypothèses de recherche

2 L'ABSENCE DE DEFINITION CONSENSUELLE DE L'EXPERTISE

Pour Caverni (1988), étudier des individus « experts », contribue à comprendre le fonctionnement cognitif général de l'humain. Malgré une littérature abondante sur le sujet, il n'existe pas de définition consensuelle de ce qu'est l'expertise (Cellier, Eyrolle, & Mariné, 1997). Leplat (1991) note d'ailleurs la proximité de ce concept avec d'autres notions voisines, souvent interchangeables, car expliquées les unes par les autres. C'est le cas des notions d'habileté, de capacité ou de compétence. Ce constat a été reconduit plus récemment par Farrington-Darby et Wilson (2006), qui rappelaient dans leur revue de la littérature que les définitions et les descriptions de l'expertise étaient nombreuses et variées, et qu'elles pouvaient décrire des compétences, des connaissances ou des habiletés dans une variété de tâches, d'emplois, de sports, voire même de jeux.

3 LES CARACTERISATIONS OBJECTIVES DE L'EXPERTISE

En l'absence d'un consensus quant à la définition de ce concept, des auteurs ont proposé des caractérisations objectives de l'expertise. Généralement, celles qui sont adoptées dans la littérature s'appuient soit sur une performance supérieure, soit sur une expérience

prolongée du sujet (au sens d'ancienneté). Cette distinction a permis de développer des méthodes différentes selon que l'on choisisse le point de vue de l'ancienneté (par ex., Ericsson, Charness, Hoffman, & Feltovich, 2006) ou celui de la performance de l'expert (par ex., Charness & Tuffiash, 2008).

Toutefois, il peut être difficile de choisir l'une ou l'autre des caractérisations. Par exemple, une large littérature affirme que la performance observée chez les experts est "supérieure à la moyenne" (Charness & Tuffiash, 2008 ; Ericsson & Charness, 1994), alors que d'autres travaux montrent que la performance n'est pas toujours une marque d'expertise. Ces résultats contradictoires s'expliquent notamment par la diversité des disciplines qui l'étudient, chacune ayant ses objectifs et ses choix méthodologiques (Farrington-Darby & Wilson, 2006). Par ailleurs, en observant une importante variabilité des stratégies chez des ordonnanceurs experts, Cegarra (2004) a conclu qu'une caractérisation de l'expertise en termes d'années d'expérience pouvait être inadaptée.

Quelle que soit la caractérisation adoptée, l'expertise est souvent décrite comme une expérience prolongée spécifique à un domaine (Charness & Tuffiash, 2008 ; Chi, Glaser, & Farr, 1988 ; Ericsson & Smith, 1991 ; Ericsson & Charness, 1994 ; Farrington-Darby & Wilson, 2006 ; Garrett, Caldwell, Harris, & Gonzalez, 2009 ; Glaser & Chi, 1988 ; Hoc & Amalberti, 2007 ; Hoffman, 1992 ; Larkin & Reif, 1979). En rappelant que c'est par exemple le cas pour les grands maîtres aux échecs (Chase & Simon, 1973), McKay, Buzacott, Charness et Safayeni, (1992) ont fait le constat que l'expertise en ordonnancement est longue à se développer (entre 10.000 et 20.000 heures de pratiques).

Lorsque l'on choisit le point de vue de l'expérience, plusieurs critères peuvent être utilisés : nombre d'années de pratique d'une activité, position sociale, spécialisation, sélection par des pairs (Farrington-Darby & Wilson, 2006). Pour les deux études de cette thèse qui se sont intéressées à l'expertise en ordonnancement (chapitres 6 et 7), nous avons adopté le critère du nombre d'années d'expérience.

4 L'EXPERTISE EN ORDONNANCEMENT INDUSTRIEL : UNE EXPERTISE EN GESTION DE PRODUCTION ?

Pour Blondel (2007), la gestion de production est une fonction qui cherche une organisation efficace de la production en respectant des conditions de qualité, de délai, de coûts qui résultent des objectifs de l'entreprise. Pour cela, plusieurs aspects doivent être considérés : gestion des stocks, capacité de production disponible à un instant donné, dates de livraison, apparition d'aléas, etc. Au sein d'une entreprise les services de planification et d'ordonnancement sont généralement distincts puisqu'ils s'intéressent à des horizons temporels différents : le long et le moyen terme (quelques semaines à plusieurs années) pour le service planification, alors que le service ordonnancement traite des aspects à court et très court terme (un jour à dix semaines). De plus, ces services ont des objectifs différents puisque la planification cherche à définir et à anticiper ce qui est à réaliser, alors que l'ordonnancement se situe à un niveau plus opérationnel en cherchant la réalisation la plus efficace possible des ordres de fabrication dans l'atelier (par affectation temporelle de ressources).

Dans le contexte industriel, plusieurs auteurs décrivent la réalité du travail d'ordonnanceur comme défini par un ensemble de rôles, de fonctions et de responsabilités (par ex., Crawford, MacCarthy, Wilson, & Vernon, 1999). Ainsi, 80 à 90% du temps de l'ordonnanceur consiste à déterminer l'information pertinente pouvant affecter l'ordonnement en cours et le reste à ordonner (Fox, 1990). Le recueil d'information auprès d'une multitude de sources est donc essentiel et concerne plusieurs thèmes : les stocks, les machines, les clients, etc. De notre point de vue, l'expertise en ordonnancement industriel fait appel à des compétences liées à la gestion de production. Précisons d'ailleurs que les formations qui existent (par ex., en France dans les IUT Qualité Logistique Industrielle et Organisation) concernent la gestion de production en général et non l'ordonnement en particulier.

5 LES PROPRIETES GENERALES DE L'EXPERTISE EN LIEN AVEC L'ORDONNANCEMENT

On ne dispose que de peu de connaissances sur la nature de l'expertise en ordonnancement si ce n'est qu'elle est caractérisée par des heuristiques construites par l'expérience et par l'observation (McKay, 2001 ; Sanderson, 1989). A partir de plusieurs revues de la littérature sur l'expertise décrivant des caractéristiques générales et des stratégies (Cellier et al., 1997 ; Farrington-Darby & Wilson, 2006 ; Glaser & Chi, 1988 ; Shanteau, 1992), nous en citerons certaines qui sont pertinentes pour l'interprétation ultérieures de nos résultats.

5.1 DU GUIDAGE A PARTIR DE LA STRUCTURE PROFONDE DU PROBLEME A UN CONTROLE COGNITIF EXTERNE

Pour Glaser et Chi (1988), le contenu et la structure des connaissances des experts sont différents par rapport aux novices. Cette différence a un effet sur le guidage de l'activité de résolution d'un problème.

Plus précisément, pour Larkin et Reif (1979) autant que pour Glaser et Chi (1988), les experts d'un domaine se représentent le problème à un niveau plus profond et se guident à partir de cette structure profonde. A l'inverse, les novices s'appuient sur une représentation plus superficielle du problème, et se guident à partir de caractéristiques de surface. Ces résultats ont par exemple été observés pour les problèmes de physique (Chi, Feltovich, & Glaser, 1981) ou dans le domaine médical (Patel & Groen, 1986).

Cette différence de guidage pour résoudre un problème peut être mise en relation avec le modèle du contrôle cognitif de Hoc et Amalberti (2007 – chapitre 1), développé plus spécifiquement dans le contexte de gestion des situations dynamiques. Bien que les experts soient capables de contrôler leur activité sur la base de représentations (ou modèles) internes de leur environnement (contrôle cognitif interne ou anticipatif), ils sont également capables d'étendre leur cognition et de guider leurs processus cognitifs en définissant dans l'environnement des signaux externes de guidage (Hoc & Amalberti, 2007). Pour ces auteurs, le mode de contrôle cognitif externe (ou réactif) permet de caractériser l'expertise. Cette modalité du contrôle cognitif serait adoptée principalement pour gérer la charge mentale dans des limites acceptables.

Cette modalité du contrôle cognitif proposée par Hoc et Amalberti (2007) a été développée à partir d'une extension de la définition du concept d'affordance, développé par Gibson (1979) dans ses travaux sur la psychologie de la perception. Dans ce contexte, l'auteur a décrit le contrôle de l'activité humaine à partir de la perception de signaux suggérant des

actions (affordances). Après une longue période d'entraînement, il se construit chez l'individu des affordances expertes. Le contrôle cognitif externe s'appuie donc sur des informations de l'environnement qui invitent à l'action.

Par ailleurs, cette proposition est cohérente avec des travaux qui ont montré que la cognition ne dépendait pas seulement de représentations internes (ex. : propositions, schémas, images mentales) mais aussi de représentations externes présentes dans l'environnement (symboles physiques, règles externes) permettant à la fois de réduire la charge mentale et de structurer l'activité cognitive. Par exemple, pour Zhang et Norman (1994), la résolution de problème s'appuie sur des représentations internes et externes. Les représentations externes ont des propriétés, dont certaines sont compatibles avec notre définition d'un objet : des aides à la mémorisation fournissant de l'information qui peut être directement perçue et utilisée sans être interprétée. De plus, Scaife et Rogers (1996) ou Zhang (1997) ont précisé que les représentations graphiques externes permettent à l'opérateur de déporter sa cognition en rendant directement visibles les buts et contraintes à satisfaire, et en évitant de construire des inférences.

5.2 L'ANTICIPATION ET L'ABSTRACTION

Parmi les propriétés générales rappelées dans la revue de littérature réalisée par Cellier et al. (1997), l'expertise est caractérisée par des aptitudes particulières pour la planification. En étudiant la planification dans le contexte de la programmation informatique, Hoc (1987) a mis en évidence plusieurs caractéristiques de cette activité dont l'articulation entre l'utilisation et l'élaboration de plans, et la mise en œuvre de deux composantes principales : l'anticipation et l'abstraction (ou schématisation).

Tout d'abord, les experts produisent plus d'anticipations que les novices. Dans le contexte de l'ordonnancement manufacturier, McKay et al. (1992) ont observé ces capacités d'anticipation. Les situations d'ordonnancement sont caractérisées par de nombreuses incertitudes et aléas dont le risque de panne des machines de l'atelier (Hoc, Mebarki, & Cegarra, 2004). L'ordonnanceur est toutefois capable de prévoir l'apparition de certains aléas et d'adopter une démarche proactive pour minimiser les conséquences de leur apparition, par exemple les effets sur la production (McKay, Buzacott, & Safayeni, 1989). Ce comportement d'anticipation d'événements incertains est une condition à la gestion des risques. Pour Hoc (1996), le risque est défini par la probabilité d'apparition d'un événement dont les conséquences sont redoutées, et cet événement n'est pas considéré dans le plan. Dans les situations à risques, le manque de prédictibilité devient un facteur de complexité qui conduit à une surcharge de travail (Woods, 1988, cité par Amalberti, 1996). Des stratégies peuvent alors être mises en place. Par exemple, la perception du risque peut conduire à augmenter les marges de sécurité dans la planification des activités (Brown, 1990, cité par Amalberti, 1996). Dans l'ordonnancement, une des marques d'anticipation observée chez les experts consiste à introduire des marges pour anticiper les perturbations et les aléas et faciliter ainsi le réordonnancement (McKay, Safayeni, & Buzacott, 1995). L'ordonnanceur chercherait à obtenir un ordonnancement plus flexible (avec des degrés de liberté) et donc plus robuste aux aléas. La flexibilité serait alors considérée comme un outil pour la robustesse de l'ordonnancement, ce qui faciliterait son adaptation à l'apparition de perturbations dans l'atelier (réordonnancement).

Ensuite, les experts construisent une représentation plus globale et fonctionnelle des problèmes. Ils disposent ainsi de capacités d'abstraction et donc d'un contrôle cognitif de l'activité plus élevé. Par exemple, la planification des experts est souvent caractérisée par une stratégie descendante (Hoc, 1987), à partir d'un répertoire de plans stockés en mémoire. Un plan abstrait, formulé en termes de but, est raffiné progressivement. Dans le contexte de l'ordonnement manufacturier, les buts poursuivis par les experts seront par exemple de maximiser l'utilisation des ressources (par ex., les machines de l'atelier) ou de minimiser le retard moyen des dates de livraison des commandes de clients (McKay, Safayeni, & Buzacott, 1988). D'autres objectifs sont également répertoriés dans la littérature sur l'ordonnement manufacturier : minimiser la durée totale de mise en œuvre de l'ordonnement, minimiser les encours (la durée de séjour des produits dans l'atelier), etc.

5.3 LA SIMPLIFICATION DES PROBLEMES

Pour Shanteau (1992), l'expert aurait des habiletés pour simplifier les problèmes complexes et adapterait ses stratégies pour changer les conditions de la tâche. Un des moyens de changer les exigences d'une tâche pour un opérateur peut consister en une violation de certaines règles (Girin & Grosjean, 1996). Dans la conception architecturale par exemple (Lebahar, 1983), le fait que certaines informations arrivent au cours du processus de résolution peut rendre difficile la gestion de certains sous-problèmes ce qui peut conduire à la violation de certaines contraintes.

Les travaux sur l'ordonnement montrent que les ordonnanceurs réduisent la complexité des problèmes en les simplifiant (Dessouky, Moray, & Kijowski, 1995). L'expert peut alors agir sur les spécifications du problème par des relâchements ou des violations de contraintes. Par exemple, McKay et al. (1992) ont noté que les experts peuvent modifier la définition du problème en changeant les contraintes, les objectifs ou les règles de décision. Pour cela, ils s'appuient sur leurs connaissances. McKay et al. (1995) ont précisé que la recherche de solutions alternatives à partir de modifications des spécifications du problème apparaît notamment pour faire face à une pression qui augmente, alors qu'il faut atteindre les critères de performance prescrits par l'entreprise.

Dans le domaine de l'ordonnement industriel, Higgins (1996) a observé que la modification de la structure des problèmes par les ordonnanceurs peut se manifester par une utilisation non standard de certaines machines, par un changement des paramètres de production (par ex., changer la taille des lots¹⁹), ou par une nouvelle négociation des dates de livraison avec le client pour mieux répartir la charge de travail. Ce dernier exemple montre l'importance de la négociation comme outil permettant de réduire la complexité au cours de la résolution du problème d'ordonnement.

¹⁹ En gestion de production, la notion de lot fait référence à deux aspects. D'une part, c'est un paramètre de gestion qui définit la quantité de réapprovisionnement d'un même article (ex. : une quantité économique, une quantité minimale, etc.). D'autre part, un lot est défini comme la quantité d'un même article qui est lancée en production. "Changer la taille des lots" fait référence à la possibilité de lancer une taille de lot différente du paramètre de gestion qui a été défini *a priori*.

5.4 LA RECONNAISSANCE DE PATTERNS SIGNIFICATIFS

Plusieurs travaux montrent qu'une des caractéristiques de l'expertise est qu'il perçoit des patterns significatifs dans son domaine (Glaser & Chi, 1988 ; Simon & Barenfeld, 1969). Par exemple, de Groot (1966) a montré que les joueurs d'échecs experts avaient une habileté à percevoir des *patterns* et à les encoder en *chunks*. Ces *chunks* ont été décrits par Chase et Simon (1973) comme des configurations significatives de positions des pièces sur l'échiquier.

Des auteurs dans le domaine de l'ordonnement de la production décrivent également cette capacité (Dessouky et al., 1995 ; Moray, Dessouky, Kijowski, & Adapathya, 1991). Pour McKay et al. (1995), la reconnaissance de patterns de situations permet d'apporter des solutions appropriées au problème d'ordonnement.

5.5 LA VARIABILITE INTERINDIVIDUELLE

Dans le domaine de l'ordonnement des horaires de trains à la SNCF, Cegarra (2004) a observé qu'il existait une variabilité importante dans les stratégies employées par les experts. Dans cette situation complexe liée notamment aux contraintes à respecter (par ex., les distances de sécurité, les règles pour doubler un train, etc.), les participants ont montré une organisation des connaissances différente qui a eu un effet sur les stratégies (ascendantes/descendantes et prospectives/rétrospectives) employées.

En étudiant les modèles mentaux d'ordonneurs experts, Kiewiet, Jorna et van Wezel (2005) ont également fait le constat d'une importante variabilité des connaissances et représentations des experts. En analysant le comportement de trente-quatre planificateurs et ordonneurs dans trois domaines différents (ordonnement d'équipe, planification de la production, transport), Jorna (2006) a mis en évidence une variabilité interindividuelle entre experts. Dans une étude de terrain (usine de fabrication de camions) dont l'objectif était de modéliser des décisions d'ordonnement, Wiers (1996) a également observé cette variabilité entre experts.

6 QUESTIONS ET HYPOTHESES DE RECHERCHE

A partir des éléments théoriques développés dans ce chapitre consacré à l'expertise, mais aussi à partir des informations développées dans les chapitres précédents, nous proposons de formuler plusieurs questions et hypothèses de recherche :

- L'expertise en ordonnancement serait caractérisée par une activité plus stratégique : plans d'action, formulation de but et la sélection de procédures standards.
- Les experts n'auraient pas besoin de rendre explicite la structure profonde des contraintes (relations entre variables) satisfaites par un objet. Ils pourraient alors manipuler les objets directement sur le SRT externe, sans traiter des contraintes sous-jacentes. La structure profonde des problèmes d'ordonnement serait une forme de connaissance encapsulée qui pourrait être "déployée" si nécessaire (comme c'est par exemple le cas dans le domaine médical – par ex., Boshuizen & Schmidt, 1992).
- Dans les termes du contrôle cognitif, l'expertise serait caractérisée par un contrôle cognitif plus externe qui se manifesterait par un usage plus important des objets du SRT externe.

- Par ailleurs, peut-on observer des différences de stratégies en fonction des situations ? Par exemple, la gestion de contraintes et d'objets est-elle la même dans la conception d'emploi du temps et dans l'ordonnancement manufacturier ?

7 BIBLIOGRAPHIE

- Amalberti, R. (1996). *La conduite de systèmes à risques*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Blondel, F. (2007). *Gestion de la production* (5ème édition). Paris : Dunod.
- Boshuizen, H.P.A., & Schmidt, H.G. (1992). On the role of biomedical knowledge in clinical reasoning by experts, intermediates and novices. *Cognitive Science*, 16, 153-184.
- Brown, J. (1990). Drivers' margins of safety considered as a focus for research on errors. *Ergonomics*, 33, 1307-1314.
- Caverni, J.P. (1988). Psychologie de l'expertise : éléments d'introduction. *Psychologie Française*, 33, 114-125.
- Cegarra, J. (2004). *La gestion de la complexité dans la planification : le cas de l'ordonnancement*. Thèse, Université Paris 8, France.
- Cellier, J.M., Eyrolle, H., & Mariné, C. (1997). Expertise in dynamic environnements. *Ergonomics*, 40, 28-50.
- Charness, N., & Tuffiash, M. (2008). The role of expertise research and human factors in capturing, explaining, and producing superior performance. *Human Factors*, 50, 427-432.
- Chase, W.G., & Simon, H.A. (1973). Perception in chess. *Cognitive Psychology*, 4, 55-81.
- Chi, M.T.H., Feltovich, P., & Glaser, R. (1981). Categorization and representations of physics problems by experts and novices. *Cognitive Science*, 5, 121-152.
- Chi, M., Glaser, R., & Farr, M. (1988). *The Nature of Expertise*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Crawford, S., MacCarthy, B.L., Wilson, J.R., & Vernon, C. (1999). Investigating the work of industrial schedulers through field study. *Cognition, Technology & Work*, 1, 63-77.
- de Groot, A.D. (1966). Perception and memory versus thought: some old ideas and recent findings. In: Kleinmuntz, M. (Ed.), *Problem Solving: Research, Method and Theory* (pp.19-50). New York: Wiley.
- Dessouky, M.I., Moray, N., & Kijowski, B. (1995). Taxonomy of scheduling systems as a basis for the study of strategic behavior. *Human factors*, 37, 443-472.
- Ericsson, K.A., & Charness, N. (1994). Expert performance: its structure and acquisition. *American Psychologist*, 49, 725-747.
- Ericsson, K.A., & Smith, J. (Eds.). (1991). *Toward a general theory of expertise*. New York: Cambridge University Press.
- Ericsson, K.A., Charness, N., Hoffman, R., & Feltovich, P. (Eds.). (2006). *Cambridge handbook of expertise and expert performance*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

- Farrington-Darby, T., & Wilson, J.R. (2006). The nature of expertise: a review. *Applied Ergonomics*, 37, 17-32.
- Fox, M.S. (1990). Constraint-guided scheduling - a short history of research at CMU. *Computers in Industry*, 14, 79-88.
- Garrett, S.K., Caldwell, B.S., Harris, E.C., & Gonzalez, M.C. (2009). Six dimensions of expertise: a more comprehensive definition of cognitive expertise for team coordination. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 10, 93-105.
- Gibson, J.J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Mifflin.
- Girin, J., & Grosjean, M. (Eds.) (1996). *La transgression des règles au travail*. Paris : L'Harmattan.
- Glaser, R., & Chi, M.T.H. (1988). Overview. In M.T.H. Chi, R. Glaser, & M.J. Farr (Eds.), *The Nature of Expertise* (pp.15-36). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Higgins, P.G. (1996). Interaction in hybrid intelligent scheduling. *International Journal of Human Factors in Manufacturing*, 6, 185-203.
- Hoc, J.M. (1987). *Psychologie cognitive de la planification*. Grenoble: Presses Universitaires de Grenoble.
- Hoc, J.M. (1996). *Supervision et contrôle de processus: la cognition en situation dynamique*. Grenoble, F: Presses Universitaires de Grenoble.
- Hoc, J.M., & Amalberti, R. (2007). Cognitive control dynamics for reaching a satisficing performance in complex dynamic situations. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1, 22-55.
- Hoc, J.M., Mebarki, N., & Cegarra, J. (2004). L'assistance à l'opérateur humain pour l'ordonnancement dans les ateliers manufacturiers. *Le Travail Humain*, 67, 181-208.
- Hoffman, R.R. (Ed.). (1992). *The psychology of expertise*. New York: Springer Verlag.
- Jorna, R.J. (2006). Cognition, Planning, and domains: an empirical study into the planning processes of planners. In W. van Wezel, R.J. Jorna, & A.M. Meystel (Eds.), *Planning in intelligent systems* (pp. 101-135). Hoboken, NJ: Wiley.
- Kiewiet, D.J., Jorna, R.J., & van Wezel, W. (2005). Planners and their cognitive maps: An analysis of domain representations using multi dimensional scaling. *Applied Ergonomics*, 36, 695-708.
- Larkin, J., & Reif, F. (1979). Understanding and teaching problem solving in physics. *European Journal of Science Education*, 1, 191-203.
- Lebahar, J.C. (1983). *Le dessin d'architecte*. Roquevaire, France: Editions Parenthèses.
- Leplat, J. (1991). Compétence et Ergonomie. In R. Amalberti, M. De Montmollin, & J. Theureau (Eds.), *Modèles en Analyse du Travail* (pp.263-278). Bruxelles : Mardaga.
- McKay, K.N. (2001). Lessons from the factory floor. In B.L MacCarthy & J.R. Wilson (Eds.), *Human Performance in planning and scheduling* (pp. 45-64). London: Taylor & Francis.
- McKay, K.N., Buzacott, J.A., & Safayeni, F.R. (1989). The scheduler's knowledge of uncertainty: the missing link. In J. Browne (Ed.), *Knowledge Based Production Management System* (pp.171-189). Amsterdam: North-Holland.

- McKay, K.N., Safayeni, F.R., & Buzacott, J.A. (1988). Job-shop scheduling theory: what is relevant? *Interfaces*, 18, 84-90.
- McKay, K.N., Safayeni, F.R., & Buzacott, J.A. (1995). 'Common Sense' realities of planning and scheduling in printed circuit board production. *International Journal of Production Research*, 33, 1587-1603.
- McKay, K.N., Buzacott, J.A., Charness, N., & Safayeni, F.R. (1992). The scheduler's predictive expertise: an interdisciplinary perspective. In G.I. Doukidis & R.J. Paul (Eds.), *Artificial Intelligence in Operational Research* (pp. 139-150). London: MacMillan Press.
- Moray, N., Dessouky, M.I., Kijowski, B.A., & Adapathya, R. (1991). Strategic behavior, workload, and performance in task scheduling. *Human Factors*, 33, 607-629.
- Patel, V.L., & Groen, G.J. (1986). Knowledge based solution strategies in medical reasoning. *Cognitive Science*, 10, 91-116.
- Sanderson, P.M. (1989). The human planning and scheduling role in advanced manufacturing systems: an emerging human factors domain. *Human Factors*, 31, 635-666.
- Scaife, M., & Rogers, Y. (1996). External cognition: how do graphical representations work? *International Journal of Human-Computer Studies*, 45, 185-213.
- Shanteau, J. (1992). The psychology of experts: an alternative view. In G. Wright & F. Bolger (Eds.), *Expertise and Decision Support* (pp.11-23). New York: Plenum Press.
- Simon, H.A., & Barenfeld, M. (1969). Information-processing analysis of perceptual processes in problem-solving. *Psychological Review*, 76, 473-483.
- Wiers, V.C.S. (1996). A quantitative field study of the decision behaviour of four shop floor schedulers. *Production Planning and Control*, 7, 383-392.
- Woods, D.D. (1988). Coping with complexity: the psychology of human behavior in complex systems. In L.P. Goodstein, H.B. Andersen, & S.E. Olsen (Eds.), *Tasks, Errors and Mental Models* (pp. 128-148). London: Taylor and Francis.
- Zhang, Z. (1997). The nature of external representations in problem solving. *Cognitive Science*, 21, 179-217.
- Zhang, J., & Norman, D.A. (1994). Representations in distributed cognitive tasks. *Cognitive Science*, 18, 87-122.

CHAPITRE 4 : COOPERATION HOMME-MACHINE POUR L'ORDONNANCEMENT

1	INTRODUCTION	64
2	LA REPARTITION DE FONCTIONS ENTRE L'HOMME ET LA MACHINE	65
3	COOPERATION HOMME-MACHINE ET CONTROLE MUTUEL	67
4	QUESTIONS ET HYPOTHESES DE RECHERCHE.....	68
5	BIBLIOGRAPHIE	69

1 INTRODUCTION

D'abord étudiée à partir des années 50 du point de vue de la recherche opérationnelle et des sciences de la gestion, puis dans les années 60 par les communautés de l'intelligence artificielle et des facteurs humains, les travaux sur l'ordonnancement de la production ont considérablement évolué dans les années 80, suite au développement des technologies de l'information (Crawford & Wiers, 2001). Des tentatives ont alors été menées pour réduire, voire supprimer l'opérateur du processus de planification et d'ordonnancement, celui-ci étant qualifié de "maillon faible" (Crawford, MacCarthy, Wilson, & Vernon, 1999). Dans cette perspective technique de remplacer l'opérateur, des systèmes experts ont par exemple été développés à partir de la description d'heuristiques humaines (par ex., Ammons, Govindaraj, & Mitchell, 1986). Ces systèmes experts ont ensuite été considérés comme inappropriés car les changements techniques ou organisationnels des environnements manufacturiers rendaient obsolète "l'expertise qui était construite" (Fox, 1990).

Aujourd'hui, la perspective du tout automatique dans la résolution des problèmes de planification et d'ordonnancement a montré ses limites, et le monde académique et industriel a accepté l'idée que l'intervention humaine est fondamentale pour l'efficacité des systèmes (MacCarthy & Wilson, 2001 ; McKay, Safayeni, & Buzacott, 1995 ; Nakamura & Salvendy, 1994 ; Sanderson, 1989). En effet, seuls les ordonnanceurs sont capables de prendre des décisions dans des environnements dynamiques changeants, pour lesquels il faut réagir en temps réel car ces changements impliquent des réordonnements fréquents (Crawford et al., 1999). Pour cela, ils s'appuient à la fois sur des connaissances, sur des informations de la situation actuelle, et sur la "perception anticipée" qu'ils peuvent avoir de l'évolution de la situation (MacCarthy & Wilson, 2001 ; McKay, Buzacott, Charness, & Safayeni, 1992).

L'opérateur seul ou la machine seule ne suffisent donc pas, et une coopération entre ces deux entités est nécessaire. En effet, des travaux montrent que les performances d'ordonnancement sont meilleures lorsque l'ordonnanceur est placé dans une situation de "partenariat" avec un ordinateur, alors même que la "machine" seule produit une moindre performance (Sanderson, 1989). Se pose alors la question de la coopération avec la machine (Hoc, 2001b ; 2003) pour résoudre des problèmes d'ordonnancement. La question de la coopération entre l'ordonnanceur et les systèmes d'assistance a été posée par MacCarthy et Wilson (2001, p.8-9) : *"How should we organise and support planning and scheduling*

functions? (...) Do co-operative human-computer decision support systems always provide the best approach to scheduling?" Toutefois, lorsque cette approche est adoptée, elle soulève plusieurs questions dont certaines sont liées à la représentation des informations sur l'interface et d'autres à la définition des rôles et connaissances respectifs de l'opérateur et de la machine (Esquirol & Lopez, 1999).

Le problème de la représentation des informations a notamment été examiné dans le cadre de l'étude des interfaces écologiques (Vicente & Rasmussen, 1990). L'idée développée par ces auteurs est que la représentation des informations à traiter doit être compatible avec les représentations mentales manipulées par l'ordonnanceur. En partant du constat que la gestion de contraintes est centrale dans l'activité d'ordonnancement, Hoc, Guerin et Mebarki (sous presse – chapitre 6) et Guerin, Hoc et Mebarki (2011 – chapitre 7) ont observé que, dans l'ordonnancement, deux formes de représentation sont manipulées par l'ordonnanceur : la contrainte, représentation mentale mettant en relation des variables, et l'objet, représentation externe de la satisfaction d'une contrainte, visible sur l'interface dans les termes de la solution au problème d'ordonnancement (par ex., un diagramme de *Gantt*, un emploi du temps).

Du point de vue des rôles respectifs de l'opérateur et de la machine, il reste à déterminer quelles tâches doivent être affectées à la machine et quelles tâches doivent être laissées au contrôle humain (McKay, Pinedo, & Webster, 2002). En utilisant la méthode d'analyse cognitive de la tâche, van Wezel, Jorna et Mietus (1996) ont pu décrire un ensemble de tâches élémentaires définissant la tâche d'ordonnancement. L'automatisation de certaines sous-tâches a ainsi permis aux auteurs de développer un système d'aide à la décision. Une autre approche de la répartition des rôles consiste à laisser à l'opérateur la décision finale d'ordonnancement et à la machine le calcul des conséquences d'une décision (Hoc, Mebarki, & Cegarra, 2004).

L'objectif de ce chapitre est de rappeler quelques éléments théoriques sur la répartition de fonctions entre l'homme et la machine, mais aussi d'emprunter à la littérature une définition d'un mode de coopération homme-machine (CHM), le contrôle mutuel. Cette modalité de la CHM, qui sera abordée dans cette thèse, est supposée rendre les opérateurs plus actifs dans la résolution d'un problème d'ordonnancement.

2 LA REPARTITION DE FONCTIONS ENTRE L'HOMME ET LA MACHINE

La conception de systèmes homme-machine coopératifs pour résoudre les problèmes d'ordonnancement doit considérer la problématique de la répartition des fonctions entre l'opérateur et la machine. Cette répartition peut être décomposée en fonctions élémentaires dont chacune est confiée à l'entité la plus efficiente (Fitts, 1951). Cet auteur a proposé de considérer les compétences de l'un et de l'autre en introduisant le double acronyme "MABA-MABA" (*Men Are Better At... Machines Are Better At...*).

Dans une perspective de concevoir des systèmes hybrides, Nakamura et Salvendy (1994) notaient qu'à partir du développement des modèles issus de la recherche opérationnelle et de l'intelligence artificielle, la machine était capable de proposer très rapidement un ensemble d'ordonnements alternatifs à l'opérateur. Toutefois une des forces de ce dernier est d'être capable de réaliser des inférences (à partir de son expérience et de ses

connaissances du contexte de l'atelier), ce qui permettrait de choisir la solution la plus adaptée parmi ces alternatives.

Sheridan (1992) a suggéré dix modes de décomposition des fonctions à répartir entre l'opérateur et la machine. Les choix de conception peuvent alors varier entre un mode entièrement manuel est une automatisation complète de la tâche :

- (1) La machine n'offre pas d'assistance, l'opérateur doit réaliser seul la tâche
- (2) La machine propose l'ensemble des alternatives possibles
- (3) La machine réduit l'ensemble des alternatives à quelques possibilités
- (4) La machine réduit l'ensemble des alternatives à une seule
- (5) La machine exécute la suggestion si l'opérateur l'approuve
- (6) La machine exécute la suggestion si l'opérateur n'exerce pas un droit de véto en un temps limité
- (7) La machine exécute la suggestion et elle informe systématiquement l'opérateur
- (8) La machine exécute la suggestion et elle informe l'opérateur s'il le demande
- (9) La machine exécute la suggestion et elle informe l'opérateur s'il elle le décide
- (10) La machine décide de tout et agit de manière autonome, en ignorant l'opérateur

Dans leurs travaux, Nakamura et Salvendy (1994) ont distingué trois modes d'interaction homme-machine dans l'ordonnancement :

- Les systèmes à base d'algorithmes ou à base de connaissances. La machine prend les décisions d'ordonnancement et l'ordonnanceur se conforme à la décision de la machine. Dans les termes de Sheridan (1992), il s'agit du mode 10.
- Les systèmes manuels. L'ordonnanceur prend les décisions d'ordonnancement et les met en œuvre. La machine obéit aux décisions humaines (mode 1).
- Les systèmes hybrides intelligents. Ce mode peut être réalisé selon trois approches. Premièrement, la machine réalise l'ordonnancement et propose plusieurs solutions acceptables (mode 3). L'ordonnanceur sélectionne l'une d'entre elles puis l'exécute. Deuxièmement, la machine suggère un ordonnancement puis l'exécute si l'ordonnanceur le valide (mode 5). Troisièmement, la machine décide d'un ordonnancement, l'exécute, et l'informe ensuite (mode 7).

Comme le précisent van Wezel, Cegarra et Hoc (2011), la question de la répartition de fonctions ne se résume pas uniquement à une décomposition puis une affectation de fonctions plus élémentaires. En effet, ces fonctions entretiennent souvent des relations entre elles, ce qui implique qu'elles ne doivent pas être considérées comme indépendantes entre elles. Il en résulte des implications en termes de coopération homme-machine (Hoc & Chauvin, 2011), dont le cadre théorique a été développé à partir de l'étude de situations dynamique (par ex., dans le contrôle aérien). Dans ces situations sous contrôle partiel de l'opérateur, celui-ci doit prendre des décisions en cherchant à atteindre un compromis entre performance satisfaisante et coût cognitif acceptable (Hoc & Amalberti, 2007).

Dans la littérature sur l'ordonnancement, d'autres travaux ont mis le focus sur la décomposition de la tâche de l'ordonnanceur en sous-tâches (Higgins, 2001 ; McKay & Wiers, 2003 ; Mietus, 1994 ; van Wezel et al., 1996 ; Wiers, 1997b). De l'ensemble de ces travaux, les auteurs ont pu lister les sous-tâches possibles auxquelles les ordonnanceurs sont confrontés. Une liste, non exhaustive de ces tâches est par exemple : affecter, sélectionner, classer, compter les tâches, superviser l'activité, anticiper des résultats, administrer la production, évaluer des actions, interpréter des données, communiquer des ordonnancements, réagir à des événements, etc. (Akkerman & van Donk, 2009). A partir de l'ensemble des tâches de l'ordonnanceurs, van Wezel et al. (1996) ont cherché à distinguer celles généralisables à toutes les situations, d'autres spécifiques à un domaine. Ils ont ainsi proposé un cadre théorique pour faciliter le développement de systèmes d'aide à la décision, avec l'idée que certaines sous-tâches pouvaient être automatisées.

Dans cette thèse, nous avons réalisé un travail pluridisciplinaire dans lequel la recherche opérationnelle propose un système homme-machine pour résoudre les problèmes d'ordonnancement (chapitre 8). Ce système s'appuie sur une méthode développée par la recherche opérationnelle : l'ordonnancement de groupes. La répartition des fonctions proposée est que la machine réalise des regroupements d'opérations (ordonnancement de groupes) et que l'humain ordonnance ensuite à l'intérieur de chaque groupe (ordonnancement intra-groupes). Du point de vue de la recherche opérationnelle, l'ordonnancement de groupes est une des rares méthodes dites "prédictive/réactive" car elle cherche à combiner les forces (au sens de Fitts, 1951) de la machine et de l'opérateur :

- La force de la machine est notamment liée à sa rapidité de calcul. Cela permettrait de réduire rapidement la complexité du problème pour l'ordonnanceur en lui proposant des regroupements d'opérations calculés *a priori* (dimension prédictive), en fonction d'un algorithme mathématique.
- L'ordonnanceur est supposé disposer de compétences pour la négociation avec différents niveaux de l'organisation, mais surtout de connaissances sur l'état réel de l'atelier à un instant donné. Ces connaissances devraient alors lui permettre de faire les choix les plus judicieux pour l'ordonnancement des opérations au sein d'un groupe, par exemple en tenant compte des aléas présents dans l'atelier (dimension réactive).

Dans ce contexte de répartition des fonctions, la demande issue de la recherche opérationnelle a été que nous examinions le rôle d'un outil d'assistance sur les prises de décision liées à l'activité d'ordonnancement intra-groupes réalisée par l'opérateur. Lorsque ces prises de décision s'inscrivent dans le cadre d'une coopération avec la machine, et plus particulièrement d'un contrôle mutuel, il devient intéressant d'en observer également les implications sur l'activité d'ordonnancement.

3 COOPERATION HOMME-MACHINE ET CONTROLE MUTUEL

Nous ne développerons pas ici l'architecture cognitive proposée par Hoc (2001b ; 2003) dans son modèle de la coopération homme-machine. Nous rappellerons toutefois la définition qu'il propose de la coopération :

« Deux agents sont en situation de coopération aux deux conditions minimales suivantes :

- ils poursuivent chacun des buts qui peuvent entrer en interférence, au niveau des buts, des ressources, des procédures, etc.
- Ils font en sorte de traiter ces interférences pour faciliter les activités individuelles ou (et) la tâche commune quand elle existe » (Hoc, 2003, p.165).

La notion d'interférence a été empruntée à la définition que propose Castelfranchi (1998, p.162, cité par Hoc, 2003) : « les effets des actions d'un agent sont pertinents pour les buts d'un autre agent, c'est-à-dire qu'ils peuvent, soit favoriser la poursuite de certains buts des autres agents (interférence positive), soit mettre en péril certains d'entre eux (interférence négative) ».

Dans une situation de coopération entre deux agents, les interférences peuvent être de différentes natures (positives ou négatives) et agir à différents niveaux de l'activité (au niveau des procédures ou au niveau des actions). Lorsqu'un agent critique l'activité de l'autre agent en lui fournissant une évaluation, par exemple par un avertissement, l'interférence peut alors prendre la forme d'un contrôle mutuel (Wiener, Kanki, & Helmerich, 1993).

Dans le contexte de systèmes homme-machine, un agent machine peut exercer un "contrôle mutuel" sur un agent humain. On peut alors observer chez ce dernier une augmentation de son niveau d'activité. Par exemple, à l'issue d'une tâche de diagnostic de panne d'un équipement électromécanique par des techniciens, Roth, Bennett et Woods (1988) ont caractérisé deux types d'opérateurs selon leur niveau d'activité²⁰. Premièrement, des opérateurs actifs qui procédaient au diagnostic en parallèle à celui de la machine, celle-ci exerçant alors sur lui un contrôle mutuel. Deuxièmement, des opérateurs passifs qui ne réalisaient pas le diagnostic en parallèle. En menant le diagnostic en parallèle, les opérateurs actifs filtraient les informations pertinentes qu'ils fournissaient à la machine, ce qui conduisait à une meilleure performance. Roth et al. (1988) en ont conclu que l'activité de l'utilisateur favorise l'efficacité du système homme-machine en améliorant la performance.

4 QUESTIONS ET HYPOTHESES DE RECHERCHE

A partir d'un travail mené en pluridisciplinarité avec la recherche opérationnelle, nous avons étudié une situation de coopération homme-machine dans le contexte de l'ordonnancement de groupes (chapitre 8). Cette méthode propose que la machine ordonnance des groupes d'opérations et que l'opérateur ordonnance les opérations à l'intérieur de chaque groupe (ordonnancement intra-groupes). De manière générale, on peut tout d'abord se demander quel l'intérêt présente une telle répartition de fonctions ?

Dans la continuité du travail de thèse réalisé en recherche opérationnelle par Pinot (2008), nous avons examiné l'impact d'un outil d'assistance à l'ordonnancement intra-groupes sur cette activité. L'outil d'assistance était composé d'indicateurs de prise de décision, dont l'indicateur "qualité de l'ordonnancement dans le meilleur des cas", développé dans le

²⁰ L'activité est entendue ici au sens de la construction d'une solution au problème de diagnostic.

travail de thèse de Pinot (2008). Plusieurs questions et hypothèses de recherche peuvent alors être formulées :

- Est-ce que la richesse des informations fournies à l'ordonnanceur a un effet sur ses prises de décisions ? En fournissant des informations plus riches à l'ordonnanceur, cela pourrait l'encourager à analyser plus finement le problème. On pourrait alors observer un niveau d'activité supérieur par rapport à une situation dans laquelle les informations de prise de décision sont moins riches (avec moins d'indicateurs).
- Est-ce que la performance d'ordonnancement est améliorée en présence de plus d'indicateurs ? En fournissant des informations plus riches à l'ordonnanceur et donc en le rendant plus actif, cela favoriserait des prises de décision efficaces ce qui aurait un effet d'amélioration sur la performance d'ordonnancement.

Dans ce contexte, nous avons également comparé la présence à l'absence d'un contrôle mutuel de la machine suite aux décisions de l'ordonnanceur. En effet, une fois que l'ordonnanceur avait choisi une opération d'un groupe, la machine lui proposait alors une solution, exerçant sur lui un contrôle mutuel. La présence d'un contrôle mutuel de la machine sur le résultat produit par l'ordonnanceur est supposée avoir des implications sur le niveau de l'activité de l'ordonnanceur. Cette situation de contrôle mutuel pourrait se manifester à deux niveaux, en agissant avant et/ou après la proposition de la machine :

- Lorsqu'il agit avant, l'effet du contrôle mutuel est qualifié d'anticipatif. On est alors susceptible d'observer deux comportements différents. Soit l'opérateur réalise une analyse approfondie de la situation (et son niveau d'activité augmente), soit il en effectue une analyse superficielle et attend la réponse de la machine pour éventuellement se corriger. Ce type de comportement peut alors être expliqué par le phénomène de contentement (Parasuraman & Riley, 1997).
- En cas de désaccord, l'effet du contrôle mutuel agit après la proposition de la machine. Le feedback de la machine devrait alors produire chez l'opérateur une augmentation de son niveau d'activité (relance de l'analyse du problème).

Puisque l'augmentation de l'activité d'un opérateur améliore la performance d'ordonnancement du système homme-machine (Roth et al., 1988), on s'attend à ce que l'augmentation de la richesse des informations proposées à l'ordonnanceur mais aussi la présence d'un contrôle mutuel de la machine permettent d'améliorer les décisions de l'ordonnanceur, et donc du système homme-machine.

Enfin, puisque l'atelier est un environnement soumis à l'apparition d'aléas (Hoc, Mebarki, & Cegarra, 2004), nous avons cherché à aborder de manière plus exploratoire la question de la gestion des risques par l'ordonnanceur. Lorsque celui-ci est dans une condition de risque fort d'une panne machine (par rapport à un risque faible), quel effet cela produit-il sur ses décisions d'ordonnancement, à la fois en termes de processus et de performance ?

5 BIBLIOGRAPHIE

Akkerman, R., & van Donk, D.P. (2009). Analyzing scheduling in the food-processing industry. *Cognition, Technology & Work*, 11, 215-266.

- Ammons, J.C., Govindaraj, T., & Mitchell, C.M. (1986). Human aided scheduling for FMS: a supervisory control paradigm for real-time control of flexible manufacturing systems. *Annals of Operations Research*, 15, 313-335.
- Castelfranchi, C. (1998). Modelling social action for agents. *Artificial Intelligence*, 103, 157-182.
- Crawford, S., & Wiers, V.C.S. (2001). From anecdotes to theory: a review of existing knowledge on human factors of planning and scheduling. In B.L. MacCarthy & J.R. Wilson (Eds.), *Human performance in planning and scheduling* (pp. 15-43). London: Taylor & Francis.
- Crawford, S., MacCarthy, B.L., Wilson, J.R., & Vernon, C. (1999). Investigating the work of industrial schedulers through field study. *Cognition, Technology & Work*, 1, 63-77.
- Esquirol, P., & Lopez, P. (1999). *L'ordonnancement*. Paris : Economica.
- Fitts, P.M. (1951). *Human engineering for an effective air navigation and traffic control system*. Washington, DC: National Research Council.
- Fox, M.S. (1990). Constraint-guided scheduling - a short history of research at CMU. *Computers in Industry*, 14, 79-88.
- Guerin, C., Hoc, J.M., & Mebarki, N. (2011). *The nature of expertise in industrial scheduling: strategic and tactical processes, constraint and object management*. (Manuscript submitted for publication).
- Higgins, P.G. (2001). Architecture and interface aspects of scheduling decision support. In B.L., MacCarthy, J.R. & Wilson (Eds), *Human performance in planning and scheduling* (pp. 245-279). London : Taylor & Francis.
- Hoc, J.M. (2001b). Towards a cognitive approach to human-machine cooperation in dynamics situations. *International Journal of Human-Computer Studies*, 54, 509-540.
- Hoc, J.M. (2003). Coopération humaine et systèmes coopératifs. In G. Boy (Ed.), *Ingénierie cognitive. IHM et cognition* (pp. 139-187). Paris : Hermès.
- Hoc, J.M., & Amalberti, R. (2007). Cognitive control dynamics for reaching a satisficing performance in complex dynamic situations. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1, 22-55.
- Hoc, J.M., & Chauvin, C. (2011). Cooperative implications of the allocation of functions to humans and machines. (Manuscript submitted for publication).
- Hoc, J.M., Guerin, C., & Mebarki, N. (sous presse). The nature of expertise in scheduling: the case of timetabling. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*.
- Hoc, J.M., Mebarki, N., & Cegarra, J. (2004). L'assistance à l'opérateur humain pour l'ordonnancement dans les ateliers manufacturiers. *Le Travail Humain*, 67, 181-208.
- MacCarthy, B.L., & Wilson, J.R. (2001). The human contribution to planning, scheduling and control in manufacturing industry. In B.L. MacCarthy, & J.R. Wilson (Eds.), *Human performance in planning and scheduling* (pp. 3-14). London: Taylor & Francis.
- McKay, K.N., & Wiers, V.C.S. (2003). Integrated decision support for planning, scheduling, and dispatching tasks in a focused factory. *Computers in Industry*, 50, 5-14.

- McKay, K.N., Pinedo, M., & Webster, S. (2002). Practice-focused research issues for scheduling systems. *Production and Operations Management*, 11, 249-258.
- McKay, K.N., Safayeni, F.R., & Buzacott, J.A. (1995). 'Common sense' realities of planning and scheduling in printed circuit board manufacture. *International Journal of Production Research*, 33, 1587-1603.
- McKay, K.N., Buzacott, J.A., Charness, N., & Safayeni, F.R. (1992). The scheduler's predictive expertise. An interdisciplinary perspective. In G.I. Doukidis & R.J. Paul (Eds.), *Artificial Intelligence in Operational Research* (pp. 139-150). London: MacMillan Press.
- Mietus, D.M. (1994). *Understanding planning for effective decision support*. PhD Thesis, University of Groningen, The Netherlands.
- Nakamura, N., & Salvendy, G. (1994). Human planner and scheduler. In G. Salvendy & W. Karwowski (Eds.), *Design of work and development of personnel in advanced manufacturing* (pp.331-354). New York: Wiley.
- Parasuraman, R., & Riley, V. (1997). Humans and automation: use, misuse, disuse, abuse. *Human Factors*, 39, 230-253.
- Pinot, G. (2008). *Coopération homme-machine pour l'ordonnancement sous incertitudes*. Thèse, Université de Nantes, France.
- Roth, E.M., Bennett, K.B., & Woods, D.D. (1988). Human interaction with an "intelligent" machine. In G. Mancini, D.D. Woods, & E. Hollnagel (Eds.) *Cognitive Engineering in Complex Dynamic Worlds* (pp. 23-69). London, UK: Academic Press.
- Sanderson, P.M. (1989). The human planning and scheduling role in advanced manufacturing systems: An emerging human factors domain. *Human Factors*, 31, 635-666.
- Sheridan, T.B. (1992). *Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control*. Cambridge MA: MIT Press.
- van Wezel, W., Cegarra, J., & Hoc, J.M. (2011). Allocating functions to human and algorithm in Scheduling. In J.C. Fransoo, T. Wäfler, & J. Wilson (Eds.), *Behavioral Operations in Planning and Scheduling* (pp. 339-370). Berlin: Springer-Verlag.
- van Wezel, W., Jorna, R.J., & Mietus, D.M. (1996). Scheduling in a generic perspective: knowledge-based decision support by domain analysis. *International Journal of Expert Systems: research and applications*, 3, 357-381.
- Vicente, K.J., & Rasmussen, J. (1990). The ecology of human-machine systems II: mediating direct perception in complex work domains. *Ecological Psychology*, 2, 207-249.
- Wiers, V.C.S. (1997b). Decision support systems for production scheduling tasks – part I of a case study: analysis and task redesign. *Production, Planning & Control*, 8, 711-721.
- Wiener, E., Kanki, B., & Helmreich, R. (Eds.). (1993). *Cockpit Resource Management*. New York: Academic. Press.

CHAPITRE 5 : METHODES D'ETUDE DE L'ORDONNANCEMENT

1	INTRODUCTION	73
2	APPROCHES METHODOLOGIQUES ET TECHNIQUES DE RECUEIL DE DONNEES	73
2.1	METHODES DE DECOMPOSITION DE LA TACHE OU DU DOMAINE DE TRAVAIL	73
2.2	L'ETUDE DE TERRAIN POUR APPREHENDER LES PRATIQUES D'ORDONNANCEMENT.....	74
3	LA METHODOLOGIE DES PROTOCOLES VERBAUX POUR ANALYSER L'ACTIVITE D'ORDONNANCEMENT	76
3.1	JUSTIFICATIONS QUANT A L'UTILISATION DE LA METHODE DES PROTOCOLES VERBAUX	76
3.2	L'ANALYSE DE L'ACTIVITE	77
3.3	L'USAGE DES VERBALISATIONS POUR ACCEDER AUX PROCESSUS MENTAUX	77
3.4	LA CONSIGNE DE VERBALISATION SIMULTANEE	79
3.5	LE CODAGE DE PROTOCOLES ET L'UTILISATION DE MACSHAPA	79
4	LE SCHEME DE CODAGE	80
4.1	AVANT-PROPOS	80
4.2	DESCRIPTION GENERALE	81
4.3	ACTIVITES STRATEGIQUES	82
4.3.1	FORMULATION DE PLAN D'ACTION (PLAN)	82
4.3.2	FORMULATION DE PROCEDURE (F-PR).....	82
4.3.3	FORMULATION DE BUT (F-BUT).....	83
4.3.4	ÉVALUATION DE BUT (EV-BUT)	84
4.3.5	VIOLATION DE CONTRAINTE (VIOL-CTR)	84
4.4	ACTIVITES TACTIQUES	84
4.4.1	OPERATIONS DE TRANSITION DES SPECIFICATIONS OU PREFERENCES VERS L'ESPACE DES CONTRAINTES	85
4.4.1.1	Formulation de contrainte (F-CTR)	85
4.4.2	OPERATIONS A L'INTERIEUR DE L'ESPACE DES CONTRAINTES.....	86
4.4.2.1	Propagation de contraintes (PRG-CTR).....	86
4.4.2.2	Précision de contrainte (PRC-CTR).....	87
4.4.2.3	Relâchement de contrainte (REL-CTR)	88
4.4.3	OPERATIONS DE TRANSITION DE L'ESPACE DES CONTRAINTES VERS L'ESPACE DES OBJETS.....	88
4.4.3.1	Satisfaction de contrainte (SAT-CTR).....	88
4.4.3.2	Faisabilité de satisfaction de contrainte (FAIS-CTR)	90
4.4.3.3	Remise en cause de satisfaction de contrainte (RMS-SAT-CTR)	90
4.4.4	OPERATIONS A L'INTERIEUR DE L'ESPACE DES OBJETS	91
4.4.4.1	Modification d'objet (M-OBJ)	91
4.4.4.2	Particularisation d'objet (P-OBJ).....	91
4.4.5	OPERATIONS DE TRANSITION DE L'ESPACE DES OBJETS VERS L'ESPACE DES CONTRAINTES.....	92
4.4.5.1	Formulation de contrainte (F-CTR)	92
4.5	PARTICULARITE DU SCHEME DE CODAGE SELON LA SITUATION ETUDIEE.....	93
4.5.1	DIFFERENCES DANS LE CODAGE DES ACTIVITES STRATEGIQUES	93
4.5.2	DIFFERENCES DANS LE CODAGE DES ACTIVITES TACTIQUES	94
5	METHODES STATISTIQUES.....	95
5.1	L'INFERENCE FIDUCIO-BAYESIENNE	95
5.2	L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES	95
6	BIBLIOGRAPHIE	96

1 INTRODUCTION

Quel que soit l'objet d'étude, le choix d'une méthode pour l'appréhender doit être justifié par des objectifs de recherche clairement définis. Dans le domaine des activités de planification et d'ordonnancement, plusieurs objectifs sont cités par Cegarra et van Wezel (2011) : l'étude de la structure organisationnelle d'une entreprise, l'étude de la tâche d'ordonnancement, ou encore la conception de programmes de formation ou d'outils d'assistance à l'activité (par ex., les aides à la décision). Pour répondre à ces problématiques, plusieurs approches méthodologiques et différentes techniques de recueil de données peuvent être mises en œuvre.

Après avoir présenté des approches méthodologiques et des techniques de recueil de données, ce chapitre sera consacré à la méthodologie des protocoles verbaux que nous avons privilégié pour étudier l'activité d'ordonnancement. Un soin tout particulier sera accordé à l'explicitation du schème de codage que nous avons utilisé, et qui nous a permis de décrire les stratégies humaines d'ordonnancement dans deux des trois études expérimentales (chapitres 6 et 7). Il est important de noter que cet outil méthodologique a la particularité d'être aussi un résultat, puisqu'une partie du schème a été développée dans le cadre de cette thèse.

Enfin, ce chapitre se conclura sur les principales méthodes statistiques utilisées dans les études expérimentales.

2 APPROCHES METHODOLOGIQUES ET TECHNIQUES DE RECUEIL DE DONNEES

2.1 METHODES DE DECOMPOSITION DE LA TACHE OU DU DOMAINE DE TRAVAIL

Pour réduire le fossé qui existe entre la théorie de l'ordonnancement et sa pratique, Cegarra et van Wezel (2011) ont discuté trois méthodes de décomposition qu'ils considèrent comme pertinentes pour répondre au moins partiellement aux problématiques des activités de planification et d'ordonnancement :

- *L'analyse hiérarchique de la tâche*, à partir de laquelle une décomposition hiérarchique organise les relations entre buts et sous-butts de la tâche. Par exemple, Usher et Kaber (2000, cités par Cegarra & van Wezel, 2011) ont réalisé une décomposition en cinq niveaux pour le domaine de l'ordonnancement de la production. Pour Rasmussen (1997), cette méthode s'inscrit dans une perspective normative car elle prescrit (*a priori*) comment la tâche doit être réalisée à partir d'une décomposition en sous-tâches élémentaires.
- *L'analyse cognitive de la tâche*, qui décrit comment la tâche est effectivement réalisée par l'ordonnanceur. Cette tâche est vue comme une combinaison d'actions et de décisions pour atteindre des buts (par ex., Crawford, MacCarthy, Wilson, & Vernon, 1999). Une telle méthode a permis à van Wezel, Jorna et Mietus (1996) de décomposer une tâche d'ordonnancement d'infirmières en sous-tâches dont certaines ont pu être automatisées par un système d'aide à la décision. Cette méthode s'inscrit dans une perspective descriptive (Rasmussen, 1997) car l'intérêt est porté vers la modélisation des connaissances, des processus de pensée et des buts sous-jacents à la réalisation de la tâche.

- *L'analyse du domaine de travail*, qui permet d'identifier les contraintes imposées par le domaine indépendamment des opérateurs, du degré d'automatisation, des tâches, ou des interfaces. Généralement, la hiérarchie d'abstraction de Rasmussen (1985) permet de réaliser cette analyse, à partir d'une décomposition fonctionnelle du domaine (objectifs fonctionnels, fonctions abstraites, fonctions générales, processus physiques, formes physiques). Dans la littérature sur l'ordonnancement, Higgins (1999, 2001) ou Gacias (2010) ont utilisé cette approche dans leurs travaux. Dans les termes de Rasmussen (1997), cette méthode s'inscrit dans une perspective formative en décrivant les composants physiques et fonctionnels du système (le domaine de travail), et les relations qu'ils entretiennent entre eux.

Dans la pratique, l'ordonnanceur met en œuvre plusieurs activités. Dans cette thèse, nous sommes particulièrement intéressé à celle qui consiste à affecter des ressources (par ex., affecter des enseignants et des salles à des groupes d'étudiants, affecter des machines à des opérations). Une approche en termes de décomposition n'était donc pas pertinente pour nos objectifs de recherche. Toutefois, cette approche nécessite d'utiliser des techniques de recueil de données comme l'observation, l'entretien, les protocoles verbaux, etc. Ces techniques ont par exemple été décrites dans le contexte d'études de terrain menées par Crawford et al. (1999).

2.2 L'ETUDE DE TERRAIN POUR APPREHENDER LES PRATIQUES D'ORDONNANCEMENT

Dans les travaux de Crawford et al. (1999), l'étude de terrain a été présentée comme l'approche méthodologique la plus appropriée pour étudier la pratique de l'ordonnancement et réduire ainsi le fossé qui existe avec la théorie. Cette méthode permettrait d'adopter une approche plus globale en appréhendant plusieurs dimensions telles que la performance humaine, la performance du système, la charge cognitive des opérateurs, leurs stratégies de prise de décision, ou la question de la gestion des informations.

Sur la base de plusieurs recherches menées auprès de quinze ordonnanceurs répartis dans différents secteurs manufacturiers de la Grande-Bretagne, Crawford et al. (1999) ont proposé d'utiliser plusieurs techniques de recueil de données pour décrire le plus finement possible la réalité des pratiques humaines de planification et d'ordonnancement :

- Les *entretiens* (structurés ou semi-structurés) et *questionnaires* peuvent être utilisés pour recueillir des informations préalables à des études plus approfondies. Il s'agirait alors de répondre à des questions du type : quelle est la formation ou l'expérience de l'ordonnanceur ? Quels outils sont utilisés pour ordonnancer ? Sous quel format est fourni l'ordonnancement à l'atelier ? etc.
- *L'analyse des protocoles verbaux* : les verbalisations simultanées permettraient de clarifier les stratégies de résolution de problèmes et de prise de décision utilisées par les ordonnanceurs. La résolution de problème est vue au sens par exemple de l'apparition d'un aléa qui nécessite de réordonnancer l'ordonnancement en cours. Toutefois, les auteurs ont émis des réserves quant à la pertinence de l'utilisation de cette méthode de recueil car l'ordonnancement est une activité dynamique souvent interrompue et qui peut être dispersée dans le temps (souvent des heures, parfois des jours).

- *L'observation directe* des tâches de l'ordonnanceur. Crawford et al. (1999) donnent l'exemple d'une tâche quotidienne : vérifier tous les matins dans sa boîte aux lettres électronique les commandes envoyées par le service planification. Des grilles d'observations peuvent alors être conçues pour recueillir la durée de chaque tâche, les informations nécessaires à sa réalisation, l'apparition de perturbations, etc. Les données recueillies par l'observation permettraient ensuite de mettre en œuvre d'autres méthodes comme l'analyse de la tâche et les questionnaires rétrospectifs de décisions.
- *L'analyse (cognitive) de la tâche*. Les données recueillies au cours de l'observation peuvent être représentées graphiquement sous forme de séquences de tâches réalisées par les ordonnanceurs (figure 9), à partir de règles d'action (par ex., si le stock est disponible alors vérifier si les commandes sont bien enregistrées dans le système).

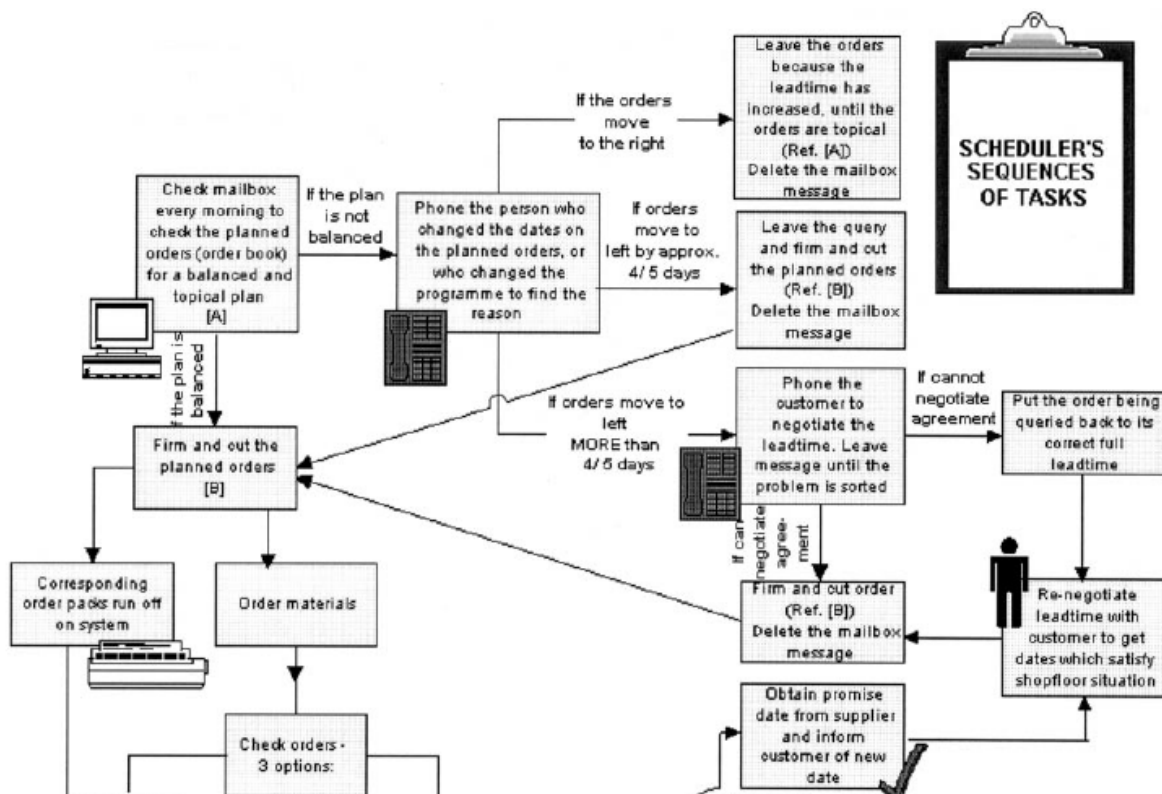


Figure 9 : Extrait d'une représentation graphique de séquences de tâches réalisées par un ordonnanceur (d'après Crawford, MacCarthy, Wilson, & Vernon, 1999).

- Les *questionnaires rétrospectifs de décisions*. Puisque l'utilisation de la méthode des protocoles verbaux simultanés ne leur semblait pas adaptée, les auteurs ont proposé d'obtenir une justification *a posteriori* des prises de décision de l'ordonnanceur. L'intérêt est de comprendre par cette méthode comment les prises de décision sont réalisées dans un environnement incertain. Pour cela, les auteurs se sont appuyés sur les événements recueillis à partir de l'observation directe, et qu'ils ont interprétés comme une prise de décision. Un ensemble bien structuré de questions permettent ensuite d'obtenir une justification du processus de prise de décision (Décrivez cette prise de décision avec vos propres mots. Qu'est-ce qui a été à l'origine de cette décision ? Quelles informations avez-vous utilisé pour prendre cette décision ? etc.) Ces informations sont alors représentées dans un diagramme de décision (figure 10).

- Cette technique des questionnaires rétrospectifs de décisions, qui consiste pour l'ordonnanceur à faire un retour sur sa propre activité de prise de décision, peut être mise en relation avec la technique d'autoconfrontation développée par Theureau (1992). Cette technique consiste notamment à « *présenter à l'acteur, immédiatement après son action un enregistrement vidéo de son comportement et à lui demander de commenter* », à partir de questions posées par l'observateur (Theureau, 1992, p. 45), ce qui peut considérablement orienter les réponses de la personne.

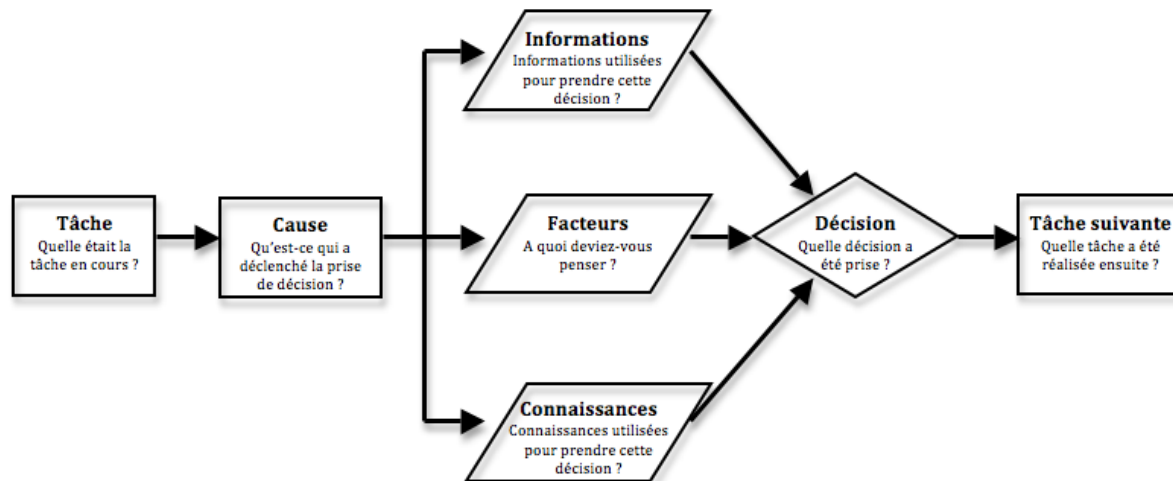


Figure 10 : Diagramme de décision permettant de représenter les réponses recueillies au cours du questionnaire rétrospectif de décisions (traduit et adapté de Crawford, MacCarthy, Wilson, & Vernon, 1999).

3 LA METHODOLOGIE DES PROTOCOLES VERBAUX POUR ANALYSER L'ACTIVITE D'ORDONNANCEMENT

3.1 JUSTIFICATIONS QUANT A L'UTILISATION DE LA METHODE DES PROTOCOLES VERBAUX

Dans cette thèse, nous nous sommes concentrés sur un aspect spécifique de la pratique de l'activité d'un ordonnanceur au sens de Crawford et al. (1999). En effet, il s'agissait d'étudier comment était réalisé un ordonnancement au sens de l'affectation de ressources à des tâches. Toutefois, comme nous le précisons dans l'introduction, nous sommes conscients qu'il s'agit seulement de 20% du travail d'un ordonnanceur (Fox, 1980), lequel doit également recueillir de l'information (par ex., dans l'atelier), diffuser de l'information (à ses collègues, fournisseurs, clients), négocier, anticiper les problèmes, etc. (Wiers, 1997a).

En considérant cette activité du point de vue de la résolution d'un problème de conception, nous avons réalisé une description à partir du codage de protocoles verbaux. Puisqu'un des fondements de cette thèse est de considérer que les représentations manipulées par les ordonnanceurs sont des contraintes, il nous fallait faire appel à une technique permettant d'accéder à ces représentations. L'analyse des verbalisations nous a semblé être la technique la plus appropriée. En utilisant une consigne de type "*penser tout haut*" (section 3.4), les verbalisations provoquées ont pu être recueillies sans orientation particulière, et simultanément à l'exécution de la tâche d'ordonnancement.

Par ailleurs, contrairement aux recommandations de Crawford et al. (1999) quant à l'usage de l'étude de terrain pour examiner l'ordonnancement, nous avons adopté une approche

expérimentale. Ces auteurs considèrent cette approche comme une source utile d'informations, mais avec l'inconvénient majeur, lié à son caractère contrôlé, de ne pas permettre de simuler la complexité et l'incertitude caractérisant les environnements manufacturiers. L'ordonnancement serait une activité dynamique, dispersée dans le temps, souvent interrompue, et donc difficilement accessible à partir de l'analyse des protocoles verbaux. Rappelons que l'objectif de ce travail était bien moins dirigé par une description des pratiques réelles d'ordonnancement dans un contexte d'incertitudes que par une description des processus et représentations manipulées au cours de l'affectation des ressources à des tâches. L'approche expérimentale nous est donc apparue comme la plus adaptée pour examiner cette problématique et nous permettre de généraliser nos résultats à partir de méthodes inférentielles, et particulièrement à partir de l'inférence fiducio-bayésienne (section 5.1).

Enfin, bien que nous ayons adopté une approche expérimentale, nous avons cherché à tendre vers une certaine validité écologique en faisant notamment appel à des experts (et à des étudiants) en ordonnancement.

3.2 L'ANALYSE DE L'ACTIVITE

Pour décrire les stratégies humaines d'ordonnancement, nous avons réalisé une analyse de l'activité et non de la tâche, au sens de Leplat et Hoc (1983). Pour ces auteurs, une tâche est une prescription définie par un but donné dans des conditions d'obtention déterminées. L'activité est alors ce qui est mis en jeu par les individus pour réaliser cette prescription.

Pour Amalberti et Hoc (1998), l'activité mentale est définie par un ensemble d'opérations mentales mises en œuvre pour atteindre des objectifs. L'activité est alors le résultat de la mise en jeu de structures et de mécanismes génériques (Amalberti, 1991). Un des objectifs de cette thèse a été de chercher à décrire un modèle de l'activité d'ordonnancement en termes de gestion de contraintes. Ce modèle de l'opérateur nous a permis d'orienter le choix des marqueurs de l'activité (Amalberti & Hoc, 1998), en référence à un champ théorique et un champ empirique.

Plusieurs méthodes existent pour étudier les représentations mentales des humains pendant la réalisation d'une tâche, notamment par l'intermédiaire des protocoles individuels (par ex., Hoc & Amalberti, 1999). Nous avons choisi de privilégier une méthode se restreignant à l'étude des protocoles verbaux considérés comme une trace de l'activité. Dans l'expérimentation sur la conception d'emploi du temps, et celle sur l'ordonnancement manufacturier, les marqueurs de l'activité ont notamment été décrits à partir des verbalisations produites par les participants pendant la réalisation de la tâche d'ordonnancement. Mais l'usage de cette méthode a longtemps été source de polémiques.

3.3 L'USAGE DES VERBALISATIONS POUR ACCEDER AUX PROCESSUS MENTAUX

L'usage des verbalisations comme reflet du contenu de la pensée humaine a fait longtemps l'objet d'un débat en psychologie. Par exemple, du point de vue des travaux de psychologie sociale, Nisbett et Wilson (1977) considéraient qu'il n'était pas possible, à partir de l'introspection, d'accéder directement aux processus cognitifs de haut niveau tels que le jugement, l'inférence, ou la résolution de problème. Pour ces auteurs, à partir de l'introspection, les individus verbalisent des représentations issues de théories

psychologiques naïves (des modèles *a priori*) et non les représentations qu'ils manipulent réellement. En réaction à ces propos, Smith et Miller (1978) déclaraient qu'il était important de mieux réfléchir sur les conditions permettant l'accès aux processus mentaux à partir des verbalisations. Ils insistaient notamment sur l'importance de considérer le niveau d'automatisme des processus examinés, au sens de l'opposition entre processus automatiques et contrôlés (Shiffrin & Schneider, 1977), qui devait être mis en lien avec le caractère routinier de certaines tâches.

Les travaux d'Ericsson et Simon (1980, 1993) ont en quelque sorte marqué un point d'arrêt à ce débat en argumentant sur la validité de l'usage des protocoles verbaux en psychologie, et plus particulièrement pour accéder aux processus de traitement de l'information symbolique. Ces auteurs proposaient notamment de distinguer le délai entre la réalisation de la tâche et le moment des verbalisations pour éviter des reconstructions *a posteriori* (une des critiques formulées par Nisbett et Wilson portait sur des travaux dans lesquels ce paramètre n'était pas contrôlé). A partir de là pouvaient être distinguées les verbalisations simultanées (ou concomitantes) et les verbalisations consécutives (Hoc & Leplat, 1983 ; Leplat & Hoc, 1981), dont la production verbale était plus différée. L'usage d'une technique ou d'une autre présente ses avantages et ses inconvénients selon les buts poursuivis par l'étude.

Pour Ericsson et Simon (1980, 1993), lorsque l'on s'intéresse au contenu immédiat de la Mémoire à Court Terme (MCT), ou Mémoire de Travail (Baddeley, 1986), il est préférable de faire appel aux verbalisations simultanées. En effet, l'intervalle de temps entre le traitement et le protocole verbal peut être si long, en utilisant les verbalisations consécutives, que les informations pertinentes ne sont alors plus disponibles en MCT. Ainsi, les verbalisations simultanées ne concerneraient normalement que le contenu immédiat de la MCT, c'est-à-dire les pensées ou actions relatives à la situation immédiatement vécue.

Pour Ericsson et Simon (1980, 1993) autant que pour Leplat et Hoc (1981), les verbalisations reflètent donc le contenu de la MCT, constitué de représentations symboliques. Or en psychologie, on ne peut accéder aux représentations que par la voie de l'inférence. La méthodologie des protocoles verbaux nous a donc permis de « *reconstruire la notion de représentation à partir d'inférences basées sur des observables* » (Le Ny, 1985, p.232).

Dans l'importante littérature sur la résolution de problèmes, de nombreux auteurs ont utilisé la méthode des protocoles verbaux pour décrire l'activité mentale. Par exemple, Newell et Simon (1972) ont largement utilisé les verbalisations pour développer leur modèle *GPS (General Problem Solver)*. De même, le fameux modèle *SRK (Skill, Rule, Knowledge)* de Rasmussen a notamment été développé à partir de l'examen de verbalisations au cours du diagnostic de panne d'appareils électroniques (Rasmussen & Jensen, 1974). Enfin, les travaux sur les problèmes de conception ont également utilisé cette méthode (Darses, 1991, 1994 ; Gero & Mc Neil, 1998 ; Guindon, 1990).

Pour le cas particulier des travaux sur l'ordonnancement, plusieurs auteurs ont également utilisé les protocoles verbaux pour accéder aux processus mentaux (Beishon, 1974 ; Brainbridge, 1974 ; Guerin, Hoc, & Mebarki, 2011 ; Hoc, Guerin, & Mebarki, sous presse ; Nakamura & Salvendy, 1988 ; Smith & Crabtree, 1975 ; Tabe & Salvendy, 1988 ; Tabe, Yamamuro, & Salvendy, 1988).

3.4 LA CONSIGNE DE VERBALISATION SIMULTANEE

Nous avons utilisé une consigne de verbalisation simultanée à l'exécution de la tâche d'ordonnancement, de type "*penser tout haut*" (traduction littérale de l'expression de Duncker (1958) : "*thinking aloud*"). Bien que notre usage de cette consigne soit tout à fait cohérent avec son initiateur, nous avons trouvé, après Hoc et Leplat (1983), que cette expression était trop exigeante en matière de contenus verbalisés. C'est pourquoi, nous avons demandé aux participants de l'expérience de dire à haute voix ce qui leur passait par la tête en exécutant la tâche, même si cela pouvait paraître décousu ; l'essentiel étant d'exécuter la tâche. Ce type de consigne est conforme à ce que souhaitait Duncker (1958), c'est-à-dire lever la censure, et Ericsson et Simon (1980, 1993), autant que Hoc et Leplat (1983), c'est-à-dire "vider" la mémoire à court terme, avec le moins possible de traitement (auquel car il y aurait une reconstruction).

Caverni (1988) a critiqué l'usage de ce type de consigne car elle pourrait conduire à une modification de l'exécution de la tâche et de la performance du participant. Deux types de biais pourraient alors apparaître. Un biais de réactivité lorsque le sujet rationalise à l'excès et s'éloigne des processus en jeu dans l'activité et un biais de validité lorsque le sujet s'efforce de justifier toutes ses activités mentales. Pour Amalberti et Hoc (1998), l'utilisation d'une consigne de verbalisation simultanée à la tâche convient particulièrement à l'étude des processus de traitement de l'information symbolique, qui peuvent apparaître aussi bien dans des situations statiques que dans des situations dynamiques. Dans ce travail de thèse, les situations expérimentales proposées aux participants étaient statiques, et l'activité de résolution du problème d'ordonnancement impliquait la mise en œuvre de processus symboliques.

3.5 LE CODAGE DE PROTOCOLES ET L'UTILISATION DE MACSHAPA

Pour Amalberti et Hoc (1998), le codage de protocole s'appuie à la fois sur un modèle de l'opérateur et sur des comportements observables verbaux et non-verbaux. Le contexte et les connaissances de l'observateur dans le domaine participent également à l'activité de codage puisqu'elles permettent d'interpréter certaines verbalisations et/ou actions qui pourraient n'avoir aucune signification hors contexte. Par exemple, le contexte permettra d'inférer si une prise d'information est réalisée par un opérateur de manière "contemplative" ou si l'information prélevée lui permet d'évaluer une action qu'il a réalisée antérieurement. Ainsi, les connaissances de l'observateur et le contexte permettent de renseigner l'observateur sur les conditions psychologiques de production d'une verbalisation et/ou action.

Les protocoles des participants ont été codés en utilisant un formalisme de codage de type prédicat–arguments. Dans cette perspective, un prédicat code une activité cognitive ou un comportement, et des arguments spécifient cette activité ou ce comportement (pour plus de détails, voir Hoc & Amalberti, 1999). Certains arguments peuvent être communs à plusieurs prédicats. De manière générique, le format de codage est le suivant :

NOM_PREDICAT (<VAR1>, <VAR2>, ..., <VARN>)

NOM_PREDICAT : activité cognitive ou comportement

<VAR1>, <VAR2>, ..., <VARN> : arguments (variables) spécifiant l'activité cognitive ou le comportement

D'un point de vue technique, le codage d'un protocole brut nécessite la segmentation de celui-ci en unités verbales et comportementales signifiantes. Celles-ci sont sélectionnées comme support, permettant de partitionner une ou plusieurs unités de contenu. Elles peuvent donc varier en termes de longueur, par exemple entre des verbalisations brèves (par ex., « *c'est réservé* ») et des expressions plus longues (par ex., « *sachant qu'on évite en début de matinée parce que les étudiants ne sont pas toujours bien réveillés* »). On peut alors être amené à coder une ou plusieurs unités de contenu pour une seule unité verbale plus ou moins longue. Cette méthode d'analyse de contenu se distingue donc de l'analyse propositionnelle, puisque dans cette thèse, une même proposition pouvait être codée sous forme de plusieurs contenus.

Enfin, pour mettre en œuvre le codage des protocoles des participants, nous avons utilisé le logiciel MacSHAPA, conçu par Sanderson et al. (1994). Cet outil nous a permis de mettre en œuvre le formalisme prédicat–arguments en codant des activités séquentielles à partir des comportements observables. Pour cela, nous avons construit un schème de codage qui définit les contenus à coder et qui dirige le découpage des activités.

4 LE SCHEME DE CODAGE

4.1 AVANT-PROPOS

Ce schème de codage a été utilisé pour décrire l'activité d'ordonnancement dans la situation de conception d'emploi du temps et dans la situation d'ordonnancement manufacturier sous forme de diagramme de *Gantt*. Nous l'avons donc exploité pour deux des trois études de cette thèse (chapitres 6 et 7).

Dans le travail pluridisciplinaire sur la coopération homme-machine pour l'ordonnancement (chapitre 8), la méthodologie de codage des protocoles n'était pas adaptée pour plusieurs raisons. Tout d'abord, aucune représentation de l'ordonnancement (par ex., un diagramme de *Gantt*) n'était fournie au participant. Il n'était donc pas possible qu'ils manipulent des objets comme nous l'avons défini dans le chapitre 2. Par ailleurs, les pré-tests ont montré que l'activité de gestion de contraintes n'était que très modestement verbalisée. En effet, seule la contrainte de durée opératoire était fournie, et seulement dans quelques conditions expérimentales. Ainsi, les participants n'avaient pas véritablement accès aux contraintes du problème. Enfin, nous étions guidé par d'autres objectifs que de décrire les stratégies de gestion de contraintes des ordonnanceurs. C'est pourquoi, pour cette étude

pluridisciplinaire, nous avons utilisé une autre méthodologie qui sera décrite dans le chapitre 8.

4.2 DESCRIPTION GENERALE

Pour décrire l'activité d'ordonnancement dans la conception d'emploi du temps et dans l'ordonnancement manufacturier, nous avons construit un schème de codage en nous appuyant sur les travaux de Stefik (1981a), de Darses (1991, 1994), et sur les spécificités de chaque situation étudiée. Nous avons notamment privilégié l'expression des contraintes dans le "découpage" des activités. Une des particularités de ce travail de thèse est donc de considérer le schème de codage comme un résultat, car il est le "reflet" à la fois de connaissances préalables et de notre observation de participants dans différentes situations.

Le schème de codage est constitué d'un ensemble d'opérations cognitives pouvant être distinguées selon deux niveaux d'abstraction dans le contrôle cognitif des processus symboliques :

- Un haut niveau d'abstraction. Il s'agit de processus ou activités stratégiques liées à la gestion des plans d'action, des procédures, et des buts.
- Un bas niveau d'abstraction composé de processus ou activités tactiques, et décrits en termes de gestion de contraintes et d'objets. A ce niveau, on distingue deux espaces problèmes duaux : l'espace des contraintes et l'espace des objets (figure 11).

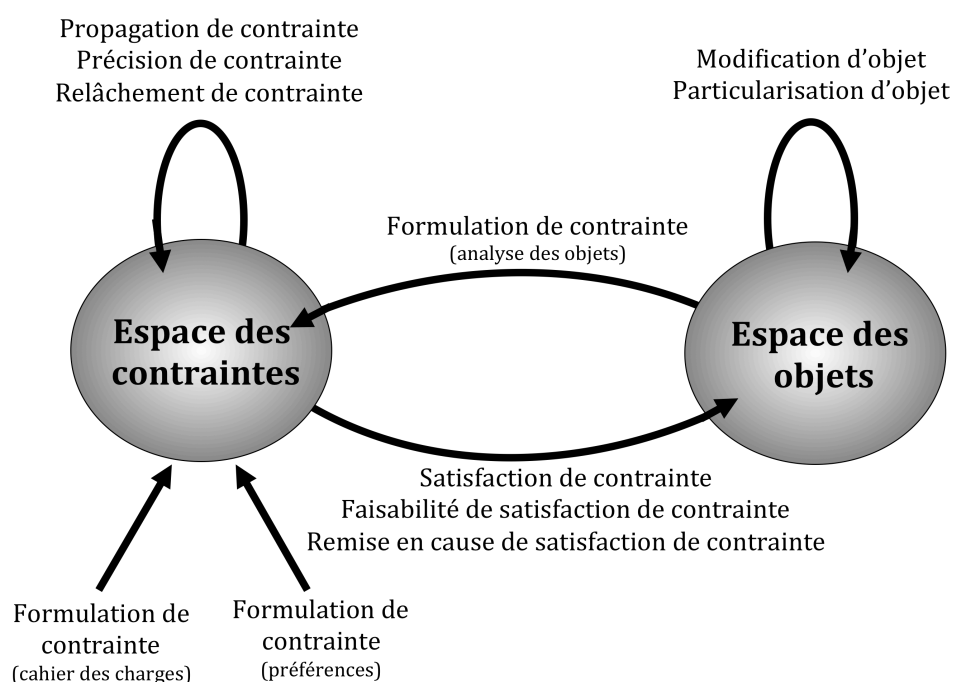


Figure 11 : Représentation des espaces problèmes duaux permettant de décrire le niveau tactique dans l'activité d'ordonnancement. Les flèches autour des deux espaces problème représentent des opérations. L'origine des flèches correspond au type d'entité qui joue le rôle de donnée pour l'opération.

L'idée du raisonnement dans des espaces problèmes duaux est traditionnelle en psychologie de la résolution de problème. Elle a notamment été introduite par Simon et Lea (1974) au travers du paradigme d'identification de concept. Cela permet de souligner l'importance des changements de formats de représentation (ou SRT) pendant l'activité de résolution de

problème, et par extension ici dans la conception d'emploi du temps ou dans l'ordonnancement manufacturier.

La figure 11 montre que chaque espace est caractérisé par des opérations qui lui sont propres, et que certaines opérations permettent de basculer d'un espace à l'autre. Les flèches autour des deux espaces problème représentent des opérations. L'origine des flèches correspond au type d'entité qui joue le rôle de donnée pour l'opération. Par exemple pour l'opération satisfaction de contrainte, l'opération prend une ou plusieurs contraintes comme donnée et produit une ou plusieurs objets comme résultat, en satisfaisant la (les) contrainte(s).

Nous présenterons successivement les deux niveaux de granularité pour le découpage des marqueurs de l'activité d'ordonnancement (dimension stratégique et dimension tactique). Pour chaque niveau, nous détaillerons les opérations en définissant l'activité codée, le prédicat et les arguments que nous avons utilisés et un ou plusieurs exemples de codage.

4.3 ACTIVITES STRATEGIQUES

Parmi les activités stratégiques, nous avons distingué cinq prédicats : la formulation de plan d'action, la formulation de procédure, la formulation de but, l'évaluation de but, la violation de contrainte.

4.3.1 FORMULATION DE PLAN D'ACTION (PLAN)

Cette opération consiste à formuler un élément de planification pour aider l'ordonnanceur à organiser son activité. Plusieurs types de plan peuvent être formulés, ce qui fait l'objet d'un argument (<TYPE>).

PLAN (<TYPE>)

Exemple : « *je peux voir qu'il y a beaucoup d'espaces vides dans l'emploi du temps. Je vais donc essayer de décaler des modules* ». Dans cet exemple, l'ordonnanceur cherche à remplir les espaces vides pour optimiser l'emploi du temps.

PLAN (optimiser-ET)

Exemple : « *je vais aller voir si j'ai une salle de libre le mardi* ». Dans cet exemple, l'ordonnanceur formule un but de prise d'information.

PLAN (But-PI)

4.3.2 FORMULATION DE PROCEDURE (F-PR)

Nous empruntons à Hoc (1987, p. 39-44) la définition d'une procédure : « *Système préalablement acquis d'opérations coordonnées en vue d'obtenir un certain type de but (...) dont l'exécution a pour objectif de faire passer d'un état initial à l'état final ou but* ».

Dans l'ordonnancement manufacturier, une procédure peut être une règle de priorité. Par exemple les règles d'ordonnancement SPT, LPT, EDD, FCFS (cf. Introduction). On peut également trouver des procédures liées aux spécificités d'un atelier. Par exemple, on

ordonnance un poste de peinture en tenant compte de la couleur des produits à peindre. Avec deux couleurs, le noir et le blanc par exemple, il peut être préférable de traiter d'abord les produits à peindre en blanc avant ceux qui doivent être peints en noir (pour des questions de nettoyage du matériel).

Pour spécifier le type de procédure formulée, nous avons utilisé l'argument <PR>.

F-PR (<PR>)

Exemple : « *je vais d'abord commencer par classer mes OF en fonction de leur durée : des plus petits aux plus grands* ». Cet exemple illustre la formulation d'une procédure SPT.

F-PR (spt)

4.3.3 FORMULATION DE BUT (F-BUT)

Un but, est un état final que cherche à atteindre un opérateur. C'est un élément de guidage de son activité. Dans l'ordonnancement manufacturier, les buts formulés peuvent être :

- Minimiser le *Makespan* (Cmax), c'est-à-dire la durée totale de mise en œuvre de l'ordonnancement²¹.
- Minimiser les retards, chaque ordre de fabrication étant défini par une date de livraison.
- Minimiser les temps d'attente, c'est à dire le temps avant qu'une opération soit réalisée.
- Introduire de la marge entre les ordres de fabrication pour anticiper les périodes de maintenance. Ce but qui consiste à introduire des temps d'attente peut être contradictoire avec le but précédent. Toutefois, il peut être lié aux capacités d'anticipation des experts (Cellier, Eyrolle, & Mariné, 1997).

Puisque plusieurs types de buts peuvent être formulés, nous les avons distingués par l'argument <BUT>.

F-BUT (<BUT>)

Exemple : « *Maintenant, je vais essayer de minimiser la durée de réalisation de l'ordonnancement* ». Dans cet exemple, l'ordonnanceur formule le but de minimiser le *Makespan* (Cmax).

F-BUT (minimiserCmax)

²¹ Le résultat final de l'activité d'ordonnancement produit un plan qu'on appelle également ordonnancement. Une fois que ce résultat a été atteint, l'ordonnancement a pour vocation d'être exécuté par des entités humaines et/ou machines. Une durée totale d'ordonnancement peut donc à la fois désigner la durée de conception de l'ordonnancement par l'ordonnanceur, mais aussi la durée totale que mettra l'ordonnancement pour être exécuté (la durée minimale qui sera nécessaire pour réaliser toutes les opérations ordonnancées en suivant exactement l'ordonnancement proposé). C'est ce second sens qui est utilisé ici, en précisant qu'il s'agit d'une durée de mise en œuvre. Par ailleurs, le *Makespan* est un indicateur de l'utilisation des ressources : plus la durée est faible, meilleure est l'utilisation des ressources (et donc la productivité de l'atelier).

4.3.4 ÉVALUATION DE BUT (EV-BUT)

Évaluer un but consiste à évaluer positivement ou négativement un résultat (argument <EV>). Nous avons codé une évaluation de but lorsqu'elle était réalisée suite à l'exécution d'actions (par ex., le déplacement d'ordres de fabrication sur le diagramme de *Gantt*). Le critère d'évaluation d'un but est une propriété du but atteint (argument <P-BUT>). Il pouvait s'agir d'une propriété de l'état de l'ordonnancement (par ex., le temps d'attente entre deux opérations) ou d'un indicateur de performance lu par le participant (par ex., le Cmax).

EV-BUT (<P-BUT>, <EV>)

Exemple : « *Il y a trop d'espaces vides entre mes OF* ». Dans cet exemple de verbalisation, l'ordonnanceur réalise une évaluation négative de but à partir d'une propriété de l'ordonnancement (les temps d'attentes entre les ordres de fabrication).

Ev-BUT (temps-attente, négatif)

4.3.5 VIOLATION DE CONTRAINTE (VIOL-CTR)

Violier une contrainte consiste à ne plus la considérer dans l'ordonnancement de manière permanente. Il ne s'agit donc pas d'une erreur mais d'une décision délibérée de l'ordonnanceur. Même si des contraintes sont en jeu dans cette activité, nous considérons la violation de contraintes comme une activité stratégique car violer délibérément une contrainte consiste à redéfinir la tâche, en particulier car il s'agit de contraintes prescrites par la tâche (section 4.4.1.1). Dans cette thèse, cette opération est à distinguer du relâchement de contrainte qui consiste à remettre en cause temporairement une contrainte (introduite par les préférences de l'ordonnanceur), et qui a été codée au niveau tactique de l'activité (section 4.4.2.3).

Dans l'expérience sur l'ordonnancement manufacturier, les quelques contraintes prescrites qui ont été violées étaient les périodes de maintenance. Cette opération n'est pas apparue dans la conception d'emploi du temps.

VIOL-CTR (<COMMANDE>, <MACHINE>, <PERIODE>, <ORIGINE>)

Exemple : « *Donc là cette période de maintenance je ne vais pas la faire car j'ai ma période de découpe qui finit en plein dedans* ». Dans cet exemple, le participant viole la contrainte qui consistait à introduire une période de maintenance sur la machine de découpe.

VIOL-CTR (<COMMANDE>, découpe, période-maintenance, prescrite)

4.4 ACTIVITES TACTIQUES

Parmi les activités tactiques nous pouvons distinguer neuf prédicats : la formulation de contrainte, la propagation de contraintes, la précision de contrainte, le relâchement de contrainte, la satisfaction de contrainte, la faisabilité de satisfaction de contrainte, la remise en cause de satisfaction de contrainte, la modification d'objet et la particularisation d'objet.

Ces activités tactiques d'ordonnancement s'articuleraient autour de 2 espaces duaux : un espace des contraintes et un espace des objets. Nous présenterons chacune des opérations en faisant référence à la figure 11.

4.4.1 OPERATIONS DE TRANSITION DES SPECIFICATIONS OU PREFERENCES VERS L'ESPACE DES CONTRAINTES

4.4.1.1 Formulation de contrainte (F-CTR)

La formulation de contrainte consiste à introduire une nouvelle contrainte dans le processus d'ordonnancement, par la mise en relation de variables (Darses, 1991, 1994 ; Meseguer, 1989 ; Stefik, 1981a), et sans qu'elle soit générée par la propagation de contraintes existantes.

Selon la situation, le nombre de variables en relation peut être différent. Dans la conception d'emploi du temps, cinq variables peuvent être concernées (Groupe d'étudiants, Salle, Enseignant, Module, Période). Dans l'ordonnancement manufacturier, les contraintes sont des combinaisons parmi les trois variables (Commande, Machine, Période).

Dans la littérature, il existe plusieurs typologies de contraintes (Chevalier & Cegarra, 2008). Nous avons privilégié celle qui consiste à qualifier les contraintes selon leur origine, c'est-à-dire leur mode d'introduction dans le processus de conception de l'ordonnancement (Bonnardel, 1992 ; Darses, 1991, 1994 ; Eastman, 1970 ; Janssen, Jégou, Nougier, & Vilarem, 1989 ; Ullman, Dietterich, & Staufner, 1988). De ce point de vue, une contrainte peut être :

- Prescrite : elle provient des spécifications du cahier des charges. Les contraintes prescrites peuvent être identifiées avant l'activité d'ordonnancement. Elles sont en quelque sorte incontournables et ne peuvent être ignorées.
- Déduite : elle est issue de l'analyse de l'état de la solution. Les contraintes déduites proviennent de l'analyse des objets déjà définis dans la représentation de la solution au problème d'ordonnancement (emploi du temps, diagramme de *Gantt*).
- Introduite : elle provient des connaissances ou des préférences de l'ordonnanceur.

Par ailleurs, parmi les typologies de contraintes utilisées dans les travaux sur l'activité de conception, on distingue souvent l'origine d'une contrainte (prescrite, déduite ou introduite) de son importance (par ex., Bonnardel, 1992 ; Darses, 1991, 1994). Lorsqu'on qualifie une contrainte du point de vue de son importance, on peut alors distinguer les contraintes de validité (impérative à satisfaire) des contraintes de préférence (dont la pondération est flexible). Toutefois, comme le notent Chevalier et Cegarra (2008), la distinction entre l'origine d'une contrainte et son importance peut être inadaptée. Premièrement, il existe une différence inter-individuelle dans l'importance attribuée à une contrainte (liée par exemple à l'expertise du concepteur). Deuxièmement, cette pondération peut varier selon les situations, voire au cours de la résolution du même problème. Dans l'ordonnancement, certaines dates de livraison, considérées comme des contraintes de validité peuvent être relâchées pour disposer de degrés de liberté et minimiser ainsi le total des retards (Higgins, 1999). Cette variabilité quant à la pondération d'une contrainte explique probablement qu'à partir de spécifications initiales identiques, les concepteurs produisent une multiplicité de solutions acceptables.

Dans notre codage, nous avons donc considéré que les contraintes prescrites incluaient les contraintes de validité, et que les contraintes de préférence étaient comprises dans les contraintes introduites.

F-CTR (<VAR1>, <VAR2>, ..., <VARN>, <ORIGINE>)

Conception d'emploi du temps : F-CTR (<GROUPE>, <SALLE>, <ENSEIGNANT>, <MODULE>, <PERIODE>, <ORIGINE>)

Ordonnancement manufacturier : F-CTR (<COMMANDE>, <MACHINE>, <PERIODE>, <ORIGINE>)

Exemple : « *Alors Mr Murphy lui est absent le mercredi après-midi* ». Cette contrainte, qui met en relation la variable "enseignant" avec la variable "période", est prescrite par les spécifications du cahier des charges.

F-CTR (<GROUPE>, <SALLE>, murphy, <MODULE>, mercredi-après-midi, prescrite)

Exemple : « *Je préfère mettre les DS²² le matin* ». Cette contrainte, qui met en relation la variable "module" avec la variable "période", est introduite par les préférences de l'ordonnanceur.

F-CTR (<GROUPE>, <SALLE>, <ENSEIGNANT>, ds, matin, introduite)

Exemple : « *La soudure de l'OF2 dure 200 minutes* ». Cette contrainte, qui met en relation les 3 variables (commande, machine, période et plus particulièrement la durée d'une opération) est prescrite par les spécifications du cahier des charges.

F-CTR (of2, soudure, durée-opération, prescrite)

4.4.2 OPERATIONS A L'INTERIEUR DE L'ESPACE DES CONTRAINTES

Ces opérations impliquent des contraintes en données et des contraintes en résultats.

4.4.2.1 Propagation de contraintes (PRG-CTR)

La propagation de contraintes consiste à créer une nouvelle contrainte à partir de contraintes déjà formulées (Darses, 1991, 1994 ; Meseguer, 1989 ; Stefik, 1981a). Cette opération combine un ensemble de contraintes précédentes. Par définition, les contraintes propagées sont toujours déduites d'autres contraintes (argument <ORIGINE>).

²² Devoir Surveillé

PRG-CTR (<VAR1>, <VAR2>, ..., <VARN>, <ORIGINE>)

Conception d'emploi du temps : PRG-CTR (<GROUPE>, <SALLE>, <ENSEIGNANT>, <MODULE>, <PERIODE>, <ORIGINE>)

Ordonnancement manufacturier : PRG-CTR (<COMMANDE>, <MACHINE>, <PERIODE>, <ORIGINE>)

Exemple : « *Donc ben je vais commencer par l'Anglais pour les 3 groupes, comme dans l'ordre du document... Et je vais planifier l'Anglais sur la même matinée* ». Tout d'abord, l'ordonnanceur formule une première contrainte prescrite, mettant en relation le module et les groupes concernés. Puis il formule une deuxième contrainte issue de l'analyse des objets (des matinées sont disponibles dans l'emploi du temps). La combinaison de ces deux contraintes crée une nouvelle contrainte.

F-CTR (groupe1-2-3, <SALLE>, <ENSEIGNANT>, td-anglais, <PERIODE>, prescrite)

F-CTR (<GROUPE>, <SALLE>, <ENSEIGNANT>, td-anglais, même-matinée, déduite-objets)

⇒ PRG-CTR (groupe1-2-3, <SALLE>, <ENSEIGNANT>, td-anglais, même-matinée, déduite-contraintes)

Exemple : « *Attends... C'est combien la somme ?...400. Ben de toute façon on est obligé de mettre l'OF1 en premier parce qu'il doit être livré tout de suite* ». La combinaison de la contrainte de durée (prescrite) et de la contrainte de date de livraison (prescrite) implique une contrainte d'ordre absolu pour la commande n°1.

F-CTR (of1, <MACHINE>, durée-opération, prescrite)

F-CTR (of1, <MACHINE>, date-livraison, prescrite)

⇒ PRG-CTR (of1, <MACHINE>, ordre-absolu, déduite-contraintes)

4.4.2.2 Précision de contrainte (PRC-CTR)

La précision de contrainte consiste à ajouter une nouvelle spécification à une contrainte qui a été formulée antérieurement. La contrainte devient alors plus précise sur la hiérarchie de raffinement.

PRC-CTR (<GROUPE>, <SALLE>, <ENSEIGNANT>, <MODULE>, <PERIODE>, <ORIGINE>)

Exemple : « *Il y a un Cours Magistral d'Economie à placer ... Donc le CM d'éco dure 2h45* ». Dans cet exemple, l'ordonnanceur formule une contrainte prescrite qui consiste à placer un Cours Magistral d'Economie (variable "module"). Puis quelques minutes après, il précise que ce Cours dure 2H45. Il précise donc la contrainte en ajoutant une valeur (la durée du CM) à la variable "période".

F-CTR (<GROUPE>, <SALLE>, <ENSEIGNANT>, cm-économie, <PERIODE>, prescrite)

⇒ PRC-CTR (<GROUPE>, <SALLE>, <ENSEIGNANT>, cm-économie, durée, prescrite)

4.4.2.3 Relâchement de contrainte (REL-CTR)

Nous définissons le relâchement de contrainte comme la remise en cause temporaire d'une contrainte dans le processus d'ordonnancement. Cette opération est utilisée depuis longtemps en Intelligence Artificielle (programmation sous contraintes – par ex., Hooker, 2006), et on la retrouve dans le domaine de la conception (par ex., Kolodner & Wills, 1996) et dans les travaux de psychologie cognitive (par ex., Richard, 1999). Dans cette thèse, le relâchement de contrainte (remise en cause temporaire) s'oppose à la violation de contrainte (remise en cause permanente, c'est-à-dire une élimination de contrainte). Plus précisément, le relâchement concerne des contraintes introduites par les préférences de l'ordonnanceur, contrairement à l'opération de violation qui concerne des contraintes prescrites par la tâche.

Dans l'ordonnancement, les relâchements de contraintes permettent d'obtenir des marges de manœuvre supplémentaires (Higgins, 1999). Par exemple, un relâchement de contrainte sur la qualité des produits peut être mis en œuvre temporairement au profit d'une amélioration des cadences de production. Pour Richard, Poitrenaud et Tijus (1993), un relâchement de contrainte peut conduire à une élimination de contrainte pour sortir d'impasses. De notre point de vue, il s'agit d'une violation de contrainte codée au niveau stratégique de l'activité.

Dans la conception d'emploi du temps, nous avons codé seulement quelques relâchements de contraintes, principalement sur la base du contexte. Ces opérations sont souvent apparues après une opération de détection de conflit entre contraintes. En revanche le relâchement de contrainte n'est pas apparu dans la situation d'ordonnancement manufacturier.

REL-CTR (<GROUPE>, <SALLE>, <ENSEIGNANT>, <MODULE>, <PERIODE>, <ORIGINE>)

Exemple : « Bon alors tant pis, je les mets dans la salle de TD1. Ils vont devoir changer de salle. En fait, je ne voulais pas les faire changer de salle mais bon, c'est pas grave ». Dans cet exemple, le contexte nous permet de comprendre que l'ordonnanceur relâche une contrainte qui consiste à mettre le même groupe dans la même salle, au cours de la même matinée. Cette contrainte qui met en relation les variables "groupe", "salle", et "période" est une contrainte introduite à partir de préférences.

REL-CTR (même-groupe, même-salle, <ENSEIGNANT>, <MODULE>, même-matinée, introduite)

4.4.3 OPERATIONS DE TRANSITION DE L'ESPACE DES CONTRAINTES VERS L'ESPACE DES OBJETS

Ces opérations impliquent des contraintes en données et des objets en résultats.

4.4.3.1 Satisfaction de contrainte (SAT-CTR)

La satisfaction de contrainte consiste à associer à des variables des valeurs acceptables pour obtenir une combinaison valide dans le processus d'ordonnancement. La contrainte est particularisée (Darses, 1991, 1994 ; Meseguer, 1989 ; Stefik, 1981a), et l'ordonnanceur passe de l'espace des contraintes vers l'espace des objets car un objet permet de satisfaire la contrainte.

Dans la conception d'emploi du temps, nous avons codé une satisfaction de contrainte lorsqu'un objet apparaissait sur l'emploi du temps, toujours en relation avec une formulation préalable de contrainte(s). Cet objet pouvait être concret (entièrement défini) ou abstrait (partiellement défini). Un argument « type d'objet » a donc été utilisé dans le but d'évaluer les pourcentages respectifs d'objets concrets et abstraits.

Dans l'ordonnancement manufacturier, le codage des satisfactions de contrainte était quelque peu différent car ces opérations passaient nécessairement par des comportements de modification d'objet (section 4.4.4.1). Les satisfactions de contraintes ont donc été inférées directement à partir des comportements, mais en respectant la règle suivante : toute satisfaction de contrainte doit être précédée d'une gestion de contrainte(s) (par ex., une formulation de contrainte).

SAT-CTR (<VAR1>, <VAR2>, ..., <VARN>, <ORIGINE>)

Conception d'emploi du temps : SAT-CTR (<GROUPE>, <SALLE>, <ENSEIGNANT>, <MODULE>, <PERIODE>, <ORIGINE>, <TYPE-OBJET>)

Ordonnancement manufacturier : SAT-CTR (<COMMANDE>, <MACHINE>, <PERIODE>, <ORIGINE>)

Exemple : « *Alors le DS je vais le mettre là pour l'instant et on verra ensuite pour la salle* ». Dans cet exemple, l'ordonnanceur satisfait une contrainte impliquant la variable "module" (devoir surveillé de communication). Puisque les devoirs surveillés concernent forcément les trois groupes d'étudiants, la variable "groupe" est implicitement en jeu dans la contrainte. De plus, le contexte nous permet d'inférer la valeur de la variable "période" (cf. l'expression « *le mettre là* »). Enfin, ni la variable "enseignant" ni la variable "salle" n'est renseignée. La satisfaction de contrainte est donc réalisée à partir d'un objet abstrait.

SAT-CTR (groupe1-2-3, <SALLE>, <ENSEIGNANT>, ds-communication, lundi-matin, prescrite, objet-abstrait)

Exemple : « *Alors l'OF5 au plus tard il faut qu'il soit livré à 1850 minutes donc on peut le décaler après l'OF4 pour voir* ». Dans cet exemple, le codage d'une satisfaction de contrainte est précédé par le codage d'une gestion de contraintes. Tout d'abord, l'ordonnanceur formule une contrainte concernant la date de livraison de l'OF5 (il faut que cette commande soit livrée au plus tard à la date 1850 minutes). De plus, une contrainte d'ordre relatif est véhiculée dans la verbalisation « *on peut le décaler après l'OF4* ». C'est l'idée qu'on peut ordonnancer un OF par rapport à un autre en considérant leurs dates de livraison (par ex., entre 2 OF, la plus grande date de livraison après la plus petite). A partir de ces deux contraintes (l'une prescrite et l'autre introduite) est produite par propagation une nouvelle contrainte (qui combine les deux). Cette contrainte est finalement satisfaite.

F-CTR (of5, <MACHINE>, date-livraison, prescrite)

F-CTR (of-ordre-relatif, <MACHINE>, maximum-date-livraison, introduite)

PRG-CTR (of5, <MACHINE>, ordre-relatif, introduite)

⇒ SAT-CTR (of5, <MACHINE>, ordre-relatif, introduite)

4.4.3.2 Faisabilité de satisfaction de contrainte (FAIS-CTR)

La faisabilité de satisfaction de contrainte est une activité qui consiste à se questionner sur l'existence d'un objet disponible pour une satisfaction de contrainte. Ainsi, l'ordonnanceur formule une contrainte et regarde si l'espace des satisfactions n'est pas vide. La faisabilité peut également consister à tester (vérifier) si une contrainte est ou non satisfaite par un objet. En ce sens, l'activité de faisabilité peut ressembler à une activité d'évaluation puisqu'elle s'appuie sur une propriété du but. Mais contrairement à l'évaluation, une faisabilité ne fait pas suite à une ou des actions

FAIS-CTR (<VAR1>, <VAR2>, ..., <VARN>, <ORIGINE>, <FAISABILITE>)

Conception d'emploi du temps : FAIS-CTR (<GROUPE>, <SALLE>, <ENSEIGNANT>, <MODULE>, <PERIODE>, <ORIGINE>, <FAISABILITE>)

Ordonnancement manufacturier : FAIS-CTR (<COMMANDE>, <MACHINE>, <PERIODE>, <ORIGINE>, <FAISABILITE>)

Exemple : « *Alors j'ai un DS de 2H45 à placer pour tous les groupes. Où est-ce que je peux le mettre ? Bon le lundi c'est pas possible* ». Dans cet exemple, l'ordonnanceur cherche à satisfaire la contrainte prescrite de planifier un DS (sur les réseaux informatiques). Il se questionne sur l'existence d'un objet permettant de satisfaire cette contrainte. Puisque les créneaux du lundi sont pleins, cet objet n'est pas possible, et l'on code une absence de faisabilité.

FAIS-CTR (groupe1-2-3, <SALLE>, <ENSEIGNANT>, ds-informatique, lundi, prescrite, non-faisable)

Exemple : « *Donc une période de maintenance pour le poste de soudure entre la date 1600 et la date 1700... et ben c'est possible* ». Dans cet exemple, la contrainte prescrite liée à la période de maintenance du poste de soudure peut être satisfaite.

FAIS-CTR (<COMMANDE>, soudure, période-maintenance, faisable)

4.4.3.3 Remise en cause de satisfaction de contrainte (RMS-SAT-CTR)

La remise en cause de satisfaction de contrainte est une méta-opération sur l'opération de satisfaction de contrainte, et lui succède immédiatement au cours de l'activité d'ordonnancement (ce qui la distingue de la modification d'objet – section 4.4.4.1). Cette opération est apparue dans la conception d'emploi du temps.

RMS-SAT-CTR (<SANS-ARGUMENT>)

Exemple : « *Finalement, non je ne le mets pas là ce TD* ». Après avoir satisfait une ou des contraintes (un TD est placé sur l'emploi du temps), l'ordonnanceur décide de remettre en cause cette satisfaction par un retour en arrière (l'autre possibilité étant de supprimer l'objet de l'emploi du temps).

RMS-SAT-CTR (<SANS-ARGUMENT>)

4.4.4 OPERATIONS A L'INTERIEUR DE L'ESPACE DES OBJETS

Ces opérations impliquent des objets en données et des objets en résultats. Contrairement aux opérations sur les contraintes, les opérations sur les objets peuvent être vus sur l'emploi du temps ou le diagramme de *Gantt* et ne sont pas liés à des verbalisations sur des contraintes.

4.4.4.1 Modification d'objet (M-OBJ)

La modification d'objet consiste à modifier au moins une des valeurs de variable d'un objet.

Dans la conception d'emploi du temps, plusieurs valeurs de variable pouvaient être modifiées (généralement les variables groupe, période, et salle). Dans l'ordonnancement manufacturier, seule la variable "période" pouvait être modifiée. Cette modification se manifestait par des déplacements d'objet (par ex., le déplacement d'une opération d'un ordre de fabrication). Contrairement à l'opération de satisfaction de contrainte qui était codée sur la base du même comportement, la modification d'objet n'est pas le résultat d'une gestion de contrainte antérieure.

M-OBJ (<VAR1>, <VAR2>, ..., <VARN>)

Exemple : « *Je vais inverser les salles de TD des groupes 1 et 2* ». Le participant verbalise son intention de modifier la valeur de la variable salle pour deux objets, sans l'expression d'une gestion de contraintes. Le contexte montre qu'il réalise ensuite l'action. On code donc deux opérations de modification d'objet au niveau de la variable salle.

M-OBJ (salle)

Exemple : « *L'OF3 je vais essayer de le mettre après l'OF6* ». Le participant verbalise son intention de déplacer un ordre de fabrication (modification de la période), puis réalise l'action.

M-OBJ (période)

4.4.4.2 Particularisation d'objet (P-OBJ)

La particularisation d'objet consiste à ajouter sur l'ordonnancement au moins une valeur de variable pour un objet. L'objet devient alors moins abstrait et plus spécifié. Cette opération qui a uniquement été codée dans la conception d'emploi du temps, peut être ou non accompagnée par une verbalisation (verbalisation qui accompagne l'action).

P-OBJ (<VAR1>, <VAR2>, ..., <VARN>)

Exemple : par son comportement, le participant renseigne la valeur de la variable *salle* pour un objet dont le *groupe*, la *période* et le *module* étaient déjà renseignés. Cette particularisation d'objet est faite sans que l'ordonnanceur n'exprime une activité de gestion de contraintes.

P-OBJ (salle)

4.4.5 OPERATIONS DE TRANSITION DE L'ESPACE DES OBJETS VERS L'ESPACE DES CONTRAINTES

Ces opérations impliquent des objets en données et des contraintes en résultats.

4.4.5.1 Formulation de contrainte (F-CTR)

Ce prédicat est le même que celui décrit dans la section 4.4.1.1. La valeur "déduite" de l'argument "origine" permet l'identification de cette transition particulière, qui résulte de l'analyse des objets de l'emploi du temps ou du diagramme de *Gantt* (par ex, les temps libres, les retards).

F-CTR (<VAR1>, <VAR2>, ..., <VARN>, <ORIGINE>)

Conception d'emploi du temps : F-CTR (<GROUPE>, <SALLE>, <ENSEIGNANT>, <MODULE>, <PERIODE>, <ORIGINE>)

Ordonnancement manufacturier : F-CTR (<COMMANDE>, <MACHINE>, <PERIODE>, <ORIGINE>)

Exemple : « *Je vois que le groupe 2 a un temps libre le mercredi matin. Je vais essayer de le remplir* ». A partir de l'examen des objets de l'emploi du temps, le participant remarque un temps libre pour le groupe 2. Cette contrainte déduite des objets met en relation la variable "groupe" (le groupe n°2) avec la variable "période" (mercredi-matin).

F-CTR (groupe2, <SALLE>, <ENSEIGNANT>, <MODULE>, mercredi-matin, déduite-objets)

Exemple : « *C'est vrai qu'il est pas vraiment ordonnancé au mieux quoi ... je vois qu'il y a un retard pour l'OF6 de 470* ». A partir de l'examen des objets du diagramme de *Gantt*, le participant remarque le retard d'une commande. Cette contrainte déduite des objets met en relation la variable "commande" (l'ordre de fabrication n°6) avec la variable "période" (un retard par rapport à la date de livraison).

F-CTR (of6, <MACHINE>, retard, déduite-objets)

4.5 PARTICULARITE DU SCHEME DE CODAGE SELON LA SITUATION ETUDIEE

En fonction de la situation étudiée, le tableau 1 met en évidence la présence ou non des opérations qui composent le schème de codage qui vient d'être décrit.

Prédicat	Conception d'emploi du temps	Ordonnancement manufacturier
Formulation de plan d'action	X	
Formulation de procédure		X
Formulation de but		X
Évaluation de but		X
Violation de contrainte		X
Formulation de contrainte	X	X
Propagation de contraintes	X	X
Précision de contrainte	X	
Relâchement de contrainte	X	
Satisfaction de contrainte	X	X
Faisabilité de satisfaction de contrainte	X	X
Remise en cause de satisfaction de contrainte	X	
Modification d'objet	X	X
Particularisation d'objet	X	

Tableau 1 : Dans les deux situations étudiées (conception d'emploi du temps et ordonnancement manufacturier), des points communs et des différences sont apparues dans l'utilisation de certains prédicats du schème de codage.

Même si les principales opérations de gestion de contraintes (formulation, propagation, satisfaction) sont communes aux deux situations et nous autorisent à penser que ce schème de codage est pertinent pour étudier l'activité d'ordonnancement, il convient d'explicitier pourquoi des différences sont apparues, aussi bien du point de vue des activités stratégiques que celui des activités tactiques.

4.5.1 DIFFERENCES DANS LE CODAGE DES ACTIVITES STRATEGIQUES

Lorsque l'on compare le codage des activités stratégiques dans les deux situations étudiées (tableau 1), il apparaît que seul le prédicat "formulation de plan d'action" est observé en conception d'emploi du temps, alors que quatre autres prédicats ont été utilisés pour le codage de l'activité d'ordonnancement manufacturier.

Dans la situation de conception d'emploi du temps, il n'est pas apparu de procédures spécifiques "formelles" comme c'est le cas dans l'ordonnancement manufacturier (par ex., les procédures SPT, LPT, EDD – cf. Introduction). Les ordonnanceurs formulaient seulement des buts, sans que leur mise en œuvre soit dirigée par une procédure spécifique. Par exemple il s'agissait de buts de prise d'informations (« *Je vais regarder si j'ai une salle de libre* ») ou de buts d'optimisation de l'emploi du temps (« *Je vais chercher à remplir les cases vides de l'emploi du temps* »). Nous n'avons donc pas fait de distinction entre les buts (plans déclaratifs – Hoc, 1987) et les procédures (plans procéduraux – Hoc, 1987), et nous avons adopté un codage plus général en termes de plans d'action. En revanche, dans la situation d'ordonnancement manufacturier, nous avons distingué des buts et des procédures à l'intérieur des plans d'action. Par exemple, la formulation d'un but consistait à formuler un

plan déclaratif du type "atteindre le plus petit *Makespan*²³ possible", ou encore "obtenir le moins d'attente possible entre les opérations", etc.

Enfin, la violation de contrainte n'a pas été observée dans la conception d'emploi du temps, car il était possible de résoudre le problème sans éliminer de contraintes prescrites. En revanche dans l'ordonnancement manufacturier, l'introduction de nouvelles contraintes (contraintes de maintenance des machines) au cours de la phase de réordonnancement a posé quelques difficultés chez certains, qui ont été résolues en violant ces contraintes.

4.5.2 DIFFERENCES DANS LE CODAGE DES ACTIVITES TACTIQUES

Lorsque l'on compare le codage des activités tactiques (tableau 1), les différences qui apparaissent sont liées à l'absence de plusieurs prédicats dans la situation d'ordonnancement manufacturier alors qu'ils ont été utilisés dans la situation de conception d'emploi du temps :

- *Précision de contrainte* : ce prédicat implique qu'une contrainte ait été formulée antérieurement. Pour pouvoir coder une précision de contrainte, il était en quelque sorte nécessaire de "pister la vie" de chaque contrainte (de sa formulation à sa satisfaction). Or, que ce soit dans la conception d'emploi du temps ou dans l'ordonnancement manufacturier, le nombre de contraintes traitées était suffisamment important pour que cette démarche soit rapidement fastidieuse à mettre en œuvre. De plus, nous avons réalisé ce type de codage dans la conception d'emploi du temps en adoptant une perspective plus exploratoire. Puisqu'aucune exploitation particulière n'a été faite de cette analyse, nous l'avons abandonnée au moment du codage des protocoles d'ordonnancement manufacturier. Dans cette situation, les précisions de contrainte qui auraient pu être codées, sont donc incluses dans certaines opérations de formulation de contrainte.
- *Relâchement de contrainte* : dans la littérature sur l'ordonnancement manufacturier, cette opération est largement décrite (par ex., Higgins, 1999). Il semble donc surprenant qu'elle ne soit pas apparue dans les protocoles des individus ayant réalisé la tâche d'ordonnancement manufacturier. A la place, nous avons observé des opérations de violation de contraintes, notamment dans la phase de réordonnancement (chapitre 7). Cette absence d'opérations de relâchement de contraintes s'explique peut être par le cas d'école proposé dans lequel les opportunités de conflits entre contraintes était peut-être moins nombreuses par rapport aux opportunités présentes dans les situations réelles.
- *Remise en cause de satisfaction de contrainte* : dans la conception d'emploi du temps, nous avons codé cette activité dès lors qu'elle succédait immédiatement à une satisfaction de contrainte, et qu'une verbalisation accompagnait un comportement dans le sens observé (par exemple un retour en arrière). Dans l'ordonnancement manufacturier, de tels comportements de retour en arrière ont été observés de nombreuses fois. Puisque dans la plupart des cas aucune verbalisation n'accompagnait ces comportements, il devenait risqué de les interpréter en termes de remise en cause

²³ Durée de totale de mise en œuvre de l'ordonnancement.

de satisfaction de contrainte. Il a donc été plus prudent de se contenter d'un codage de chaque action en termes de modification d'objet.

- *Particularisation d'objet* : ce prédicat a été seulement codé dans la conception d'emploi du temps en raison de contraintes liées à l'utilisation de l'outil de représentation de la solution. Dans la conception d'emploi du temps nous avons utilisé Excel®, car c'est un logiciel bien connu ne nécessitant pas, dans le cadre de notre étude, de formation particulière des participants. Dans Excel®, chaque cellule représentait un objet pouvant être défini par un quintuplet de valeurs prises parmi les variables "groupe", "salle", "enseignant", "module", "période". Lorsque les cinq variables étaient renseignées, il s'agissait d'un objet concret (entièrement défini). Mais un objet pouvait être défini au minimum par trois valeurs de variables : "groupe" et "période" (qui définissent l'abscisse et l'ordonnée de l'emploi du temps) et "salle" ou "enseignant" ou "module". Un triplet de valeurs constituait alors un objet abstrait (ou partiellement défini), qui était ensuite particularisé jusqu'à ce qu'il devienne un objet concret. Dans la situation d'ordonnancement manufacturier, nous avons utilisé l'outil Legin® (Feldman & Pinedo, 2001), car c'est un logiciel dont l'utilisation était rapidement accessible pour les participants de notre étude. Dans Legin®, la représentation de l'ordonnancement prenait la forme d'un diagramme de *Gantt*. Dans cette représentation, tous les objets étaient nécessairement concrets, et définis par un triplet de valeurs prises parmi les variables "commande", "machine", "période". Sur ces objets, il était impossible de modifier les valeurs des variables "commande" et "machine". Toutefois, lorsqu'un ordre de fabrication était déplacé manuellement, la variable "période" était alors modifiée. Ces actions ont été codées comme des modifications d'objet.

5 METHODES STATISTIQUES

5.1 L'INFERENCE FIDUCIO-BAYESIENNE

Dans les chapitres expérimentaux (chapitres 6, 7 et 8), nous avons utilisé la méthode de l'inférence fiducio-bayésienne (Hoc, 1983 ; Rouanet, 1996) pour l'analyse statistique des résultats. L'intérêt de cette méthode, complémentaire des tests classiques de signification de l'hypothèse nulle, est de dépasser l'idée fautive selon laquelle un résultat non significatif est à interpréter en termes d'effet négligeable et un résultat significatif en termes d'effet important. Ainsi, l'inférence fiducio-bayésienne cherche à émettre une conclusion inférentielle sur la taille de l'effet dans la population (δ), à partir de l'effet observé (d), en tenant compte de la taille de l'échantillon et de la variabilité des données recueillies. D'un point de vue théorique, cette méthode s'appuie sur une réinterprétation bayésienne de l'intervalle de confiance. Elle considère donc, avec une garantie acceptable, plusieurs valeurs pour le paramètre de la population (δ) : $\delta > a$, " a " considérée comme une valeur notable (ou grande) ou $|\delta| < \varepsilon$, " ε " considérée comme une valeur négligeable (ou petite). Dans les résultats de nos études, nous avons cherché à conclure avec une garantie (probabilité) de .90. Enfin, les analyses fiducio-bayésiennes ont été réalisées grâce au logiciel LePAC (Lecoutre & Poitevineau, 2005).

5.2 L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

Dans le chapitre 7, nous avons utilisé l'analyse en composantes principales (ACP), une variante de la méthode d'analyse factorielle (Jambu, 1991). L'ACP est une analyse statistique

multivariée permettant de décrire une structure de données en termes de corrélations. Dans notre étude, les données qui ont été examinées par l'ACP sont les opérations cognitives élémentaires (celles du schème de codage) mises en œuvre dans l'activité d'ordonnancement. Le principe de base de l'ACP consiste à remplacer une famille de variables par de nouvelles variables de variance maximale, non corrélées deux à deux et qui sont des combinaisons linéaires des variables d'origine. Ces nouvelles variables, appelées *composantes principales*, définissent des plans factoriels orthogonaux qui servent de base à une représentation graphique plane des variables initiales. L'interprétation des résultats se restreint généralement aux deux premiers plans factoriels (les deux premières composantes principales), sous réserve que ceux-ci expliquent la majeure partie de la variance du nuage des variables initiales. Enfin, l'ACP a été mise en œuvre avec le logiciel Statistica® (version 6).

6 BIBLIOGRAPHIE

- Amalberti, R. (1991). Introduction. In R. Amalberti, M. De Montmollin, & J. Theureau (Eds.), *Modèles en Analyse du Travail* (pp.17-23). Bruxelles : Mardaga.
- Amalberti, R., & Hoc, J.M. (1998). Analyse des activités cognitives en situation dynamique : Pour quels buts ? Comment ? *Le Travail Humain*, 61, 209-234.
- Beishon, R.J. (1974). An analysis and simulation of an operator's behavior in controlling continuous baking ovens. In E. Edwards & F.P. Lees (Eds.), *The human operator in process control* (pp. 79-90). London: Taylor & Francis.
- Brainbridge, L. (1974). Analysis of verbal protocols from a process control task. In E., Edwards & F.P., Lees (Eds.), *The human operator in process control* (pp.146-158). London: Taylor & Francis.
- Baddeley, A.D. (1986). *Working memory*. Oxford: Oxford University Press.
- Bonnardel, N. (1992). *Le rôle de l'évaluation dans les activités de conception*. Thèse, Université de Provence, Aix-en-Provence, France.
- Caverni, J.P. (1988). Psychologie de l'expertise : éléments d'introduction. *Psychologie Française*, 33, 114-125.
- Cegarra, J., & van Wezel, W. (2011). A comparison of task analysis methods for planning and scheduling. In J.C. Fransoo, T. Wäfler, & J. Wilson (Eds.), *Behavioral Operations in Planning and Scheduling* (pp. 323-338). Berlin: Springer-Verlag.
- Cellier, J.M., Eyrolle, H., & Mariné, C. (1997). Expertise in dynamic environnements. *Ergonomics*, 40, 28-50.
- Crawford, S., MacCarthy, B.L., Wilson, J.R., & Vernon, C. (1999). Investigating the work of industrial schedulers through field study. *Cognition, Technology & Work*, 1, 63-77.
- Chevalier, A., & Cegarra, J. (2008). Une approche psychologique de la notion de contrainte en résolution de problèmes. *Le Travail Humain*, 71, 173-198.
- Darses, F. (1991). The constraint satisfaction approach to design: A psychological investigation. *Acta Psychologica*, 78, 307-325.
- Darses, F. (1994). *Gestion de contraintes dans la résolution de problèmes de conception*. Thèse, Université de Paris 8, France.

- Duncker, K. (1958). On problem-solving. *Psychological Monographs*, 5, n°270.
- Eastman, C. (1970). On the analysis of intuitive design processes. In G. Moore (Ed.), *Emerging methods in environmental design and planning* (Proceedings of First International Conference of the design methods group). (pp. 21-37). Cambridge, MA: MIT Press.
- Ericsson, K.A., & Simon, H.A. (1980). Verbal Reports as Data. *Psychological Review*, 87, 215-251.
- Ericsson, K.A., & Simon, H.A. (1993). Protocol analysis: Verbal reports as data (revised edition. Original version: 1984). Cambridge, MA: Bradfordbooks/MIT Press.
- Feldman, A., & Pinedo, M. (2001). Lekin (version 2.4) computer software. Retrieved from: <http://www.stern.nyu.edu/om/software/lekin/>
- Fox, M.S. (1990). Constraint-guided scheduling - a short history of research at CMU. *Computers in Industry*, 14, 79-88.
- Gacias, B. (2010). *Une approche interdisciplinaire pour l'ordonnancement des transports*. Thèse, Université Toulouse III, France.
- Gero, J., & McNeil, T. (1998). An approach to the analysis of design protocols. *Design Studies*, 19, 1-61.
- Guerin, C., Hoc, J.M., & Mebarki, N. (2011). *The nature of expertise in industrial scheduling: strategic and tactical processes, constraint and object management*. (Manuscript submitted for publication).
- Guindon, R. (1990). Knowledge exploited by experts during software system design. *International Journal of Man-Machine Studies*, 33, 279-304.
- Higgins, P.G. (1999). *Job shop scheduling : hybrid intelligent human-computer paradigm*. Ph.D. Thesis, University of Melbourne, Australia.
- Higgins, P.G. (2001). Architecture and interface aspects of scheduling decision support. In B.L., MacCarthy, J.R. & Wilson (Eds.), *Human performance in planning and scheduling* (pp. 245-279). London : Taylor & Francis.
- Hoc, J.M. (1983). *L'analyse planifiée des données en psychologie*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Hoc, J.M. (1987). *Psychologie cognitive de la planification*. Grenoble: Presses Universitaires de Grenoble.
- Hoc, J.M., & Amalberti, R. (1999). Analyse des activités cognitives en situation dynamique : d'un cadre théorique à une méthode. *Le Travail Humain*, 62, 97-129.
- Hoc, J.M., & Leplat, J. (1983). Evaluation of different modalities of verbalization in a sorting task. *International Journal of Man-Machine Studies*, 18, 283-306.
- Hoc, J.M., Guerin, C., & Mebarki, N. (sous presse). The nature of expertise in scheduling: the case of timetabling. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*.

- Hooker, J.N. (2006). Operations research methods in constraint programming. In F. Rossi, P. van Beck, & T. Walsh (Eds.), *Handbook of constraint programming* (pp. 527-570). Amsterdam: Elsevier.
- Jambu, M. (1991). *Exploratory and Multivariate Data Analysis*. Orlando, FL: Academic Press.
- Janssen, P., Jégou, P., Nougier, B., & Vilarem, M.-C. (1989). *Problèmes de conception : une approche basée sur la satisfaction de contraintes*. Communication présentée aux « 9emes Journées internationales : Les systèmes experts et leurs applications ». Avignon, France, Mai-Juin.
- Kolodner, J.L., & Wills, L.M. (1996). Powers of observation in creative design. *Design Studies*, 17, 385-416.
- Lecoutre, B., & Poitevineau, J. (2005). Le logiciel « LePAC » [PAC Software : English version available]. *La Revue de Modulad*, 33 (whole volume). Retrieved [22.12.10] from: <http://www.univ-rouen.fr/LMRS/Persopage/Lecoutre/PAC.htm>
- Leplat, J., & Hoc, J.M. (1981). Subsequent verbalization in the study of cognitive processes. *Ergonomics*, 24, 743-755.
- Leplat, J., & Hoc, J.M. (1983). Tâche et activité dans l'analyse psychologique des situations. *Cahiers de Psychologie Cognitive*, 3, 49-63.
- Le Ny, J.F. (1985). Comment (se) représenter les représentations. *Psychologie française*, 30, 231-238.
- Meseguer, P. (1989). Constraint satisfaction problem: an overview. *AICOM*, 2, 3-17.
- Nakamura, N., & Salvendy, G. (1988). An experimental study of human decision-making in computer-based scheduling of flexible manufacturing system. *International Journal of Production Research*, 26, 567-583.
- Newell, A., & Simon, H.A. (1972). *Human Problem Solving*. Englewoods Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Nisbett, R.E., & Wilson, TD. (1977). Telling more than we can know: verbal reports on mental processes. *Psychological Review*, 84, 231-259.
- Rasmussen, J., & Jensen, A. (1974). Mental procedures in real-life tasks: a case study of electronic troubleshooting. *Ergonomics*, 17, 293-307.
- Rasmussen, J. (1985). The role of hierarchical knowledge representation in decision-making and system management. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-15, 234-243.
- Rasmussen, J. (1997). Merging paradigms: decision making, management, and cognitive control. In R. Flin, E. Salas, M.E. Strub, & L. Marting (Eds). *Decision Making under Stress: Emerging Paradigms and Applications* (pp. 67-85). England: Ashgate.
- Richard, J.F. (1999). Comportements, buts et représentations. *Psychologie Française*, 44, 75-90.
- Richard, J.F., Pointreud, S., & Tijus, C. (1993). Problem-solving restructuration: elimination of implicit constraints. *Cognitive Science*, 17, 497-529.

- Rouanet, H. (1996). Bayesian methods for assessing importance of effects. *Psychological Bulletin*, 119, 149-158.
- Sanderson, P., Scott, J., Johnson, T., Mainzer, J., Watanabe, L., & James, J. (1994). MacSHAPA and the enterprise of exploratory sequential data analysis (ESDA). *International Journal of Human-Computer Studies*, 41, 633-681.
- Shiffrin, R., & Schneider, W. (1977). Controlled and automatic human information processing: perceptual learning, automatic attending and a general theory. *Psychological Review*, 84, 127-190.
- Simon, H.A., & Lea, G. (1974). Problem solving and rule induction: a unified view. In L.W. Gregg (Ed.), *Knowledge and cognition* (pp. 105-128). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Smith, H.T., & Crabtree, R.G. (1975). Interactive planning: a study of computer aiding in the execution of a simulated scheduling task. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7, 213-231.
- Smith, E.R., & Miller, F.D. (1978). Limits on perception of cognitive processes: a reply to Nisbett and Wilson. *Psychological Review*, 85, 355-362.
- Statistica (version 6) computer software. Retrieved from: <http://www.statsoft.com/french/welcome.html>
- Stefik, M. (1981a). Planning with constraints (MOLGEN: Part1). *Artificial Intelligence*, 16, 111-140.
- Tabe, T., & Salvendy, G. (1988). Toward a hybrid intelligent system for scheduling and rescheduling of FMS. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 1, 154-164.
- Tabe, T., Yamamuro, S., & Salvendy, G. (1990). Knowledge elicitation in scheduling FMS: towards a hybrid intelligent system. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 5, 17-27.
- Theureau, J. (1992). *Le cours d'action : analyse sémiologique. Essai d'une anthropologie cognitive située*. Berne : Peter Lang.
- Ullman, D., Dietterich, T., & Stauffer, L. (1988). A model of the mechanical design process based on empirical data. *AI EDAM*, 2, 33-52.
- Usher, J.M., & Kaber, D.B. (2000). Establishing information requirements for supervisory controllers in a flexible manufacturing system using GTA. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 10, 431-452.
- van Wezel, W., Jorna, R.J., & Mietus, D.M. (1996). Scheduling in a generic perspective: knowledge-based decision support by domain analysis. *International Journal of Expert Systems: research and applications*, 3, 357-381.
- Wiers, V.C.S. (1997a). *Human-computer interaction in production scheduling: analysis and design of decision support systems for production scheduling tasks*. Doctoral dissertation, Technische Universiteit Eindhoven, The Netherlands.

CHAPITRE 6 : LA NATURE DE L'EXPERTISE EN ORDONNANCEMENT : LE CAS DE LA CONCEPTION D'EMPLOI DU TEMPS

1	RESUME.....	101
1.1	INTRODUCTION.....	101
1.2	OBJECTIFS ET QUESTIONS DE RECHERCHE	101
1.3	METHODE UTILISEE	102
1.4	PRINCIPAUX RESULTATS.....	102
2	ABSTRACT	104
3	INTRODUCTION	104
4	THEORETICAL FRAMEWORK.....	106
4.1	SCHEDULING AS DESIGN PROBLEM SOLVING.....	106
4.1.1	<i>SCHEDULING AND TIMETABLING.....</i>	<i>106</i>
4.1.2	<i>CONSTRAINT AND OBJECT.....</i>	<i>107</i>
4.2	SCHEDULING EXPERTISE.....	108
5	METHOD.....	109
5.1	PARTICIPANTS	109
5.2	EXPERIMENTAL TASK.....	109
5.3	DATA COLLECTION AND CODING METHOD	110
5.4	CODING SCHEME	111
5.4.1	<i>TRANSITION OPERATIONS FROM THE SPECIFICATIONS OR DESIGNER'S PREFERENCE TO THE CONSTRAINTS SPACE.....</i>	<i>112</i>
5.4.2	<i>OPERATIONS WITHIN THE CONSTRAINTS SPACE</i>	<i>113</i>
5.4.3	<i>TRANSITION OPERATIONS FROM THE CONSTRAINTS SPACE TO THE OBJECTS SPACE</i>	<i>113</i>
5.4.4	<i>OPERATIONS WITHIN THE OBJECTS SPACE</i>	<i>114</i>
5.4.5	<i>TRANSITION OPERATION FROM THE OBJECTS SPACE TO THE CONSTRAINTS SPACE.....</i>	<i>114</i>
5.4.6	<i>ACTION PLAN FORMULATION</i>	<i>114</i>
6	RESULTS.....	114
6.1	DESCRIPTIVE ANALYSIS	114
6.1.1	<i>GLOBAL STRATEGY.....</i>	<i>114</i>
6.1.2	<i>PERFORMANCE.....</i>	<i>115</i>
6.2	OPERATIONS IMPLYING THE CONSTRAINTS SPACE VERSUS OPERATIONS WITHIN THE OBJECTS SPACE	116
6.3	TYPES OF OBJECTS AND ACTION PLANS.....	116
7	DISCUSSION	116
8	CONCLUSION.....	118
9	APPENDIX: ILLUSTRATIONS OF PREDICATES	120
10	ACKNOWLEDGEMENTS.....	121
11	REFERENCES.....	121

Ce chapitre expérimental a fait l'objet d'un article actuellement sous presse dans la revue *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*. L'article a donc été intégralement inséré dans ce chapitre. Un résumé en français rappelle les objectifs et questions de recherche, la méthode utilisée, et les principaux résultats.

1 RESUME

1.1 INTRODUCTION

Cette recherche est une contribution à l'étude des stratégies humaines d'ordonnancement. Dans la littérature, la plupart des travaux qui ont cherché à décrire ces stratégies ont adopté le point de vue des procédures (heuristiques, règles) mises en œuvre par les ordonnanceurs. En partant du constat que l'activité d'ordonnancement implique la gestion de contraintes, nous avons adopté le point de vue complémentaire des représentations manipulées par les ordonnanceurs.

1.2 OBJECTIFS ET QUESTIONS DE RECHERCHE

Pour mieux comprendre la nature de l'expertise en ordonnancement, nous avons choisi d'examiner un cas particulier – la conception d'un emploi du temps universitaire par des experts et des novices – pour lequel la complexité est gérable et l'accès aux experts est relativement facile. Pour décrire l'activité d'ordonnancement en termes de gestion de contraintes, nous avons emprunté aux travaux sur la résolution de problème de conception une définition de la contrainte. Pour Stefik (1981a), une contrainte est une relation entre variables permettant de décrire partiellement un objet. En prolongeant cette proposition, nous avons adopté une définition permettant de distinguer en un sens strict la contrainte de l'objet : *les contraintes sont des relations entre variables qui ne peuvent être représentées dans la solution (l'emploi du temps), alors que les objets sont des satisfactions de contraintes qui peuvent y être représentées*. Cette distinction nous a permis de proposer que l'activité d'ordonnancement est notamment organisée autour de deux espaces problèmes duaux : l'espace des contraintes et l'espace des objets. Par ailleurs, les contraintes peuvent s'exprimer dans différents Systèmes de Représentation et de Traitement (SRTs – Hoc, 1987), alors que les objets rendent visible des satisfactions de contraintes dans un SRT externe unique. Dans la conception d'emploi du temps, l'ordonnanceur doit donc traduire les contraintes du problème dans les termes de la solution au problème : un emploi du temps.

Dans cette situation expérimentale, nous avons examiné plusieurs questions de recherche :

- Est-ce qu'une approche en termes de gestion de contraintes et d'objets est pertinente pour décrire de manière exhaustive la conception d'emploi du temps ?
- Est-ce que l'activité de gestion de contraintes est importante dans ce cas particulier d'ordonnancement ?
- Est-ce que, par rapport aux novices, les experts en ordonnancement adoptent un contrôle cognitif interne (à partir des contraintes) ou un contrôle cognitif externe (à partir des objets du SRT externe) ? En effet, bien que l'expertise soit caractérisée par un contrôle de l'activité sur la base de représentations internes, les experts sont aussi capables d'étendre leur cognition et de guider leurs processus cognitifs en définissant dans l'environnement des signaux externes de guidage.

- Est-ce que les experts manifestent des capacités d'abstraction en formulant plus de plans d'action que les novices ?

1.3 METHODE UTILISEE

Dans cette étude, nous avons demandé à trois experts (enseignants d'IUT chargés de concevoir des emplois du temps depuis environ dix ans) et à trois novices (étudiants sans expérience spécifique dans le domaine) de concevoir un emploi du temps universitaire d'une semaine pour trois groupes d'étudiants. Les participants à l'expérience devaient prendre en considération un ensemble de contraintes liées par exemple à la disponibilité d'enseignants ou de salles de cours.

Pour accéder à l'activité mentale des ordonnanceurs, nous avons utilisé une consigne de verbalisation simultanée à la réalisation de la tâche (*thinking aloud*). A partir de travaux issus de la littérature et en fonction des spécificités de la situation étudiée, nous avons construit un schème de codage. Ce schème était constitué d'un ensemble d'opérations liées à la gestion des contraintes et des objets, et d'une opération plus abstraite de planification (les plans d'action). Enfin, le schème de codage nous a permis de coder les protocoles individuels des participants (actions et verbalisations) en utilisant le logiciel MACSHAPA (Sanderson et al., 1994).

1.4 PRINCIPAUX RESULTATS

Avant de rappeler plus précisément les résultats de cette expérience, il est important de noter que la description de l'activité de conception d'emploi du temps à partir de notre schème de codage s'est révélée pertinente car le schème nous a permis de coder l'ensemble des verbalisations produites par les participants.

Par ailleurs, malgré des différences individuelles observées dans les stratégies entre experts et novices, nous n'avons pu conclure à des différences de performance puisque les différences entre experts et novices étaient très faibles. Ce résultat est peut-être lié au choix d'une tâche simple qui n'a posé aucun problème aux participants pour aboutir à une solution acceptable en un temps raisonnable.

L'analyse des protocoles nous a permis d'observer les résultats suivants :

- Quel que soit le niveau d'expertise, la présence de composants de planification (plans d'actions) est bien moins importante que les activités de gestion de contraintes et d'objets. La conception d'emploi du temps semble être une situation d'ordonnancement dans laquelle ces composants sont moins présents qu'ils ne le sont dans le contexte manufacturier. Dans ce contexte, des procédures bien connues ont été identifiées (par ex., SPT, EDD), et permettent probablement aux ordonnanceurs de mettre en œuvre des plans d'action guidés par ces procédures.
- Quel que soit le niveau d'expertise, la gestion des contraintes est proportionnellement plus observée que la gestion des objets dans le SRT externe (l'emploi du temps). On peut alors se demander si le choix du SRT externe joue un rôle dans cette répartition.
- Les experts réalisent proportionnellement moins d'opérations de gestion de contraintes que les novices. En s'appuyant probablement sur des heuristiques construites par

l'expérience (Sanderson, 1989, 1991), les experts choisissent des objets sur la base de contraintes évidentes sur l'emploi du temps. A l'opposé, les novices semblent manipuler plus de contraintes, en réalisant notamment plus d'opérations de propagation (combinaison de contraintes). Avant de satisfaire des contraintes en spécifiant un objet sur l'emploi du temps, les débutants combinent plus de contraintes entre elles que ne le font les experts. Par ailleurs, l'analyse des transitions entre opérations a montré que les experts basculent plus directement que les novices des spécifications du cahier des charges (formulation de contraintes prescrites) à l'espace des objets.

- Les experts utilisent plus que les novices les représentations externes (les objets) comme support à leur activité car ils réalisent plus d'opérations à l'intérieur de l'espace des objets (particularisation et modification d'objets). Les experts ont tendance à gérer les contraintes du problème à partir des objets représentés sur l'interface plutôt qu'à partir de structures mentales abstraites. Ce résultat valide l'hypothèse selon laquelle les experts sont capables de déporter leur cognition en externalisant leurs représentations mentales.
- Les experts utilisent une stratégie de moindre compromission. Ils satisfont plus de contraintes avec des objets partiellement définis (objets abstraits) et reportent la spécification complète des objets (en particularisant ensuite ces objets). A l'opposé, les novices gèrent "mentalement" plus de contraintes avant de définir entièrement des objets (objets concrets). Ce comportement des novices reste à expliquer. Une hypothèse pourrait être que les novices ont peur de se compromettre trop tôt dans la spécification des objets en préférant d'abord traiter les interactions entre contraintes. Puisque le traitement des contraintes reste une activité coûteuse, le fait de se compromettre trop tôt sur des résultats intermédiaires (objets abstraits) pourrait être une crainte des novices en cas où ils devraient remettre en question ces résultats intermédiaires, et ne plus pouvoir gérer la situation.
- Les experts formulent proportionnellement plus de plans d'action que les novices. Ce comportement est lié aux capacités d'abstraction des experts par rapport aux novices, qui disposent d'un répertoire de plans.

Nous fournissons maintenant l'intégralité de l'article en anglais, actuellement sous presse dans la revue *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*.

THE NATURE OF EXPERTISE IN SCHEDULING: THE CASE OF TIMETABLING

Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries

Hoc, J.M., Guerin, C., & Mebarki, N.

2 ABSTRACT

This study aims to gain greater insight into scheduling expertise by comparing the work of experts and novices when designing a university timetable. We assumed that the scheduling activity would take place within two dual spaces: the constraints space (CS) and the objects space (OS). Constraints are defined in the strictest sense as relations between variables that cannot be represented in the solution (timetable), whereas objects are constraint satisfactions that can be thus represented. The study shows that experts were more likely than novices to use external representations as activity support. They satisfied many constraints with partially defined objects. On the contrary, novices devoted a long time to managing constraints in their heads before defining only fully specified objects (concrete objects). The objects space could be a suitable activity support for experts. Novices, on the other hand, could benefit from support in managing constraints and translating constraints into objects.

Keywords: Expertise; Scheduling; Timetabling; Constraint management

3 INTRODUCTION

Scheduling is imperative for companies, because a poor schedule can considerably reduce competitiveness by increasing manufacturing costs. However, few people are actually involved in carrying out this activity, and the ergonomic stakes are weakly perceived, in spite of the potentially serious ergonomic (and economic) consequences of a poor schedule. On the other hand, operations research has always been very active with regard to these issues, revealing itself more as a software supplier aimed at automating the scheduling process than as a designer of human operator support. Paradoxically, in practice, human operators are often the main performers of scheduling tasks.

Scheduling is a complex activity. Not only does it tackle NP (non-deterministic polynomial-time) hard problems, but it also leads to combinatorial explosion and occurs in various domains (including manufacturing, management of staff activity, truck route planning, and timetabling). Although several observational studies have been devoted to identifying scheduling expertise, mainly from a procedural viewpoint, no controlled comparisons between experts and novices are available. Thus, this study has selected a particular area of scheduling — namely, timetabling — where complexity is manageable and access to experts is quite easy. To complement previous studies, we adopted the viewpoint of representation — in this case, the nature of the representations processed when timetabling — rather than one of procedure. In particular, we tried to borrow the notion of constraint management from the literature on design problem solving.

Various definitions of scheduling are available in the literature (e.g., Crawford, MacCarthy, Wilson, & Vernon, 1999; Hoc, Mebarki, & Cegarra, 2004; Jorna, 2006; Kiewiet, Jorna, & van

Wezel, 2005; van Wezel, Cegarra, & Hoc, 2011). Although each one stresses specific aspects of scheduling, all of them agree that scheduling consists in allocating resources to tasks and satisfying constraints, particularly temporal constraints. Some definitions add the notion of objective, which can also be considered as a constraint. The schedule must be expressed in an external representation system with a particular format, whereas constraints can be expressed in various formats within the specifications. Thus, scheduling can be considered as a particular case of design problem solving, which “at some very abstract level, is the process of transforming one set of representations (the design brief) into another set of representations (the contract document)” (Goel, 1995, p. 128). In fact, the first “set of representations” is heterogeneous and corresponds to the constraints belonging to the design brief. To identify homogeneous sets of representations within the context of problem solving, particularly within computer program design, Hoc (1988) introduced the notion of representation and processing system (RPS). In the case of timetabling, constraints can come from the teacher’s viewpoint (e.g., availability, work conditions), from the student’s point of view (e.g., workload, comfort), and from the pedagogical viewpoint (e.g., a lecture must precede a practical work session). Finally, in addition to satisfying all the constraints, the schedule must be represented in a standard and external representation system that cannot represent all the constraints explicitly. Some constraints are visible, while others are hidden. For example, the constraint that “lectures must be performed in an auditorium” is visible because the timetable will systematically show an association between lecture and auditorium. However, the constraint that “Ms. X is not available on Wednesday” will be hidden because Ms. X’s schedule on a day other than Wednesday may satisfy a different constraint.

Obviously, scheduling and timetabling share common properties with other design problem-solving situations, such as complexity (NP hard problems) or multiple acceptable solutions (Visser, 2006).

Because the notion of constraint is central in this domain, we have favored the reference to Stefik’s (1981a) theoretical framework. This author elaborated it within the context of planning an experiment in molecular genetics. He defined a constraint as “a relationship among plan variables: “[...] A constraint is essentially a partial description of an object.” (p.114). Within our context, a constraint may be: “I need a teacher available on Wednesday”. Until a teacher is selected, this constraint is not satisfied by a definite object. Moreover, going beyond Stefik’s definition, we will introduce a distinction between a “constraint” in the strictest sense, as something not represented in the solution, and an “object”, as something visible in the solution and satisfying some constraints.

Sanderson (1989, 1991) was the first to approach the human scheduler activity using problem-solving models, such as those by Rasmussen (1986), from a procedural viewpoint. In this study, we adopt a complementary viewpoint, stressing the representations processed in relation to the human-machine interface problem. Obviously, our experimental approach to expertise will give rise to the same criticisms with regard to ecological validity as those formulated by researchers such as Jackson, Wilson, and MacCarthy (2004) or MacCarthy, Wilson, and Crawford (2001), all of whom have considerable experience in field studies. Our experimental approach should be considered as complementing this kind of study, but with a nonnegligible ecological validity. To identify the nature of expertise in timetabling, we carried out a study to compare three novices (students without any specific experience in

this domain) and three experts (senior lecturers in charge of timetable design in a polytechnic institute). The participants were asked to design a 1-week university timetable on an Excel® spreadsheet, which satisfies pedagogical constraints, as well as the constraints of teachers, students, and room allocation. We collected actions on the interface and simultaneous verbal reports. The method consisted mainly in analyzing individual protocols, with the support of the MacSHAPA software developed by Sanderson et al. (1994), within the perspective of exploratory sequential data analysis.

Expertise, as the property of people with a long accumulation of experience, is a well-documented topic in the psychology of problem solving, covering a wide spectrum of domains (Chi, Glaser, & Farr, 1988). Although expertise has some general features, such as anticipation ability (Cellier, Eyrolle, & Mariné, 1997) or meaningful and large pattern recognition ability (Simon & Barenfeld, 1969), it remains very domain specific. In the present study our aim was to test a hypothesis that often occurs in the expert cognitive control mode of dynamic situation management. In several types of situation, although experts are able to anticipate on the basis of internal models of their environment, they are also able to extend their cognition toward their environment, defining meaningful cues within it that are capable of guiding their cognitive processes (Hoc & Amalberti, 2007). The main reason for this extension, which leads them to adopt an external cognitive control, is the management of mental workload within acceptable limits. Thus, in this study, we expected a wider usage of the timetable RPS — the required and external representational system for the solution — by experts than by beginners. Such a result could be of interest for defining computer interfaces capable of supporting the scheduling activity.

In the next section of this article, we will develop the main theoretical foundations of this experiment by considering scheduling (and timetabling) within the context of design problem solving, examining expertise in scheduling in more detail, and proposing important concepts for describing constraint management and object design in scheduling. Then, we will describe the experimental task, the participants, the data-gathering technique, and the coding scheme. After, we will present the main results of the study. Finally, the implications for the study of expertise and for interface design in terms of operators' assistance will be derived.

4 THEORETICAL FRAMEWORK

4.1 SCHEDULING AS DESIGN PROBLEM SOLVING

4.1.1 SCHEDULING AND TIMETABLING

In manufacturing systems, scheduling consists in allocating job operations to machines and periods of time with the aim of meeting performance criteria, such as maximizing machine usage and minimizing delays. This usually results in the drawing of a Gantt chart with time on abscissa and machines on ordinate (figure 12). Allocation must satisfy a number of constraints, such as duration of operation, due dates for delivering jobs, precedence between operations, and release dates to start the process of a job. It results in the definition of a complete set of triplets of the type (job, operation-machine, period of time), each one being represented as a rectangle in the Gantt chart, which we name "object". Constraints are defined at first in specifications distributed over several documents; only

some of them will be directly represented in the representational system required for the solution. For example, in figure 12, we can see that job 1 can be delivered at time t , but the due date could be $t+1$, a constraint not directly expressed in this particular interface, although it could be represented in another type of interface. On the contrary, operation duration is expressed in the solution as well as in the specifications.

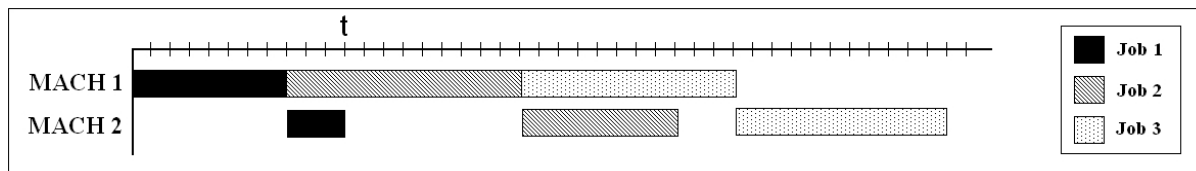


Figure 12: Example of Gantt chart: time in abscissa; machines in ordinate; grey rectangles represent three jobs processed by the two machines.

University timetabling is a particular case of scheduling, similar to industrial scheduling, except that jobs are replaced by groups of students, operations by teaching modules, and machines by teachers. An additional type of resource is the room. An object is thus here a quintuplet (group, room, teacher, module, period). The main difference between timetabling and industrial scheduling relates to temporal constraints. Precedence constraints are weaker in timetabling than in industrial scheduling, in terms of the required sequence of operations. In addition, university timetabling considers that there is less of a difference between groups of students in terms of processing time, due date, and so on than between jobs in industrial scheduling.

4.1.2 CONSTRAINT AND OBJECT

In terms of design problem solving, constraint management is usually identified and modeled (Darses, 1991; Hoc, 1988; Stefik, 1981a; Visser, 2006). According to Stefik (1981a), a constraint is a partial description of an object, and there is no clear-cut distinction between the two entities. However, this distinction forms the basis of design problem solving. As a matter of fact, according to Hoc (1988), a design problem is a task that is represented by the problem solver as the search for a detailed representation of the goal. Moreover, the user of the schedule imposes the representation format, which is related to RPS. The notion of RPS is similar to the notion of "viewpoint" in artificial intelligence. It is based on a (concrete or abstract) device or set of basic rules that enables the generation of a large variety of representations. For example, a particular university timetable is an instance of the general class of timetables. It is composed of a certain number of quintuplets (objects). These satisfy constraints expressed in RPS that are different from the RPS imposed for the solution. We will see that, in the experimental situation, a list of teacher nonavailabilities was included in the specifications. The fact that a particular teacher is not available on Wednesday is a constraint. In the final timetable, all the objects comprising this teacher and a day other than Wednesday satisfy this constraint. However, it is impossible to represent this constraint directly on the timetable. Instead, it is represented in a separate RPS, from the viewpoint of teachers.

Thus, we propose to borrow the notion of constraint from Stefik (1981a), but in the sense of a relationship between variables that is impossible to represent directly in the RPS imposed for the solution. An object, on the other hand, is a constraint represented on the interface. We can differentiate between two sorts of objects:

- A concrete object is a fully specified vector of values. Concrete objects, as a whole, make up the final solution of the design problem. For example (Group 2, Room 1, Mr. Robinson, Math tutorial, Tuesday 8:00-9:15).
- An abstract object is a partially specified vector of values. It is a class of objects because although some variables are not yet fully specified, they are sufficient to be represented in the solution RPS. For example (Group 3, Room?, Teacher?, Chemistry lecture, Wednesday 10:00-12:15). Here, the specification of the group and the period is enough to draw a cell in the timetable, even if more details need to be added later.

Following on from this distinction, we consider that design problem solving and especially timetabling develops within and between two dual problem spaces: a constraints space, mainly fed by specifications, and an objects space, mainly fed by the scheduler's activity of constraint satisfaction (see figure 14 below). This idea of dual space reasoning is traditional to the psychology of problem solving. In particular, it was introduced by Simon and Lea (1974) through the concept identification paradigm. It stresses the importance of shifts in representation format or RPS during problem solving, which is an important feature of design problem solving, and thus in scheduling and timetabling.

Figure 14 is a first approach to our coding scheme, which will be described in section 5.4. The arrows around the two problem spaces represent operations. The origin of the arrow corresponds to the type of entity playing the role of the operation data. For example, the "constraint satisfaction" operation takes one or several constraints as data and produces one or more objects as results, satisfying the constraint(s).

4.2 SCHEDULING EXPERTISE

Expertise as a state reached after long experience in a particular domain is well documented in the general literature in cognitive psychology (Cellier et al., 1997; Chi et al., 1988; Ericsson & Smith, 1991; Farrington-Darby & Wilson, 2006; Hoc & Amalberti, 2007; Hoffman, 1992; Larkin & Reif, 1979). Among the numerous properties of expert behavior, some of them will be relevant to the interpretation of the results of this experiment:

- Experts adopt a global approach to the problem and consider more deep knowledge-related data than novices.
- They have more elaborated metaknowledge, a type of knowledge that relates to their mode of operation.
- They are more able than novices to recognize meaningful patterns and, especially visual patterns in scheduling, as highlighted by Dessouky, Moray, and Kijowski (1995), and by Moray, Dessouky, Kijowski, and Adapathya (1991).
- Although they are able to anticipate and to guide their activity on the basis of internal models (anticipative or internal control, as put forward by Hoc and Amalberti, 2007), experts are also able to alleviate their mental workload by defining external cues in their environment for guidance (reactive or external control). This result is coherent with studies showing that cognition is not only in the head, but also in the environment (Hutchins, 1995; Zhang & Norman, 1994).

Several studies have been specifically devoted to expertise in scheduling, from which we can extract three issues that are relevant to our experiment.

First, our experiment did not cover the multiple facets of expertise in scheduling, such as the ability for constraints relaxation in social negotiation. Instead, we focus on well-documented “cognitive” abilities, such as the adoption of apparently irrational and complex strategies, optimization skills, or flexibility in constraint relaxation (McKay, Buzacott, Charness, & Safayeni, 1992).

Second, we know that high individual variability is often identified among expert schedulers, so that computer support must be developed from a perspective of modularity, supporting generic functions rather than those that constrain the entire strategy (Jorna, 2006; van Wezel & Jorna, 2009).

Our approach complements the latest research in that it stresses the importance of constraint management and object definition. Thus, by focusing on an essential aspect of this type of activity, this study is likely to enrich our knowledge of expertise in scheduling. We will examine the following questions:

- Is it possible for a coding scheme that mainly describes constraint management and object design to exhaustively describe timetabling activity?
- Is there actually a prominence of constraint management in this activity?
- Are experts more likely than novices to process objects on the interface rather than constraints in their heads? (This question is obviously related to the design of computer support for this activity, especially in terms of the interface).
- Are experts more likely to formulate action plans than novices?

5 METHOD

5.1 PARTICIPANTS

The participants were recruited in the University of Nantes (IUT: Polytechnic Institute; Department of Psychology). Three novices were students in production management (2) or in psychology (1). Three experts were teachers at IUT and had been timetabling for about 10 years as a secondary task, each time covering a 12-week temporal horizon. They use an ad hoc piece of software that enables the representation of several viewpoints — rooms, teachers, and students — with a constraint violation detection function (e.g., in case the same teacher is scheduled at the same time in different rooms).

5.2 EXPERIMENTAL TASK

The aim of the task was to schedule a 1-week timetable for three student groups, taking into consideration the different types of teaching module (e.g., lectures, tutorials, and practical work sessions) in relation to the types of available rooms, and the different kinds of constraints (e.g., constraints on rooms or teacher availability). Each participant was given the following apparatus:

- An empty timetable showing days, hours, and the number of student groups. Schedulers had to use Microsoft Excel®. This tool has both benefits and drawbacks. Although novices do not need to take a training course, unfortunately, it can generate frustration among experts who are used to working with a more sophisticated tool. The software only enabled the participants to enter abstract or concrete objects into cells (figure 13).

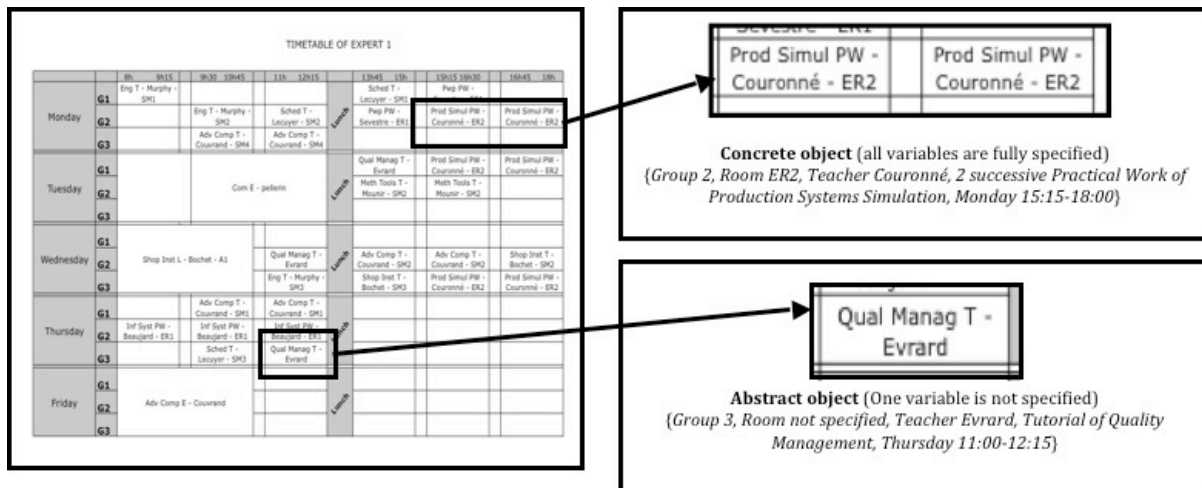


Figure 13: A timetable during the design process. We can observe a concrete object (fully specified) and an abstract object (partly specified).

- An instructions sheet showing succession constraints (e.g., a lecture must be scheduled before a practical work session) and constraints about the allocation of rooms to the type of module (e.g., a lecture is taught in an auditorium).
- Another sheet showing constraints about teachers' availability and competencies (e.g., Mr Beaujard teaches Quality Management and is unavailable on Friday afternoon).
- The timetable for eight rooms that are partly occupied (two auditoriums, two equipped rooms, four small rooms), in order to consider their availability during the task.

When the timetable was completed (design stage), schedulers were invited to make improvements on the basis of their own criteria (optimization stage). Because some participants integrated the optimization stage into the design stage, the two stages were analysed as a whole task, rather than as separate tasks. The design of the experimental task took into account the number of prescribed constraints (e.g., availability of teachers and rooms) for two main reasons. First, timetabling should not take a long time (e.g., no more than an hour and a half for both novices and experts), so that participants do not feel tired or lack motivation. Second, each scheduler's action should not guide him or her too quickly toward the solution or to a dead end.

5.3 DATA COLLECTION AND CODING METHOD

In this study, we have gathered several types of data, including individual verbal reports, obvious actions on the timetable (actions on abstract and concrete objects) and other behaviors (such as the organization of documents). Verbal protocols were collected by means of a "thinking aloud" instruction (Duncker, 1958). We use the formula: "say out loud what you say to yourself while you do the task" (introduced by Hoc & Leplat, 1983, p. 285). During task execution, the experimenter reanimates the scheduler when he or she is silent

for a long time, using a nonspecific instruction, such as: “What are you thinking about now?”; “You are a bit silent”; or “Remember the instruction”. This kind of method is well suited to activities where the symbolic component is a major part (interpretation processes); indeed, Taatgen (1999) has already applied it to scheduling in his study of learning.

In our study, protocol analysis followed a general method introduced by Hoc and Amalberti (2005) and widely used in diverse application domains (e.g., air traffic control, fighter aircraft piloting, dynamic microworld studies). In summary, this method consists in inferring elementary cognitive activities from overt behavior, the context, a general cognitive architecture, and knowledge of the application domain. Furthermore, individual protocol encoding was performed using a predicate-argument structure. On the whole, the protocol collected during task execution is decomposed into elementary units, on the basis of the inferred elementary activities and the context. Contrary to the propositional analysis method, each unit is coded by one or several predicates, in relation to the number of elementary activities underlying the unit. The coding was carried out with the help of MacSHAPA software, which is used for exploratory sequential data analysis (Sanderson et al., 1994). We chose the principle whereby predicates code cognitive activities and arguments specify these activities. For instance, a constraint formulation activity is coded by the CTR-FORM predicate, including seven arguments specifying the constraint number, its origin, and the variables that are in relation within the constraint. Some arguments are common to several predicates. A sample of raw and coded protocol is presented in table 2, and all predicates and arguments (the coding scheme) are detailed in the following section.

Raw Protocol	Coded Protocol
<i>Expression: “The teacher is absent on Wednesday”</i>	CTR-FORM (<NUM>, <ORI>, <GRP>, <ROOM>, <TEACH>, <TEACH-MOD>, <PER>) CTR-FORM (<13>, <prescribed>, <GRP>, <ROOM>, <Murphy>, <TEACH-MOD>, <Wednesday>) <i>Clarification:</i> The expression corresponds to the formulation of a prescribed constraint (number 13) between the teacher variable (Mr. Murphy) and the period variable (Wednesday)

Table 2: Excerpt of a coded protocol. The structure of the predicate (the arguments) is specified in italics before the coding (see section 5.4).

5.4 CODING SCHEME

The following coding scheme is composed of a set of operations or cognitive activities. Some of them were derived from studies in existing literature (e.g., constraint formulation, propagation, satisfaction, and relaxation; all taken from Stefik, 1981a). Others were introduced specifically for dealing with this situation. The scheme enables a set of operations to be coded within the constraints space (CS) and the objects space (OS), and for transitions from one space to the other, or from the specifications (or designer’s preferences) to the constraints space (figure 14). Moreover, we coded and considered action plan formulations in the analysis. The only predicate excluded from the analysis was error detection and correction, but its occurrence was very infrequent.

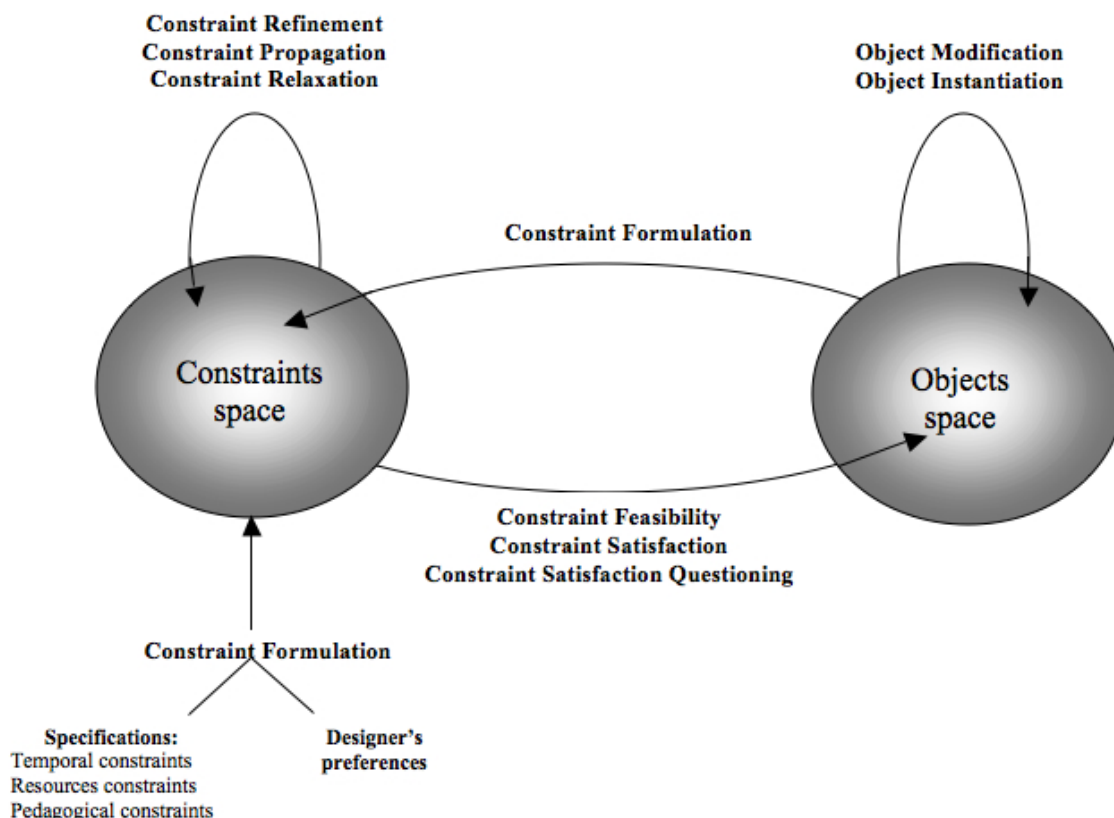


Figure 14: Constraints management model: dual spaces and set of operations.

In general, operations on constraints were more commonly reported than operations on objects, which were more visible. They were coded on the basis of actions on the interface. We did not code verbal reports when they had nothing to do with the main task of timetabling. A special feature of this work is that the coding scheme can be seen both as an a priori model, by highlighting previous knowledge in design problem solving, and as a result of observations gathered on participants.

In the following subsections, we will briefly define each predicate. Within the appendix, argument definitions and examples extracted from the protocols are presented for each predicate; these illustrate the encoding method. For presentation understandability, we will follow figure 14.

5.4.1 TRANSITION OPERATIONS FROM THE SPECIFICATIONS OR DESIGNER'S PREFERENCE TO THE CONSTRAINTS SPACE

The constraints space is fed by a single type of operation (bottom left of figure 14):

- *Constraint Formulation* (CTR-FORM): Introducing a new constraint into the scheduling process, which is not generated from the propagation of existing constraints (Stefik, 1981a; Meseguer, 1989). The predicate CTR-FORM codes a relation between the five variables: group, room, teacher, teaching module, period. Each constraint formulation was qualified from the viewpoint of the origin of the constraint; that is, its mode of introduction into the scheduling process (Eastman, 1970; Janssen, Jégou, Nougier, & Vilarem, 1989; Ullman, Dietterich, & Staufer, 1988): 1) prescribed (specifications that can be identified before scheduling and cannot be ignored, including validity

constraints); 2) deduced (stemming from an analysis of the state of the solution, i.e., from the objects already defined); and 3) introduced (stemming from a scheduler's knowledge or preferences).

5.4.2 OPERATIONS WITHIN THE CONSTRAINTS SPACE

Three types of operation admit constraints as data and produce constraints as results (top left of figure 14):

- *Constraint Refinement* (CTR-REF): Adding a new specification for a constraint that has been previously formulated. The constraint becomes more precise in the refinement hierarchy.
- *Constraint Propagation* (CTR-PRG): Creating a new constraint from already expressed constraints (Meseguer, 1989; Stefik, 1981a). This operation combines a set of previous constraints.
- *Constraint Relaxation* (CTR-RLX): Questioning a constraint and deleting it from the scheduling process. This operation has been used for a long time in an artificial intelligence approach to constraint programming (e.g., Hooker, 2006). It can also be found in the field of design studies (e.g., Kolodner & Wills, 1996) and in cognitive psychology studies (e.g., Richard, 1999). In this study, we have coded only a few constraint relaxations, mainly on the basis of context. These operations often appeared after an operation of conflict detection, where the scheduler questioned a constraint.

5.4.3 TRANSITION OPERATIONS FROM THE CONSTRAINTS SPACE TO THE OBJECTS SPACE

Transition operations are shown at the bottom of figure 14:

- *Constraint Feasibility* (CTR-FEAS): Considering whether an object (abstract or concrete) is available for constraint satisfaction. Constraint feasibility activity ends when the test is finished; that is, when the scheduler has answered the question (either with a verbal report or an action).
- *Constraint Satisfaction* (CTR-SATF): Associating acceptable values with variables to make an efficient combination in the scheduling process (Meseguer, 1989; Stefik, 1981a). The scheduler shifts from CS to OS to find an object (concrete or abstract) capable of satisfying the constraint. We code a satisfaction when an object (abstract or concrete) appears on the timetable, always in relation to a previous constraint formulation. A "type of object" argument was used to evaluate the respective percentages of concrete and abstract objects.
- *Constraint Satisfaction Questioning* (CTR-SATF-QST): Meta-operation on the constraint satisfaction operation and used to change something on the timetable.

5.4.4 OPERATIONS WITHIN THE OBJECTS SPACE

Unlike operations on constraints, operations on objects can be viewed on the timetable and are not linked to verbal reports of constraints (top right of figure 14).

- *Object Modification* (OBJ-MOD): Modifying one or more values of a concrete or abstract object.
- *Object Instantiation* (OBJ-INS): Adding to the timetable at least one value of variable of an object. The object becomes less abstract and more specified.

5.4.5 TRANSITION OPERATION FROM THE OBJECTS SPACE TO THE CONSTRAINTS SPACE

The same predicate CTR-FORM, described in section 5.4.1, is used (top of figure 14). The value “deduced” from the “origin” argument enables the identification of this particular transition, which results from the analysis of objects on the timetable (e.g., free time).

5.4.6 ACTION PLAN FORMULATION

Action plan formulation consists of formulating a component of planning to help the scheduler organize data during timetabling. For example: “Incidentally, I can see there are lots of blanks which I’m going to try and move forward.”

6 RESULTS

First, we will present a descriptive analysis of the protocols without any inferential perspective. This analysis will give an idea of the global strategy observed during this timetabling task and of similarities in performance between the two groups. Inferential analyses of the coded protocols will then be reported. These relate to the distinction between operations implying the constraints space and operations within the objects space, transitions between predicates, and action plan formulation. Finally, any differences between groups with regard to the types of object will be presented. To draw conclusions in terms of population effect size (δ) on the basis of observed effect (d), we performed Bayesian statistical inference (see Lecoutre & Poitevineau, 2005; Rouanet, 1996). This method, complementary to the traditional null hypothesis significance testing, enables us to determine the probability of a conclusion in terms of effect size. In the following results, statements on population effect correspond to a probability of .90. As an extension of the Bayesian interpretation of the confidence interval, after the experiment one can consider the range of value of the parameter with an acceptable guarantee (e.g., $\delta > a$ for a notable effect conclusion or $|\delta| < \varepsilon$ for a negligible or small effect). Detailed results of this analysis are presented in table 3.

6.1 DESCRIPTIVE ANALYSIS

6.1.1 GLOBAL STRATEGY

Whatever the group, the timetabling activity was guided by 10 global plans on average, most of them (eight on average) being based on the specifications documents. The work was regularly interrupted by checking consistency with the specifications. Most of the protocols

ended with an optimization phase: This was encouraged by the instructions to reduce unoccupied periods.

6.1.2 PERFORMANCE

Performance was assessed in terms of the completion time and the extent to which the final timetable met two multidimensional criteria issued during a previous interview with an expert: student comfort and teacher comfort. On average, the difference in completion times was minor ($53 - 48 = 5$ min more for novices, with larger individual differences for novices, $SD = 34$ min, than for experts, $SD = 8$ min). Student comfort included integrated waiting periods between courses, time lag given between exams, difficult tasks set in the morning, and reliable room availability. Teacher comfort included integrated time lag between interventions and reliable room availability. Each score on a criterion was divided by the maximum possible score. A detailed analysis will not be presented here because the differences between the groups were very small: the experts' average score for each criterion was a little higher, excepting the time lag between exams.

Now, we will turn to the inferential analysis of the timetabling activity. Most of the results are detailed in table 3.

	Novices		Experts		Observed Effect (d)	t Test ($\alpha = .05$)	Population Effect (δ)
	Mean	Standard Deviation	Mean	Standard Deviation			
Global distribution							
Constraint formulation from specifications or preferences	30.4	5.8	31.4	2.1	-1.0	$t(4) = -0.27$ $p > .79$ ns	$P(\delta < 7.7) = .90$
Other operations implying constraints	58.8	5.4	34.6	6.8	24.2	$t(4) = 4.81$ $p < .01$ S	$P(\delta > 16.5) = .90$
Operations within OS	4.7	0.4	15.3	5.4	-10.6	$t(4) = -3.41$ $p < .03$ S	$P(\delta < -5.8) = .90$
Action plan	5.7	1.6	17.9	1.2	-12.2	$t(4) = -10.39$ $p < .001$ S	$P(\delta < -10.4) = .90$
Other	0.4		0.8				
Total	100.0		100.0				
Operation implying constraints							
Constraint Propagation	22.7	6.4	7.7	2.9	15.0	$t(4) = 3.69$ $p < .03$ S	$P(\delta > 8.8) = .90$
Operation within OS							
Object Instantiation	2.1	1.1	9.2	2.7	-7.1	$t(4) = -4.26$ $p < .02$ S	$P(\delta < -4.5) = .90$

Table 3: Results of the inferential analysis (mean percentages on the basis of 359 coded units for novices and 396 for experts, on average). OS: Objects Space.

6.2 OPERATIONS IMPLYING THE CONSTRAINTS SPACE VERSUS OPERATIONS WITHIN THE OBJECTS SPACE

Whatever the group, constraint formulation from specifications or preferences represents about 30% of the operations (table 3). The participants seldom introduced preference constraints so this predicate mainly corresponds to specification constraints. Inasmuch as this operation is unavoidable, we will no longer consider it; however, we will continue to include it in the total frequency for percentage calculations.

Other operations implying constraints include operations within CS, from CS to OS, and from OS to CS (figure 14). They are major in each group. Overall, they represent 46.7% of the operations, 36.6% more than operations within OS, $t(4) = 9.71$, $p < .001$; $\delta > 30.8\%$, and 34.9% more than action plan formulations, $t(4) = 13.40$, $p < .001$; $\delta > 30.9\%$.

Their percentage for novices is much higher than for experts (table 3); the difference is significant and Bayesian inference proves that it is notable ($\delta > 16.5\%$). The difference is mainly due to constraint propagation; the occurrence of this predicate being much higher for novices than for experts (significant and $\delta > 8.8\%$). Conversely, operations within OS are much more frequent for experts than for novices (table 3; significant difference and $\delta > 5.8\%$).

This analysis of predicates partly covers transitions between problem spaces: from specifications to CS, within-CS, from CS to OS, within-OS, and from OS to CS. In addition, we have performed an analysis of the first-order transitions from the predicate CTR-FORM, only from specifications, to other predicates (112 for novices and 137 for experts) to gain more insight into the strategies. In particular, we compared the percentages of direct transitions toward within-OS operations. Experts show more frequent transitions of this type than novices, $d = 19.5 - 5.0 = 14.5\%$; $t(4) = 8.07$, $p < .002$; $\delta > 11.7\%$. This is consistent with the greater tendency to work with objects shown by experts than by novices.

6.3 TYPES OF OBJECTS AND ACTION PLANS

As stated in the presentation of the coding scheme (section 5.4.3), each time an object was defined, always after the occurrence of a corresponding constraint satisfaction predicate, we coded its type (concrete or abstract). On average, novices defined 33 objects and experts defined 32 objects. The percentage of abstract objects was much greater for experts than for novices, $d = 81.2 - 24.3 = 56.9\%$; $t(4) = 5.10$, $p < .007$; $\delta > 39.8\%$. Finally, experts reported a greater number of action plans than did novices (table 3; $\delta > 10.4\%$).

7 DISCUSSION

Before discussing the results of this study, we will sum up the main findings. First, we have shown the relevance of a generic coding scheme for analyzing this kind of scheduling activity. The development of this scheme has been based both on previous literature on design psychological processes and on the exploratory analysis method underlying MacSHAPA. This scheme enabled us to study the main features of timetabling and to get a greater insight into the nature of expertise within the domain. Table 4 sums up the main results of the analysis and figure 15 the higher percentage of operations implying constraints for novices and of operations within OS for experts (arrow thickness is proportional to the predicates' percentages).

Constraint formulation from specifications or preferences	About 30%
Other operations implying constraints	Major (59% and 35%) Novices > Experts (Especially constraint propagation)
Operations within the Objects Space	Experts > Novices (Especially object instantiation)
Direct transitions from CTR-FORM from specifications to within-OS operations	Experts > Novices
Abstract objects	Experts > Novices
Action plans	Experts > Novices

Table 4: Summary of the Results.

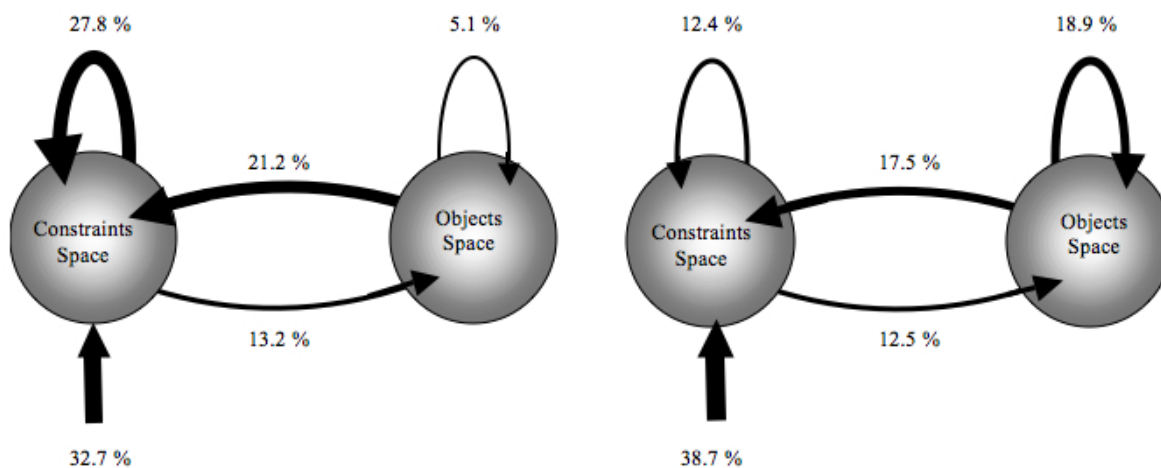


Figure 15: Relations between spaces for novices (on the left) and experts (on the right). The arrows' thickness represents a ratio of operations (predicates).

The major result of this study is the prominence of the constraint management activity in timetabling, whatever the expertise level, in comparison with object processing within the representation and processing system (RPS) imposed for expressing the solution and with action plan guidance. Action plans are much less reported, showing that this activity is less routinized than other scheduling activities. For example, in flexible manufacturing scheduling, a number of algorithms have been defined that are good candidates for becoming action plans (e.g., EDD for earliest due date, SPT for shortest processing time, etc.; see Hoc et al., 2004). It was certainly the reason for the focus placed by Sanderson (1991) on procedural models for human schedulers. However, within this general strategy, a global action plan, which leans in part towards the specifications documents but in the main toward managing constraints, presents some notable differences between novices and experts. These differences allow us some insight into the nature of expertise in timetabling.

First, experts performed proportionally fewer constraint management operations than novices. Experts tried to select objects on the basis of obvious constraints on the timetable, probably relying on the support of heuristics stemming from prolonged experience (Sanderson, 1989, 1991). On the contrary, novices appeared to rely more heavily on

constraint propagations compared to experts. To work through the timetabling process, these schedulers often combine variables, and thus constraints, before anything is specified on the timetable. The analysis of transitions from specifications to OS also showed that experts were more able than beginners to directly go to within-OS operations.

Second, experts performed proportionally more within-OS operations than novices. In other words, they are more likely than novices to handle constraints in the form of objects represented on the interface instead of as abstract structures in their head. This validates the above hypothesis that considers that the ability to externalize mental representations is an ingredient of expertise, serving to alleviate the workload. There is also the possibility, as stated earlier, that experts will implement their ability to recognize and process meaningful visual patterns.

Third, the experts' tendency to move on more quickly to objects compared to novices does not mean that they commit themselves too early. On the contrary, when constraints had been satisfied, they chose abstract objects more often than concrete objects. To represent an object on the interface, they needed only to choose a period of time, a student group, and a module, with the rest (namely, teacher and room) remaining possibly unspecified. Thus, they performed proportionally more object instantiations than novices. This use of different abstraction levels in planning is a well-known component of expertise (Hoc, 1988). Other viewpoints could be explored in the future, including that of novice schedulers. Beyond the discussion about expertise, it is still not clear why novices appear to hesitate before they commit themselves to object definition. The answer could lie in a fear of putting concrete (fully specified) objects onto the timetable too early, thus blocking solution achievement by conflicting constraints. Experts managed this risk by defining abstract objects before instantiating them, and by modifying objects.

Fourth, experts reported proportionally more action plans than novices. This is related to a higher metaknowledge development in experts than in beginners. This is also related to a more routinized activity.

Finally, although individual differences in strategy have been found between experts, it is noteworthy to consider that, in this controlled task, these differences did not prevent us from drawing clear-cut inferential conclusions with regard to expertise. However, the descriptive analysis of performance did not allow us to conclude that there was a large difference between experts and novices. The reason for this is possibly our choice of a quite simple task, which enabled both novices and experts to be successful within a reasonable period of time.

8 CONCLUSION

Through an analysis of verbal reports and visible actions on the timetable, this study of cognitive mechanisms at work in timetabling enabled us to track the cognitive processes of experts and novices within two dual spaces. The resulting coding scheme constitutes a transferable structure that can be used in studies relating to other kinds of scheduling activity. For example, it could be implemented in a computer program that is capable of simulating this kind of activity, and with diverse types of strategy, either on the basis of differences between novices and experts or application domains.

Understanding the processes used by experts, particularly with regard to the representations and strategies used, is important for the design of interfaces and training programs. An expert cognitive model could help to specify requirements for ergonomic assistance (computer support) for complex tasks in complex environments. For instance, there could be a requirement for featuring constraints that are difficult to see on the interface (solution RPS). The aim is to help schedulers consider all viewpoints on the timetable to bring them together and avoid mistakes. For example, one of the experts, when giving feedback on Excel®, noted that one of its drawbacks for timetabling use was that, "it should have beeped." We understand that it is important to consider both the quality and "intelligence" of the human-machine interface during the design activity.

As far as timetabling is concerned, a particular feature of the expert cognitive model was stressed: the benefit of an interface where every constraint can be visible. As a matter of fact, it would be interesting to design interfaces that enable the schedulers to externalize part of their cognitive control by means of partially defined objects.

The reason for novices' postponement of their commitment to objects (i.e., partial solutions compatible with the solution RPS) that are other than concrete objects remains to be explained. Although hidden constraints are accessible through several documents, it is nevertheless costly to process them as partial results, before their arrival on the timetable. A possible hypothesis could be that novices are afraid of not being able to manage errors on the interface. If this is the case, additional support could be developed directly on the interface itself. It is the same for experts who are used to working on more interactive interfaces capable of detecting errors (e.g., conflict between constraints). However, for novices, the interface should help the scheduler to correct any errors.

More generally, in the context of manufacturing scheduling, Hoc et al. (2004) have highlighted the fact that scheduling is a singular process, where humans play a major role. This is the case even when devoted software, such as Advanced Planning and Scheduling (APS), is more and more frequently used (Gruat-La-Forme, Botta-Genoulaz, & Campagne, 2009). The scheduling process is complex because of the large number of objects and constraints to be manipulated, and because of the irreducible uncertainties that exist within a manufacturing system. Thus, cooperation between human scheduler, machine, and scheduling software is necessary. This article shows the need for an adapted interface that can take advantage of this cooperation and thus improve scheduling performance. Unfortunately, there is a lack of ergonomic prescription or recommendation for an interface for software scheduling, such as APS. Further research work in this area is necessary.

9 APPENDIX: ILLUSTRATIONS OF PREDICATES

Predicates	Arguments	Examples
Transition operation from the specifications, the designer's preferences or the Objects Space toward the Constraints Space		
CTR-FORM	(Constraint No) Origin: Group: Room: Teacher: Teach. module: Period:	<i>"For geography, I can see that there's one tutorial for each group"</i> <i>Prescribed</i> <i>Groups 1-2-3</i> <i>Not yet specified</i> <i>Not yet specified</i> <i>Geography's tutorial</i> <i>Not yet specified</i>
Operations within the Constraints Space		
CTR-REF	(Constraint No)	
CTR-PRG		Combines two previous constraints: <i>"I'm going to begin with English. Well, like the order in the document"</i> coded: CTR-FORM (82, prescribed, groups 1-2-3, <room>, <teacher>, tutorial of English, <period>) <i>"I'm going to plan the tutorial for the same morning"</i> coded: CTR-FORM (83, deduced, <group>, <room>, <teacher>, tutorial of English, same morning): Value of variables can be filled in thanks to the context: the participant analyzed the timetable to deduce that the tutorial for English could be planned for the same morning, especially for the free time on the Monday morning. Constraint No: 84 Group: <i>Groups 1-2-3</i> Room: <i>Not yet specified</i> Teacher: <i>Not yet specified</i> Teach. module: <i>Tutorial of English</i> Period: <i>Same morning</i>
CTR-RLX	Constraint No	
Transition operations from the Constraint Space to the Objects Space		
CTR-FEAS	(Constraint No) Result :	<i>"Is Wednesday morning available for group 3?"</i> In this example, the scheduler considers whether a teaching module could be planned during a certain period. When we look at what happens next, the protocol reveals the test of feasibility (with a constraint satisfaction, for instance). <i>Feasible</i>
CTR-SATF	(Constraint No) Type of object:	Abstract (partly specified) or concrete (fully specified)
CTR-SATF-QST	Constraint No:	<i>"On second thoughts, I'm going to change that"</i> 85: An object that stems from the satisfaction of the constraint 85 will be changed.
Operations within the Objects Space		
OBJ-MOD	(Object No) Variable:	The scheduler is moving a teaching module to another period without expression of any constraint. <i>Period</i>
OBJ-INS	(Object No) Variable:	The scheduler is adding the value of the variable "room" to an object where the group, the period and the teaching module were previously specified. <i>Room</i>

10 ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank students and senior lecturers from the University of Nantes (France) for their participation.

11 REFERENCES

- Cellier, J.M., Eyrolle, H., & Mariné, C. (1997). Expertise in dynamic environments. *Ergonomics*, *40*, 28-50.
- Chi, M., Glaser, R., & Farr, M. (Eds.). *The Nature of Expertise*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Crawford, S., MacCarthy, B.L., Wilson, J.R., & Vernon, C. (1999). Investigating the work of industrial schedulers through field study. *Cognition, Technology & Work*, *1*, 63-77.
- Darses, F. (1991). The constraint satisfaction approach to design: A psychological investigation. *Acta Psychologica*, *78*, 307-325.
- Dessouky, M.I., Moray, N., & Kijowski, B. (1995). Taxonomy of scheduling systems as a basis for the study of strategic behavior. *Human Factors*, *37*, 443-472.
- Duncker, K. (1958). On problem-solving. *Psychological Monographs*, *5*, whole no 270.
- Eastman, C. (1970). On the analysis of intuitive design processes. In G. Moore (Ed.), *Emerging methods in environmental design and planning* (Proceedings of First International Conference of the design methods group). (pp. 21-37). Cambridge, MA: MIT Press.
- Ericsson, K.A., & Smith, J. (Eds.). (1991). *Toward a general theory of expertise*. New York : Cambridge University Press.
- Farrington-Darby, T., & Wilson, J.R. (2006). The nature of expertise: a review. *Applied Ergonomics*, *37*, 17-32.
- Goel, V. (1995). *Sketches of thought*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Gruat-La-Forme, F.A., Botta-Genoulaz, V., & Campagne, J.P. (2009). The role of APS systems in Supply Chain Management: a theoretical and industrial analysis. *International Journal of Logistics Systems and Management*, *5*, 356-374.
- Hoc, J.M. (1987). *Psychologie cognitive de la planification*. Grenoble: Presses Universitaires de Grenoble.
- Hoc, J.M. (1988). *Cognitive psychology of planning* (C. Greenbaum, Trad). London: Academic Press (Original work published in 1987).
- Hoc, J.M., & Amalberti, R. (2005). Modelling NDM cognitive activities in dynamic situations: the role of a coding scheme. In H. Montgomery, B. Brehmer, & R. Lipshitz (Eds.), *How professionals make decisions* (pp. 319-334). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Hoc, J.M., & Amalberti, R. (2007). Cognitive control dynamics for reaching a satisficing performance in complex dynamic situations. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, *1*, 22-55.

- Hoc, J.M., & Leplat, J. (1983). Evaluation of different modalities of verbalization in a sorting task. *International Journal of Man-Machine Studies*, 18, 283-306.
- Hoc, J.M., Mebarki, N., & Cegarra, J. (2004). L'assistance à l'opérateur humain pour l'ordonnancement dans les ateliers manufacturiers [Human operator support to manufacturing scheduling]. *Le Travail Humain*, 67, 181-208.
- Hoffman, R.R. (Ed.). (1992). *The psychology of expertise*. New York: Springer Verlag.
- Hooker, J.N. (2006). Operations research methods in constraint programming. In F. Rossi, P. van Beck, & T. Walsh (Eds.), *Handbook of constraint programming* (pp. 527-570). Amsterdam: Elsevier.
- Hutchins, E. (1995). *Cognition in the wild*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Jackson, S., Wilson, J.R., & MacCarthy, B.L. (2004). A new model of scheduling in manufacturing : tasks, roles, and monitoring. *Human Factors*, 46, 533-550.
- Janssen, P., Jégou, P., Nouguier, B., & Vilarem, M.C. (1989). Problèmes de conception: une approche basée sur la satisfaction de contraintes [Design problems: an approach based on constraint satisfaction]. Paper presented at the « 9èmes Journées internationales: Les systèmes experts et leurs applications ». Avignon, France, May-June.
- Jorna, R. (2006). Cognition, planning, and domains: an empirical study into the planning processes of planners. In W. van Wezel, R.J. Jorna, & A.M. Meystel (Eds.), *Planning in intelligent systems: aspects, motivations, and methods* (pp. 101-135). Hoboken, NJ: Wiley.
- Kiewiet, D.J., Jorna, R., & van Wezel, W. (2005). Planners and their cognitive maps : an analysis of domain representations using multidimensional scaling. *Applied Ergonomics*, 36, 695-708.
- Kolodner, J.L., & Wills, L.M. (1996). Powers of observation in creative design. *Design Studies*, 17, 385-416.
- Larkin, J., & Reif, F. (1979). Understanding and teaching problem solving in physics. *European Journal of Science Education*, 1, 191-203.
- Lecoutre, B., & Poitevineau, J. (2005). Le logiciel « LePAC » [PAC Software : English version available]. *La Revue de Modulad*, 33 (whole volume). Retrieved [22.12.10] from: <http://www.univ-rouen.fr/LMRS/Persopage/Lecoutre/PAC.htm>
- McKay, K.N., Buzacott, J.A., Charness, N., & Safayeni, F.R. (1992). The scheduler's predictive expertise : an interdisciplinary perspective. In G.I. Poukidio & R.J. Paul (Eds.), *Artificial intelligence in operational research* (pp. 139-150). New York : MacMillan.
- MacCarthy, B.L., Wilson, J.R., & Crawford, S. (2001). Human performance in industrial scheduling: a framework for understanding. *International Journal of Human Factors in Manufacturing*, 11, 63-77.
- Meseguer, P. (1989). Constraint satisfaction problem: an overview. *AICOM*, 2, 3-17.
- Moray, N., Dessouky, M.I., Kijowski, B.A., & Adapathya, R. (1991). Strategic behavior, workload, and performance in task scheduling. *Human Factors*, 33, 607-629.
- Rasmussen, J. (1986). *Information processing and human-machine interaction*. Amsterdam: North-Holland.

- Richard, J.F. (1999). Comportements, buts et représentations [Behaviors, goals, and representations]. *Psychologie Française*, 44, 75-90.
- Rouanet, H. (1996). Bayesian methods for assessing importance of effects. *Psychological Bulletin*, 119, 149-158.
- Sanderson, P.M. (1989). The human planning and scheduling role in advanced manufacturing systems: An emerging human factors domain. *Human Factors*, 31, 635-666.
- Sanderson, P.M. (1991). Towards the model human scheduler. *International Journal of Human Factors in Manufacturing*, 1, 195-219.
- Sanderson, P., Scott, J., Johnson, T., Mainzer, J., Watanabe, L., & James, J. (1994). MacSHAPA and the enterprise of exploratory sequential data analysis (ESDA). *International Journal of Human-Computer Studies*, 41, 633-681.
- Stefik, M. (1981a). Planning with constraints (MOLGEN : Part1). *Artificial Intelligence*, 16, 111-140.
- Simon, H.A., & Barenfeld, M. (1969). Information-processing analysis of perceptual processes in problem-solving. *Psychological Review*, 76, 473-483.
- Simon, H.A., & Lea, G. (1974). Problem solving and rule induction: a unified view. In L.W. Gregg (Ed.), *Knowledge and cognition* (pp. 105-128). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Taatgen, N.A. (1999). *Learning without limits: from problem solving towards a unified theory of learning*. Doctoral Dissertation, University of Groningen, The Netherlands.
- Ullman, D., Dietterich, T., & Stauffer, L. (1988). A model of the mechanical design process based on empirical data. *AI EDAM*, 2, 33-52.
- van Wezel, W., & Jorna, R.J. (2009). Cognition, tasks, and planning: supporting the planning of shunting operations at Netherlands Railways. *Cognition, Technology & Work*, 11, 165-176.
- van Wezel, W., Cegarra, J., & Hoc, J.M. (2011). Allocating Functions to Human and Algorithm in Scheduling. In J.C. Fransoo, T. Wäfler, & J. Wilson (Eds.), *Behavioral Operations in Planning and Scheduling* (pp. 339-370). Berlin : Springer-Verlag.
- Visser, W. (2006). *The cognitive artifacts of designing*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Zhang, J., & Norman, D.A. (1994). Representations in distributed cognitive tasks. *Cognitive Science*, 18, 87-122.

CHAPITRE 7 : LA NATURE DE L'EXPERTISE EN ORDONNANCEMENT MANUFACTURIER : PROCESSUS STRATEGIQUES ET TACTIQUES, GESTION DE CONTRAINTES ET D'OBJETS

1	RESUME.....	125
1.1	INTRODUCTION.....	125
1.2	OBJECTIFS ET QUESTIONS DE RECHERCHE	126
1.3	METHODE UTILISEE	127
1.4	PRINCIPAUX RESULTATS.....	127
2	ABSTRACT	130
3	INTRODUCTION	130
4	LEVEL OF COGNITIVE CONTROL IN PLANNING AND SCHEDULING	133
5	COORDINATING MULTIPLE RPS IN AN EXTERNAL RPS: CONSTRAINT AND OBJECT MANAGEMENT	134
6	THE SCHEDULING EXPERTISE	137
7	HYPOTHESES	138
8	METHOD.....	139
8.1	PARTICIPANTS	139
8.2	EXPERIMENTAL TASK.....	140
8.3	DATA COLLECTION, CODING METHOD AND CODING SCHEME	141
8.3.1	STRATEGIC ACTIVITIES.....	142
8.3.2	TACTICAL ACTIVITIES	143
8.4	STATISTICAL METHODS	144
9	RESULTS.....	144
9.1	LEVELS OF CONTROL	144
9.2	ALL STRATEGIC OPERATIONS VERSUS TACTICAL OPERATIONS.....	145
9.3	TYPES OF GOALS FORMULATED	146
9.4	OPERATIONS IMPLYING THE CONSTRAINTS SPACE VERSUS OPERATIONS WITHIN THE OBJECTS SPACE	147
9.4.1	SCHEDULING STAGE	147
9.4.2	RESCHEDULING STAGE.....	147
9.5	ANALYSIS OF DIRECT TRANSITIONS FROM A CONSTRAINT FORMULATION	148
9.6	PERFORMANCE.....	148
10	DISCUSSION	150
11	CONCLUSION.....	152
12	APPENDIX: ILLUSTRATIONS OF PREDICATES	154
13	ACKNOWLEDGEMENTS.....	155
14	REFERENCES.....	155

Ce chapitre expérimental a fait l'objet d'un article soumis en décembre 2011 dans la revue *International Journal of Industrial Ergonomics*. Il est actuellement en révision. La première version soumise a donc été intégralement insérée dans ce chapitre. Un résumé en français rappelle les objectifs et questions de recherche, la méthode utilisée, et les principaux résultats.

1 RESUME

1.1 INTRODUCTION

Cette recherche est une contribution à l'étude des stratégies humaines d'ordonnancement. Dans la littérature, la plupart des travaux qui ont cherché à décrire ces stratégies ont adopté le point de vue des procédures (heuristiques, règles) mises en œuvre par les ordonnanceurs. En partant du constat que l'activité d'ordonnancement implique la gestion de contraintes, nous avons adopté le point de vue complémentaire des représentations manipulées par les ordonnanceurs.

Ce travail s'inscrit dans la continuité de l'étude sur l'activité de conception d'emploi du temps (chapitre 6). Pour comparer à une nouvelle situation d'ordonnancement les résultats déjà obtenus, nous avons choisi d'examiner l'activité d'ordonnancement manufacturier car ces deux situations partagent des points communs. Tout d'abord, la résolution d'un problème de conception d'emploi du temps et celle d'un problème d'ordonnancement manufacturier nécessitent de gérer des contraintes. Ensuite, de la même manière que l'activité de conception d'emploi du temps implique des composants routiniers de planification (plans d'action), des procédures bien connues (par ex., SPT, EDD) ont déjà été identifiées dans l'ordonnancement manufacturier. Enfin, pour ces deux situations, l'accès à des ordonnanceurs experts est possible, ce qui permet d'envisager des comparaisons avec des novices.

Pour comparer les deux situations, nous avons donc examiné l'activité d'ordonnancement manufacturier en utilisant les mêmes méthodes que dans la conception d'emploi du temps : consigne de verbalisations simultanées à la tâche, codage de protocoles individuels, et comparaison entre experts et novices.

Par ailleurs, nous avons cherché dans cette nouvelle étude à caractériser plus finement deux dimensions des stratégies d'ordonnancement :

- Une dimension *stratégique* correspondant à un haut niveau d'abstraction dans le contrôle cognitif des processus symboliques. Ce niveau d'abstraction est constitué de composants de planification (gestion de buts et de procédures). La violation de contrainte fait également partie de cette dimension dans la mesure où elle consiste à redéfinir la tâche d'ordonnancement.
- Une dimension *tactique* correspondant à un bas niveau d'abstraction dans le contrôle cognitif des processus symboliques. A ce niveau d'abstraction sont articulées des activités de gestion de contraintes et d'objets, comme nous avons pu l'observer dans la situation de conception d'emploi du temps.

Enfin, nous avons également cherché à introduire deux aspects caractéristiques des situations d'ordonnancement, que nous n'avions pas étudié dans la conception d'emploi du temps : la gestion des aléas et le réordonnancement. Pour cela, nous avons distingué dans la tâche proposée aux participants une phase d'ordonnancement et une phase de réordonnancement.

1.2 OBJECTIFS ET QUESTIONS DE RECHERCHE

Pour comparer les deux situations d'ordonnancement du point de vue de la nature de l'expertise, nous avons étudié les différences entre experts et novices dans une tâche d'ordonnancement manufacturier.

Pour comparer les deux situations d'ordonnancement du point de vue des deux dimensions impliquées dans les stratégies d'ordonnancement (dimension stratégique et dimension tactique), nous avons emprunté aux travaux de Rasmussen (1983, 1986) la décomposition fonctionnelle de la hiérarchie d'abstraction. A l'intérieur de cette hiérarchie, le plus haut niveau d'abstraction concerne les buts et procédures gérées par les ordonnanceurs (dimension stratégique). A un niveau plus bas de la hiérarchie est mise en œuvre la gestion de contraintes et d'objets (dimension tactique).

De plus, comme nous l'avons déjà fait pour étudier la conception d'emploi du temps, nous avons également adopté la définition stricte de la contrainte et de l'objet, qui prolonge la proposition de Stefik (1981a) : *les contraintes sont des relations entre variables qui ne peuvent être représentées dans la solution (diagramme de Gantt), alors que les objets sont des satisfactions de contraintes qui peuvent y être représentées.*

A partir de cette étude sur l'activité d'ordonnancement manufacturier, nous avons examiné plusieurs questions de recherche :

- Est-ce que le schème de codage que nous avons déjà utilisé dans la conception d'emploi du temps reste pertinent dans cette situation d'ordonnancement manufacturier ?
- Quelles différences peut-on observer entre experts de la conception d'emploi du temps et experts de l'ordonnancement manufacturier ?
- Quelles différences peut-on observer entre conception d'emploi du temps et ordonnancement manufacturier dans la répartition des dimensions stratégiques et tactiques ?
- Quelles différences peut-on observer entre conception d'emploi du temps et ordonnancement manufacturier du point de vue de la gestion des contraintes et de celle des objets ?
- Est-ce que les experts en ordonnancement manufacturier se caractérisent par une représentation plus abstraite du problème, en adoptant notamment un niveau plus stratégique et abstrait pour le contrôle cognitif des processus ?
- Est-ce que, par rapport aux novices, les experts en ordonnancement manufacturier travaillent plus à partir des objets sur le diagramme de *Gantt*, qu'à partir des structures mentales abstraites que sont les contraintes ?

- Est-ce que les experts en ordonnancement manufacturier présentent des capacités d'anticipation en cherchant à anticiper l'apparition d'aléas ?
- Est-ce que les experts en ordonnancement manufacturier adoptent des stratégies spécifiques pour réduire la complexité du problème, par exemple en modifiant les spécifications du problème à partir de la violation de contraintes ?

1.3 METHODE UTILISEE

Dans cette étude, nous avons demandé à six experts (professionnels de la gestion de production) et à dix novices (étudiants d'IUT ayant des connaissances théoriques sur l'ordonnancement) d'ordonner six ordres de fabrication (OF) sous forme de diagramme de *Gantt*. Les participants à l'expérience devaient prendre en considération des contraintes liées à la durée des opérations et aux dates de livraison des OF. Par ailleurs, on préparait les participants à ce qu'il survienne des aléas (périodes de maintenance), sans en préciser ni les durées ni les machines concernées. Deux objectifs étaient prescrits aux participants : maximiser la productivité et minimiser les retards. Puisque le diagramme de *Gantt* basé sur les machines permet notamment de visualiser leur disponibilité, nous avons utilisé ce type de diagramme de *Gantt*. Une fois l'ordonnancement terminé, des informations concernant les périodes de maintenance étaient fournies. La tâche était alors d'effectuer un réordonnancement pour considérer ces périodes de maintenance impliquant l'arrêt des machines. Pour les aider à réaliser cette tâche, les participants devaient utiliser le logiciel d'assistance à l'ordonnancement Lekin®. Ce logiciel, qui gère les contraintes de succession entre opérations, permet de visualiser le résultat sous forme de diagramme de *Gantt* mais aussi des indicateurs comme le *Makespan*. Enfin, les participants avaient également la possibilité avec Lekin® de déplacer manuellement les objets du diagramme pour réaliser, autant que de besoin, des modifications à l'ordonnancement.

Pour accéder à l'activité mentale des ordonnanceurs, nous avons utilisé une consigne de verbalisations simultanées à la réalisation de la tâche (*thinking aloud*). A partir du schème de codage construit pour décrire la conception d'emploi du temps, nous l'avons adapté pour étudier cette situation d'ordonnancement manufacturier. Le schème était constitué d'un ensemble d'opérations stratégiques (liées aux buts, aux procédures et à la violation de contrainte) et d'un ensemble d'opérations tactiques (gestion des contraintes et des objets). Le schème de codage nous a permis de coder les protocoles individuels des participants (actions et verbalisations) en utilisant le logiciel MACSHAPA (Sanderson et al., 1994).

1.4 PRINCIPAUX RESULTATS

Tout d'abord, la description de l'activité d'ordonnancement manufacturier à partir de notre schème de codage est apparue pertinente. Plus particulièrement, en adoptant deux niveaux d'analyse des processus psychologiques en œuvre, nous avons pu distinguer un haut niveau d'abstraction (processus stratégiques) et un bas niveau d'abstraction (processus tactiques). Il s'agit là d'un point commun avec la situation de conception d'emploi du temps. Avant de réaliser une comparaison plus précise entre les deux situations d'ordonnancement, nous présenterons les résultats observés dans la situation d'ordonnancement manufacturier étudiée spécifiquement dans ce travail.

Nous commencerons par mettre en évidence deux résultats généraux observés dans cette situation d'ordonnancement manufacturier, indépendamment du niveau d'expertise :

- Quel que soit le niveau d'expertise, la proportion des activités stratégiques est moins importante que celle des activités tactiques. Cette différence est encore plus marquée dans la phase de réordonnancement.
- Quel que soit le niveau d'expertise, la part relative des opérations dans l'espace des objets est assez importante, particulièrement pour la phase d'ordonnancement (en moyenne 50 % environ). Ce résultat s'explique par la facilité avec laquelle il était possible avec Lekin® de déplacer les objets du diagramme de *Gantt*.

En examinant plus en détail l'importance respective des deux niveaux d'abstraction dans l'activité d'ordonnancement manufacturier chez des experts et chez des novices, nous avons pu mettre en évidence des différences liées à l'expertise :

- Les experts adoptent un niveau plus stratégique que les novices dans le contrôle des processus cognitifs, aussi bien dans la phase d'ordonnancement que dans la phase de réordonnancement. Ils utilisent donc une représentation plus abstraite et fonctionnelle du problème d'ordonnancement, notamment à partir de la gestion de buts, de procédures (SPT, EDD, LPT, etc.), et à partir de violation de contraintes.
 - Dans la phase d'ordonnancement, le but de minimiser les temps d'attentes (marges) entre les opérations est privilégié par les experts. Ce but est lié à l'idée de maximiser l'utilisation des machines dans l'atelier pour diminuer au maximum les périodes d'improductivité. Par ailleurs, l'anticipation de la perturbation, liée aux périodes de maintenance des machines, n'a pas été un marqueur de l'expertise dans cette étude. Dans la réalité des ateliers, les conséquences de ce type d'aléa sont probablement réglées par des négociations avec le service de maintenance. Leur anticipation par l'introduction de marges viendrait alors mettre en péril le but de minimiser les temps d'attentes.
 - Dans la phase de réordonnancement, l'expertise est caractérisée par la violation de contraintes prescrites. Les quelques contraintes concernées étaient des périodes de maintenance des machines que les ordonnanceurs devaient considérer dans leur ordonnancement. Cette opération stratégique de redéfinition des conditions du problème s'explique par l'impossibilité, dans les conditions définies par la tâche, de négocier ces contraintes. En l'absence de cette possibilité, les experts ont privilégié la suppression de ces contraintes pour éviter tout retard de livraison d'une commande à un client.
- A l'intérieur du niveau tactique (gestion de contraintes et d'objets), nous avons observé qu'au cours de la phase d'ordonnancement en particulier, les experts utilisaient proportionnellement plus que les novices les représentations externes (les objets du diagramme de *Gantt*) comme support à leur activité. Ce résultat montre que les experts ont eu tendance à déporter leur cognition plus que les novices, en externalisant leurs représentations mentales (contraintes). Par rapport aux novices, les experts privilégiaient plus les représentations rendant visible la structure profonde des contraintes. A l'opposé, les débutants ont semblé manipuler plus les représentations abstraites que sont les contraintes, en réalisant proportionnellement plus d'opérations

de propagation (combinaison de contraintes). Ce résultat a été observé au cours des deux phases de la tâche.

Les résultats obtenus dans cette étude peuvent être mis en parallèle avec ceux observés dans la conception d'emploi du temps :

- Dans la conception d'emploi du temps, nous avons observé que la gestion de contraintes était proportionnellement bien plus importante que les aspects stratégiques (plans d'actions). Même si dans l'ordonnancement manufacturier la dimension tactique est également proportionnellement plus importante que la dimension stratégique (buts et procédures), cette répartition est quelque peu différente de celle observée dans la conception d'emploi du temps. En effet, dans l'ordonnancement manufacturier, la part prise par les aspects stratégiques est plus importante que dans la conception d'emploi du temps. Ce résultat montre donc que la conception d'emploi du temps est une activité moins routinière que ne peut l'être l'ordonnancement manufacturier. Dans l'ordonnancement manufacturier, des algorithmes standards (SPT, EDD, etc.) sont de bons candidats pour mettre en œuvre des plans d'action. C'est probablement une des raisons pour laquelle Sanderson (1991) a mis le focus sur des modèles procéduraux de l'ordonnanceur humain. Dans notre étude sur l'ordonnancement manufacturier, l'utilisation de ce type de procédures a été observée, ainsi que la gestion de plans déclaratifs (formulation et évaluation de buts). Dans cette situation manufacturière, la part relative de la dimension stratégique a été plus importante (environ 40 % en moyenne, quel que soit le niveau d'expertise) que dans la conception d'emploi du temps (environ 12 % en moyenne, quel que soit le niveau d'expertise)
- Dans la conception d'emploi du temps, nous avons observé que la gestion de contraintes était proportionnellement bien plus importante que la gestion des objets. Cette répartition est différente dans l'ordonnancement manufacturier car la part respective de gestion de contraintes et de gestion d'objets est à peu près identique. Il est possible que cette différence entre les deux situations s'explique par les caractéristiques du problème proposé, en termes de nombre de contraintes à gérer. Dans la conception d'emploi du temps, de nombreuses contraintes devaient être considérées par les ordonnanceurs : disponibilité des salles, disponibilité des enseignants, succession entre les modules d'enseignement, association entre le type de salle et le type de module, durée des modules, etc. Dans la tâche d'ordonnancement manufacturier, les contraintes à gérer étaient moins nombreuses : durée des opérations, dates de livraison, succession des opérations. Dans la phase de réordonnancement manufacturier, des contraintes de maintenance des machines ont été ajoutées. L'introduction de ces nouvelles contraintes a eu un effet sur la répartition des opérations en diminuant la part relative des opérations impliquant des objets au profit de celle impliquant des contraintes. Cet effet va dans le sens de notre hypothèse.

Nous fournissons maintenant l'intégralité du manuscrit en anglais soumis à *International Journal of Industrial Ergonomics*, et actuellement en révision.

THE NATURE OF EXPERTISE IN INDUSTRIAL SCHEDULING: STRATEGIC AND TACTICAL PROCESSES, CONSTRAINT AND OBJECT MANAGEMENT

Guerin, C., Hoc, J.M., & Mebarki, N.

2 ABSTRACT

This paper focuses on scheduling expertise from a cognitive and ergonomic perspective. It describes two levels of abstraction in the cognitive control of symbolic processing during scheduling: a higher level, defined by strategic processes (procedures and goals management), and a lower level, specified by tactical processes (constraints and objects management). Within the tactical level of control, two dual problem spaces can be defined: the Constraints Space (CS) and the Objects Space (OS). The constraints adopted in this paper are considered as relations between variables that cannot be represented in the solution (a Gantt chart). Objects, on the other hand, are constraint satisfactions and can be represented. In order to highlight the nature of expertise in scheduling, we carried out a study to compare twelve novices (students of production management) and six experts (professionals in this domain). The participants were asked to solve a textbook case to schedule six manufacturing orders on three machines, using a Gantt chart. We then introduced new constraints (periods of maintenance) into the rescheduling stage, and collected actions on the interface and concurrent verbal reports. The findings highlighted two major results in terms of scheduling expertise. Firstly, experts used a higher level of abstraction (strategic level) than novices in the control of processing during scheduling activity. Secondly, within the tactical level, experts were more likely than novices to use external representations (objects) as activity support, whilst novices managed more constraints in their heads. This study also has several implications for operator assistance.

Relevance to industry: a better understanding of the processes used by schedulers would bring about improvements in human-machine cooperation for scheduling. This stake is crucial to the enhancement of productivity and customer satisfaction. Moreover, the task of schedulers is to design a schedule, rather than to execute it. One of their roles is to contribute to the prescription of work carried out on the shop floor. Since scheduling decisions impact on workers, it is also important to understand schedulers' problem-solving processes.

Keywords: Expertise; Scheduling; Cognitive control; Constraint management

3 INTRODUCTION

Scheduling problems are commonly defined in terms of allocating tasks to resources over time (e.g., Baker, 1974; Crawford, MacCarthy, Wilson, & Vernon, 1999; Hoc, Mebarki, & Cegarra, 2004; Jorna, 2006; Kiewiet, Jorna, & van Wezel, 2005; van Wezel, Cegarra, & Hoc, 2011). They can be found in a wide range of fields, including manufacturing systems (e.g., McKay, Safayeni, & Buzacott, 1995), transportation planning (e.g., Gacias, Cegarra, & Lopez, 2010; van Wezel & Jorna, 2009), hospitals (e.g., Mietus, 1994; Sakphisal & Higgins, 2010), and university timetabling (Hoc, Guerin, & Mebarki, in press). In industrial companies, planning and scheduling activities exist at various levels of the system. They are imperative for the efficient management of production in a rising competitive environment where

manufacturing costs must be reduced. Operations research has always been very active with regard to these issues. With the use of mathematical methods (algorithms, heuristics – e.g., Pinedo, 1994), however, it is becoming clear that such research serves more as a software supplier (e.g., APS: Advanced Planning and Scheduling) by automating the scheduling process, than as a designer of human operator support.

In manufacturing systems, the shop floor is a socio-technical system that consists of human, organizational and technical aspects, all of which need to be studied (MacCarthy & Wilson, 2001). Whilst several authors have emphasized the central role of human aspects in some scheduling tasks (Higgins, 1996; Jackson, Wilson, & MacCarthy, 2004; Wiers, 1996), relatively little is known about human scheduling abilities and their contribution to manufacturing systems (MacCarthy, Wilson, & Crawford, 2001). However, it seems that human schedulers often achieve very acceptable levels of performance (Sanderson, 1989). Several observational studies (e.g., McKay et al., 1995) have provided descriptions of the human strengths that exist, despite the complexity encountered in the shop floor environment. These human strengths are able to detect certain features of the plant more easily than a computer, anticipating situations of instability, and evaluating the possible effects and risks of this instability on such tasks as scheduling. However, a better understanding of expertise in scheduling is necessary if decision support systems are to be improved. Thus, there is a need for model-based research that offers a description of how schedulers actually behave (MacCarthy et al., 2001).

Until now, most research studies on scheduling expertise have dealt with observational field studies that frequently involve only one individual (Cegarra, 2008; Sanderson, 1989), and mainly from a procedural viewpoint. For instance, in the context of the printed circuit board industry, McKay et al. (1995) gave a very detailed description of the scheduling process of one individual, in terms of decision-making. Their aim was to encode human schedulers' heuristics (a set of decision rules) in a decision support system. Wiers (1996) used a field study approach in his attempt to model scheduling decisions in a truck manufacturing company. The objective of the study was more to describe the inputs and outputs of the decision of the four schedulers studied than their cognitive processes, which the author called the "black-box". Many research studies carried out in a laboratory setting have also been handled from a procedural viewpoint. They compared human schedulers' performance with scheduling rules (Moray, Dessouky, Kijowski, & Adapathya, 1991; Nakamura & Salvendy, 1988), using specific models to emphasize procedural knowledge implied within the realization of a task (e.g., GOMS-type model - Tabe & Salvendy, 1988; Tabe, Yamamuro, & Salvendy, 1990). Adopting the same procedural viewpoint, Sanderson (1991) tried to model scheduler activity using the decision ladder, a problem-solving model put forward by Rasmussen (1986). Her framework describes the different cognitive operations involved in a scheduling activity with a set of production rules (condition and action of each production activity).

The procedural aspects of goals management have also been studied from within the context of scheduling. For example, Tabe and Salvendy (1988) showed that schedulers could favor one goal at the expense of another, because of conflicting goals (tardiness versus shop utilization). This result points to the weighting of goals and the rise of conflicts (Higgins, 1996; Mietus, 1994). For instance, a goal that aims to minimize tardiness may contradict another goal, such as the maximization of machine utilization.

Alongside the procedures and goals that are implied within scheduling decision-making is a viewpoint that relates to the nature of the representations processed. As stated by Higgins (1996), schedulers have deep knowledge of their work environment. However, the nature of these representations is relatively unknown. Kiewiet et al. (2005) conducted an empirical study within the context of the Netherlands Railways, to determine schedulers' cognitive maps (or mental models). The task of the participants was to use cards to produce graphs that represent their domain knowledge model for solving scheduling problems. The results showed a strong variability in terms of domain representation and knowledge.

Another way of studying the representations involved in scheduling is to compare operators with various levels of expertise. Hoc et al. (in press) used the traditional novice-expert paradigm to study university timetabling, a particular case of scheduling. By using a protocol analysis method, scheduling was described in terms of constraints and objects management. Following work carried out by Stefik (1981a) in the field of experimental planning in molecular genetics, Hoc et al. (in press) defined a constraint as a relation between variables that cannot be represented in the solution (the timetable), whereas objects are constraint satisfactions that can be represented in the representational system required for the solution. In terms of this distinction, scheduling develops within two problem spaces: the Constraints Space (CS) and the Objects Space (OS).

In this present study, we adopted the same approach used by Hoc et al. (in press), which examined representations processed during scheduling activity, although from within the context of an industrial task, scheduling some manufacturing orders in the form of a Gantt chart. In line with previous work, the viewpoint of constraints and objects management was adopted. Some operations on constraints (e.g., constraint formulation) and some operations on objects (e.g., object modification) define a low level of abstraction in the symbolic control of processing, and are known here as tactical activities. The complementary procedural viewpoint from which goals (e.g., minimizing makespan) and procedures (e.g., shortest processing time algorithm) are managed is described as a higher level of abstraction. Operations at this level (e.g., goal formulation, procedure formulation) are named strategic activities. From a cognitive and ergonomic perspective, the aim of this paper is to give some insight into expertise in scheduling. Our approach to describing scheduling deals with two complementary procedural and representational viewpoints. Our specificity is to stress the satisfaction of various and heterogeneous constraints, an important feature of scheduling problems, in a single representational system required for the solution (a Gantt chart).

Although laboratory studies are a useful source of information on scheduling, Crawford et al. (1999) criticized this method because of the absence of complexity, uncertainty, and disturbance, some of the major components of real dynamic manufacturing environments. MacCarthy et al. (2001) and Jackson et al. (2004) added that theoretical scheduling research dissociates scheduling problems from the context in which they occur. Scheduling not only implies resource allocation decisions, but also communication within and without networks, the collection and distribution of information, and the anticipation of problems. This has been observed previously (Jackson et al., 2004; Stoop & Wiers, 1996).

Obviously, our experimental approach to expertise will give rise to the same criticisms with regard to ecological validity as those formulated by these authors, for whom field study remains the most valid approach to understand scheduling practice. Our experimental

approach should be considered as complementary to this kind of study, but with a controlled ecological validity. Firstly, we gave the participants the overall information they may need in a real context. Secondly, all expert participants had a non-negligible experience of planning and scheduling. Thirdly, we developed a method to specifically study the cognitive aspects of industrial scheduling. Such a method is time-consuming to apply in real settings, because scheduling and other related activities (e.g., information gathering or negotiation with departments of the company) are spatially and temporally distributed. For that purpose, we needed to optimize the complexity of the task, which implied two major drawbacks. Most scheduling problems are NP-complex, and thus cannot be solved by assessing all possible schedules and choosing the best, especially for large industrial problems (van Wezel & Jorna, 2006). Our scheduling task is a single-machine situation, which can be solved using a combinatorial method. As stated above, the scheduling function in the real world is not only influenced by cognitive aspects, but also by social and organizational settings (Jackson & al., 2004). For example, when a disturbance occurs, social negotiations help schedulers to solve problems (Higgins, 1996) with, for example, the customer department (for due dates), the maintenance department (for maintenance periods), and the production department (for overlapping or dividing manufacturing orders). Negotiations enable the scheduler to have more flexibility and to relax constraints, particularly when there are conflicts between goals (Stoop & Wiers, 1996). The participants were unable to negotiate in this experiment but, as we will go on to see, they considered this a possibility.

In the next sections of this paper, we will present the main theoretical foundations of this experiment. First, we will consider two levels of abstraction in the cognitive control of processing involved in scheduling. We will also define these levels in terms of strategic and tactical activities. Then, within the tactical level, we will make a distinction between constraints and objects for describing scheduling activity, notably using the concept of Representation and Processing Systems (Hoc, 1988), which is similar to the notion of mental models or points of view. In the sixth section, we will also underline the properties of expert behavior that are relevant to the interpretation of the results of this study. In the seventh section, we will formulate the main hypotheses derived from the theoretical framework. The eighth section will describe the experimental task, the participants, the data-gathering and the data-coding methods. The ninth section will present the main results of the study. Finally, we will discuss the results and prospects for scheduling expertise and for interface design.

4 LEVEL OF COGNITIVE CONTROL IN PLANNING AND SCHEDULING

From a psychological perspective, scheduling as a cognitive activity implies planning mechanisms. Although a plan is often understood in the limited sense of an action plan, it can be more generally considered as an abstract representation that is capable of guiding activity during scheduling (Hoc, 1988). Thus, planning (and therefore scheduling) is an interactive combination of two complementary mechanisms: the elaboration and the use of plans.

Moreover, planning develops within abstract spaces and implies different levels of cognitive control. By studying changes of representation during reasoning and problem solving in an industrial systems context, Rasmussen (1983, 1986) defined two orthogonal dimensions in

abstraction. The first one, a whole-parts hierarchy (or refinement hierarchy according to Hoc, 1988), is used to describe the decomposition of a plan into its parts (details are abstracted from a lower space to a higher one). The second dimension considered useful for describing different levels of control of the cognitive processes in solving a scheduling problem, is the abstraction hierarchy (a means-ends hierarchy, or implementation hierarchy following Hoc, 1988). This concept defines a functional decomposition, which describes a system at different levels of abstraction using how and why relationships. The highest levels of the hierarchy define the system's functions (goals and purposes), whereas the lowest levels describe the physical component to implement these functions. For instance the general function of heating can be implemented by different technical systems (gas, electricity, fuel oil), which imply the use of different physical components that belong to distinct Representation and Processing Systems (Hoc, 1988; see below section 5). Different kinds of problems can be solved from these different levels.

In the context of scheduling activity, the cognitive control of processing can be described in terms of the abstraction hierarchy. Within this dimension, the highest level of abstraction concerns goals and procedures managed by the scheduler, whereas the lowest level of abstraction deals with their realization. We will see later that the implementation of goals and procedures are described in terms of constraints and objects management. The use of Rasmussen's levels of abstraction to study scheduling was previously suggested by MacCarthy et al. (2001, p.308): "If scheduling is to be studied via the mental models of the schedulers, then methods must be found (perhaps using Rasmussen's (1986) levels of abstraction) to investigate, exemplify, and differentiate models of the manufacturing facility, the scheduling information system or display, and the schedule itself".

Finally, to differentiate between the highest and lowest levels of abstraction in the control of processing, we will adopt the following terminology. Strategic activities are those with a high level of abstraction in the control of processing; for example, goal formulation or procedure formulation. Tactical activities are those activities that have a low level of abstraction in the control of processing; for example, operations of constraint formulation or object modification

5 COORDINATING MULTIPLE RPS IN AN EXTERNAL RPS: CONSTRAINT AND OBJECT MANAGEMENT

Our starting point is to consider that one important aspect of the scheduling process is the management of the constraints of a problem. McKay, Safayeni and Buzacott (1988) used surveys and case studies to produce a list of two hundred kinds of constraint that could be more or less important for schedulers. These constraints can vary from the due date of a manufacturing order, to the mood of the workers, or the climate. Moreover, 80% to 90% of human schedulers' time is spent in identifying problem constraints rather than actually dispatching (Sanderson, 1989). From these reports, we can reasonably assume that schedulers represent the scheduling problem they have to cope with as a set of constraints that need to be satisfied, some of which can be contradictory.

In the literature on scheduling, a constraint is seen as a rule that restricts the solution of a problem (van Wezel & Jorna, 2006). In this study, we propose borrowing a definition from the literature on design problem solving. From a cognitive viewpoint, the set of constraints

to be satisfied can be considered in terms of the Representation and Processing System (RPS), a notion introduced by Hoc (1988) in the context of design problem solving. According to Hoc (1988), a design problem is a task that is represented by the problem solver as the search for a detailed representation of the goal through shifts in representation format during problem solving. Thus, scheduling can be considered as a particular case of design problem solving, which “at some very abstract level, is the process of transforming one set of representations (the design brief) into another set of representations (the contract document)” (Goel, 1995, p.128). One difficulty for resolving design problems is that constraints belonging to the design brief can be expressed in various formats within the specifications, whereas the solution must be expressed in a single external representation system with a particular format. For instance, in architectural design, specifications of functional features, cost of materials, topologic constraints, metric constraints, and so on, are expressed in various formats and must be coordinated in a three-dimensional representation of a building (Lebahar, 1983).

The literature on industrial scheduling shows that schedulers must take into account heterogeneous information, which produces various scheduling problems. In the food-processing industry, for example, schedulers deal with limited machine capacity, shared resources, time and price of delivery, perishable goods and so on (Akkerman & van Donk, 2009). Within the same company, each unit can even be defined by its own characteristics in terms of, for example, throughput or setup time (e.g., in truck manufacturing – Wiers, 1996). Thus, the features of a particular manufacturing environment (e.g., aerospace, food, fashion clothing sector) imply its own constraints (MacCarthy & al., 2001). McKay et al. (1988) listed twenty-five sources of information, including the attitude of workers, variable processing time, and machine faults caused by a damp climate. For McKay et al. (1995), information can be official (ongoing rate, production rate) or informal (from the maintenance service, quality service, or customer service). For Fox (1990), scheduling not only satisfies obvious constraints such as processing time or due date, but also satisfies many others elsewhere in the plant.

From the perspective of an exploratory study, we restricted the complexity of the problem to these so-called obvious constraints. We define this multiplicity of information formats in terms of multiple and various RPS (representations linked to processing in RPS), which must be expressed in an external RPS with a particular format: in this study, we used a Gantt chart. Schedulers in manufacturing systems must take into account a number of constraints during the task of allocating job operations to machines and periods of time. Their aim is to meet performance criteria, such as the maximization of productivity or the minimization of lateness. This allocation is usually represented in an external RPS, namely a Gantt chart. This representation of scheduling must satisfy a set of constraints, starting with the duration of operations, due dates for manufacturing orders, and succession between operations. In other words, a Gantt chart only shows partial information about operations. Different Gantt chart formats exist, and each external representation system cannot represent constraints in the same way; some of them are visible whilst others remain hidden. Gibson and Laios (1978) compared several formats of external representation system for the presentation of scheduling information. For example, the Gantt chart format based on machines and time (the machine planning board) and the Gantt chart based on jobs and time (the job planning board) differed in terms of the ease with which the scheduler could detect free machine time to be filled (i.e., when the goal is to maximize machine occupation). Whilst the former

shows machine utilization, and thus periods of free time, it is less easy to see this with the latter.

In our study, we used the more common Gantt chart format, based on machines and time (time on abscissa and machines on ordinate). Here, job operations (i.e. manufacturing orders) are represented by bars that are proportional in length to the processing time required and are differently colored for each job. On this external RPS, some constraints are visible and others remain hidden. For example, on the Gantt chart in figure 16, we can see that manufacturing order 1 can be delivered at time t , but the due date could be $t+1$; the due date constraint is not directly expressed in this Gantt chart. On the contrary, precedence constraint is visible in the solution: the cutting operation takes place before the welding operation and before the painting operation. Operation duration is a constraint expressed in the solution by means of the length of the segment, which is proportional to the duration.

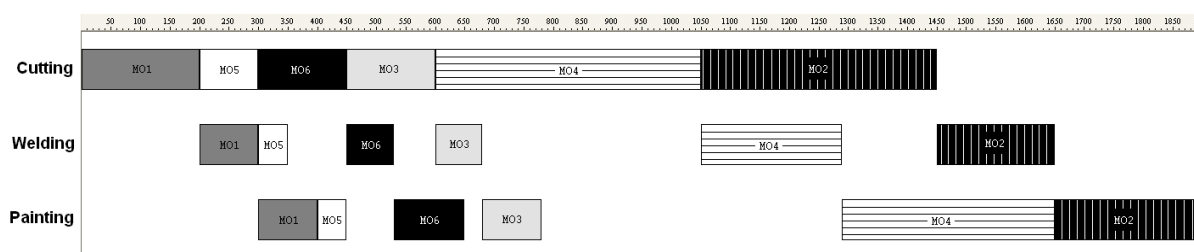


Figure 16: Example of a *Gantt* chart of 6 Manufacturing Orders (MO) of bicycles on LEKIN®. The due date constraint is not directly expressed in the *Gantt* chart whereas operation durations are constraints expressed in the solution (objects).

This distinction between visible and hidden constraints helps us to define two types of representation: constraint and object. These two notions are borrowed from the literature on design problem solving in which constraint management has been identified and modeled (Darses, 1991; Hoc, 1988; Stefik, 1981a; Visser, 2006). Because the notion of constraint is central in this domain, we have favored the reference to Stefik's (1981a) theoretical framework, elaborated within the context of planning experiments in molecular genetics. According to this author, a constraint is a relation between variables, which describes an object partially. Until now there has been no clear-cut distinction between the two entities. Our proposal is to define a constraint in the strictest sense as a relation between variables that cannot be represented in the solution (Gantt chart), whereas objects are constraint satisfactions and can be represented in the representational system required for the solution. As a result, the Gantt chart expresses objects, that is to say visible constraints (each segment in the Gantt Chart – figure 16), but cannot express hidden constraints (e.g., due date constraint). From this distinction we can describe operations on constraints and operations on objects. We assumed the involvement of two dual spaces during scheduling: the Constraints Space (CS) and the Objects Space (OS). Operations within and between these spaces define a low level of abstraction in the control of processing – namely tactical activities. As developed in the previous section, the highest level of abstraction in the control of processing implies the procedural viewpoint of procedures and goals management, some kind of strategic activities. Finally, in our study, scheduling will be described with strategic and tactical activities, and, within the tactical level, with operations within and between the CS and the OS.

6 THE SCHEDULING EXPERTISE

Although cognitive psychology literature cannot provide a consensual definition of expertise (Cellier, Eyrolle, & Mariné, 1997), it is often described as a state reached after a long experience in a particular domain (Chi, Glaser, & Farr, 1988; Ericsson & Smith, 1991). In industrial scheduling, expertise may take a long time to develop, in the same way that expertise in chess is acquired (McKay, Buzacott, Charness & Safayeni, 1992).

The study of expertise in scheduling is quite difficult because of a scarcity of expert operators and because the precise definition of a scheduler is not consensual. This latest idea was expressed in the work of Crawford et al. (1999, p.68-69): "Businesses often do not define the people who are contributing to scheduling as schedulers; if there is still such a debate about what scheduling actually is then who is to say that researchers have an accurate view of what a scheduler is and does within a business?". For this reason, planning and scheduling can be seen as a continuum of activities and roles (MacCarthy & al., 2001). On the shop floor, between 10% and 20% of schedulers' time is spent in scheduling; the rest is spent determining relevant information that might affect the current schedule (Fox, 1990). For that reason, schedulers are, in the main, production managers. Moreover, students are trained in production management in general rather than in scheduling in particular. After leaving school, most of them become production managers. Therefore, a comparison of experts and novices in production management, as carried out in the present study, is a relevant approach.

From among the general characteristics of expertise, we will present those that are relevant to scheduling activity and for the interpretation of the results of our study. Cellier et al. (1997) showed that experts have more planning ability than novices for two reasons. Firstly, experts have a great capacity for anticipation. Secondly, experts are able to access a more global and functional (abstract) representation of the system. Consequently, they have better abstraction abilities. By using a top-down planning strategy, experts can progressively refine an abstract plan that is formulated in terms of goals (Hoc, 1988). Within the scheduling domain, one of the goals managed by experts is the introduction of a margin into a schedule in order to anticipate disruptions and to facilitate rescheduling (McKay et al., 1995). Another goal is related to the ability to maximize the utilization of resources and minimize the average lateness of orders (McKay et al., 1992).

Another general feature of expertise is that the structure of knowledge differs among experts and novices (Glaser & Chi, 1988). Such a difference can lead to different types of problem-solving guidance. Novices are guided on the sole basis of surface features of the problem. By contrast, experts spend quite a long time in identifying the deeper principle of the problem; thus, they are guided on the basis of a problem's deeper features (Larkin & Reif, 1979). This difference in terms of problem-solving guidance is also related to the definition of meaningful cues in a particular environment. Although experts are able to control their activity on the basis of internal representations, they are also able to extend their cognition toward their environment, defining meaningful cues within it that are capable of guiding their cognitive processes (Hoc & Amalberti, 2007). In extending Gibson's (1979) definition of the affordance concept, Hoc and Amalberti (2007) considered that experts could control their activity from the perception of cues that suggest their actions. The main reason for this extension of cognition is the management of mental workload

within acceptable limits. From our conceptualization we could assume that an expert do not need to make explicit the deeper structure of the constraints (a relation between variables) satisfied by an object. In a certain extent, experts can manipulate objects directly without processing the constraints they satisfy. More precisely, this deeper structure of scheduling problems is an encapsulated knowledge, and can be extended, if necessary (e.g., Boshuizen & Schmidt, 1992, in medical domain). Previously, Zhang and Norman (1994) showed that problem solving is founded on internal and external representation. From their study, we found properties of external representations that are compatible with our definition of an object, including: acting as memory aids, providing information that can be directly perceived and used without being interpreted, anchoring and structuring cognitive behavior, and making a task easier.

Finally Glaser and Chi (1988) stated that the content of knowledge is also determined by expertise, because experts possess greater domain knowledge than novices. Scheduling activity is also influenced by this characteristic, because schedulers can change the specifications of a scheduling problem by, for instance, modifying constraints or objectives (McKay et al., 1992). In some contexts (e.g., time pressure), experts can violate or relax some constraints (Higgins, 1996) to create an alternative schedule that is related to a performance criterion prescribed by the company (McKay et al., 1995).

7 HYPOTHESES

Some main hypotheses can be put forward, based on our discussions on previous theoretical and experimental results.

In accordance with the work carried out by Cellier et al. (1997) relating to abstraction abilities, experts may use a more abstract and functional representation of the scheduling problem than novices. Here, the control of processing during scheduling would be on a strategic level, and planning guidance would be used by experts in a top-down way, progressively refining an abstract plan that is formulated in terms of goals (Hoc, 1988). A first specific goal pursued by experts could be the introduction of a margin into their Gantt chart (McKay et al., 1995). A second goal could be to minimize waiting time in order to maximize resource utilization (McKay et al., 1992).

In line with Hoc and Amalberti (2007), we expected a wider usage of the required external representation format by experts than by novices. On a Gantt chart, objects could play the role of affordances and suggest manipulations. As a result, experts may be able to perform more operations on objects, as guidance representation, than novices. Such a result could be of interest for defining computer interfaces that are capable of supporting the scheduling activity.

In order to break the deadlock and find a new solution, an expert could change the specifications of a scheduling problem by violating or relaxing some constraints (Higgins, 1996; McKay et al., 1992).

8 METHOD

8.1 PARTICIPANTS

The twelve novices were students in production management, recruited from the University of Nantes (IUT: Polytechnic Institute). These students had a theoretical knowledge of scheduling methods, concepts, and rules and were familiar with the Gantt chart. Despite difficulties in finding available experts, six volunteers participated in the experiment. They were former students of the polytechnic institute, who had global experience in production management and scheduling (a high knowledge of realistic conditions of production), and were also familiar with the Gantt chart tool. All had worked for French companies for at least five years (mean: 9 years; standard deviation: 4.7 years); these companies were all involved in various types of manufacturing processes. A summary of the information gathered in relation to the six, in terms of gender, years of experience, type of company, occupation, is presented in table 5.

Participant	Gender	Years of experience	Type of company	Occupation
A	F	5	Large ship manufacturer	Scheduling
			Aircraft manufacturer	Logistics, Scheduling
			Large communication equipment and software manufacturer	Logistics, Scheduling
B	F	18	Large automobile manufacturer	Planning
			Furniture company	Planning
			Large electrical goods company	Planning
C	M	10	Stationery manufacturer	Planning
D	F	6	Aircraft manufacturer	Production management
E	F	7	Ship equipment manufacturer	Foreman, Scheduling
			Large ship manufacturer	Logistics, Scheduling
F	M	8	Large electronic components manufacturer	Scheduling
			Nursery nursing company	Stock supply
			Large electronic components manufacturer	Scheduling, Planning

Table 5: Information about the six experts of the study.

This study was initially conducted with a longitudinal and transversal paradigm. The objective was to study the evolution of scheduling strategies by comparing three levels of expertise: students before an internship, students after an internship, and experts. Ten of the twelve students (two succumbed to experimental mortality) solved a modified version of the scheduling task, following a four-month internship in production management. We assumed this experience provided them with realistic production conditions (e.g., disturbances that can affect the validity of a schedule and may imply rescheduling). However, no differences appeared between the novices before and after the internship, and we decided to use an average for the results of the comparison between experts and novices.

8.2 EXPERIMENTAL TASK

In order to optimize complexity, which should be neither too difficult for novices, nor too easy for experts, the participants were set a problem that was taken from a textbook case. The experimental task was divided into two stages. The aim of the first stage was to schedule six Manufacturing Orders (MO) of bicycles using three consecutive machines (cutting, welding, and painting) in a flow shop. Each participant was given an instruction sheet that showed the MO and their constraints: processing time, and due date (table 6).

MO	Goods	Processing Time			Due Date
		Cutting	Welding	Painting	
1	10 blue bicycles for men	200 min	100 min	100 min	400 min
2	20 red bicycles for men	400 min	200 min	240 min	1800 min
3	10 blue bicycles for women	150 min	80 min	100 min	1500 min
4	30 red bicycles for women	450 min	240 min	360 min	2050 min
5	5 blue bicycles for men	100 min	50 min	50 min	1850 min
6	10 red bicycles for women	150 min	80 min	120 min	1500 min

Table 6: Manufacturing order and constraints of the scheduling stage.

The participant had to achieve two classic/frequent goals in production management: maximize productivity, and minimize the number of late jobs. Participants were asked to continue working until they felt satisfied that they had achieved a solution that met both criteria. Moreover, they were aware of the likelihood of disturbances: "Lately we observed disturbances on machines of the shop. We called a company of troubleshooting to control the machines, but we don't know when and how many times the company will proceed".

Each participant had to use LEKIN® (Feldman & Pinedo, 2001) to schedule the six MO (figure 16): LEKIN® is a scheduling system developed at the Stern School of Business, NYU. It is an educational tool with the main purpose of introducing the students to scheduling theory and its applications. With this system, the user may modify a chart by moving the MO on the screen. However, MO moves that violate operation precedence constraint are barred.

There were several reasons for choosing this tool. First of all, even with manufacturing scheduling software such as Preactor or Ortems, no "standard" scheduling software exists. In industry, some companies use ERP (Enterprise Resource Planning), production management software that has scheduling functions, whilst others use Excel® to schedule production (e.g., the aircraft manufacturer Airbus). Moreover, in order to study expertise in this type of activity, it is important to control expertise in the use of a specific piece of software (Garrett, Caldwell, Harris, & Gonzalez, 2009). Although LEKIN® proposes priority rules and optimization algorithms, we opted for the ease of the manual mode, learned during a training stage. Each participant had as much time as was needed for making his or her final schedule. When the participant was satisfied with his/her solution, a second stage of the experiment was conducted. Information about period and duration of maintenance was given and the participant was invited to reschedule in order to consider this information (table 7). The same goals (maximizing productivity and minimizing the number of late jobs) had to be achieved.

Machine	Period	Duration
Cutting	1400 – 1600 min	200 min
	600 – 800 min	200 min
Welding	900 – 1100 min	200 min
	1600 – 1700 min	100 min
Painting	No maintenance	

Table 7: Information about periods and duration of maintenance for rescheduling stage.

One difficulty encountered with this task was the participants' inability to satisfy all constraints simultaneously, especially in terms of due dates and periods of maintenance. Finally, for the two stages of the task, participants could record each scheduling (or rescheduling) solution with a save button in LEKIN®. This functionality gave participants the possibility of comparing several solutions during scheduling. For MacCarthy and Wilson (2001), performance in scheduling is difficult to assess, even for industrial companies (MacCarthy et al., 2001). Several criteria can be used for evaluating a schedule, such as the proportion of jobs completed, machine utilization, or the time taken to produce the schedule (Gibson & Laios, 1978). In our study, we distinguished between two types of criteria: behavioral and industrial. From a behavioral viewpoint, performance was assessed in terms of completion time and in terms of number of schedules recorded during each stage (scheduling and rescheduling) of the task. We assumed that the latter criterion could point out a cognitive cost. From an industrial viewpoint, performance was assessed in terms of Makespan (the total duration of the schedule), number of late manufacturing orders, and total lateness.

8.3 DATA COLLECTION, CODING METHOD AND CODING SCHEME

We collected "thinking aloud" verbal reports and obvious actions on the Gantt chart while participants performed the scheduling task. Protocol analysis was conducted using an encoding method, with a predicate-argument structure supported by MacSHAPA software (Sanderson et al., 1994). The following coding scheme consists of two main classes of activities, which describe two levels of abstraction in the control of processing during scheduling activity. Strategic activities relate to procedure and goal management, and constraint violation. Tactical activities involve a set of operations, which are represented by arrows within the Constraints Space (CS), Objects Space (OS), and for transitions from one space to the other, or from the specifications (or designer's preferences) to the CS (figure 17). A more detailed explanation of the OS and CS methods and description can be found in Hoc et al. (in press).

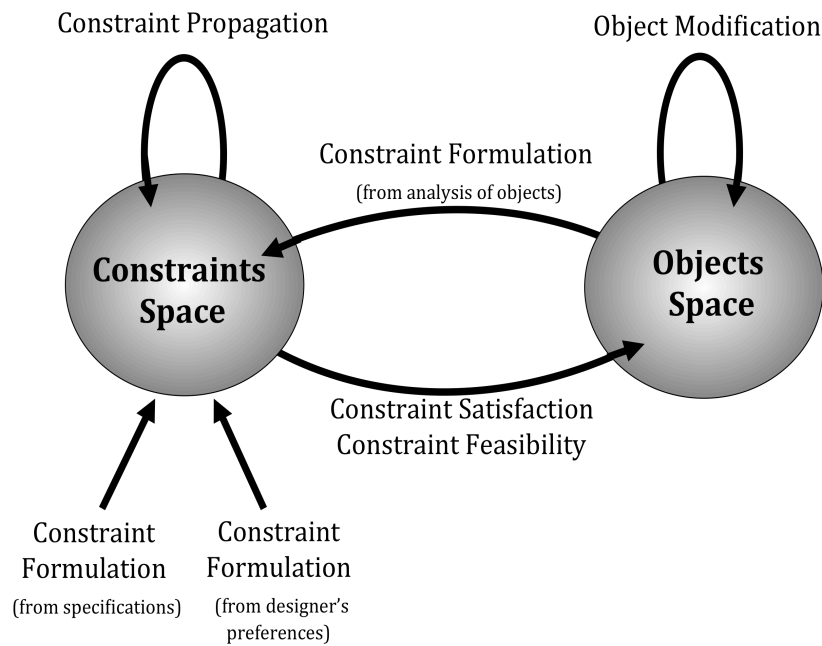


Figure 17: Operations within and between Constraints Space and Objects Space (tactical level of control), after Hoc et al. (in press).

In the following sub-sections, we will briefly define each predicate. In the appendix, argument definitions and examples extracted from the protocols are presented for each predicate; these illustrate the encoding method.

8.3.1 STRATEGIC ACTIVITIES

From a high level of abstraction in the control of processing, strategic activities organize a set of actions during scheduling problem solving. They relate to procedure formulation, goal formulation or evaluation, and constraint violation.

Procedure Formulation (PR-FORM) is related to a high level of activity. In this study a procedure could be a scheduling rule (or priority rule): for example, EDD (Earliest Due Date – First select operation on the job with the earliest due date), SPT (Shortest Processing Time – First select operation on the job with the shortest processing time), or LPT (Longest Processing Time – First select operation on the job with the longest processing time). A procedure could also be related to a particular application domain. For instance, choose operations with white paint before those with dark color.

Goal Formulation (GOAL-FORM). A goal leads an operator's activity. In this study, the goals formulated were: minimizing Makespan, minimizing job lateness, minimizing waiting time (the time a job must wait before being processed), and introducing margin (between manufacturing orders) to anticipate maintenance.

Goal Evaluation (GOAL-EV): evaluating (positively or negatively) a result after an action of moving an MO on the Gantt chart. The evaluation criterion is a property of the schedule (e.g., waiting time between operations), or a performance indicator (e.g., total lateness).

Constraint Violation (CTR-VIOL) is an elimination of constraint. This is a strategic activity because it implies the redefinition of the scheduling task (pulling out of the restrictive frame

of the task). As stated previously, schedulers are able to negotiate in order to modify some constraints of the problem. Although the negotiation and modification of constraints are not covered in this study, experts have reintroduced this aspect with constraint violation.

8.3.2 TACTICAL ACTIVITIES

Although they belong to a low level of abstraction in the control of processing, these symbolic problem-solving activities imply attentional resources and are far from being automatized. They concern constraint formulation, propagation, feasibility, satisfaction, and object modification. These tactical operations can be described within two dual spaces: the Constraints Space (CS) and the Objects Space (OS). In general, operations on constraints were more commonly reported than operations on objects, which were more visible. The latter were coded on the basis of actions on the interface without verbal reports.

1) Transition operations from the specifications or designer's preference to the CS

- *Constraint Formulation* (CTR-FORM) is the addition of a new constraint into the scheduling process, which is not generated from the propagation of existing constraints. The predicate CTR-FORM codes a relation between the three variables: Order, Operation-machine, and Period. Each constraint formulation was qualified from the viewpoint of the origin of the constraint, that is to say its mode of introduction into the scheduling process: a) prescribed (specifications that can be identified before scheduling and cannot be ignored, including validity constraints); b) deduced (stemming from an analysis of the state of the solution, i.e., from the objects already defined); and c) introduced (stemming from the scheduler's knowledge or preferences).

2) Operations within the CS

- *Constraint Propagation* (CTR-PRG) is the creation of a new constraint from already expressed constraints. This operation combines a set of previous constraints.

3) Transition operations from the CS to the OS

- *Constraint Feasibility* (CTR-FEAS): considering whether an object is available for constraint satisfaction. Constraint feasibility activity ends when the test is finished; that is to say, when the scheduler has answered the question (either with a verbal report or an action).
- *Constraint Satisfaction* (CTR-SATF): associating acceptable values with variables in order to make an efficient combination in the scheduling process. The scheduler shifts from CS to OS in order to define an object capable of satisfying the constraint. We code a satisfaction when an object is modified only in relation to a previous constraint management (e.g., formulation and propagation).

4) Operations within the OS

Unlike operations on constraints, operations on objects can be viewed on the Gantt chart and are not linked to verbal reports of constraints.

- *Object Modification* (OBJ-MOD): modifying one value of an object.

5) Transition operations from the OS to the CS

The same predicate CTR-FORM, described previously is used. The value “deduced” from the “origin” argument enables the identification of this particular transition, which results from the analysis of objects on the Gantt chart (e.g., free time).

8.4 STATISTICAL METHODS

Two main methods were used for the statistical analysis of the data. First, a principal components analysis (PCA), a variant of factorial analysis (Jambu, 1991), was performed with the support of Statistica® (version 6). Second, a Bayesian statistical inference was used (fiducial inference: Lecoutre & Poitevineau, 2005; Rouanet, 1996) to draw conclusions in terms of population effect sizes (δ) or calibrated effect size (δ/σ : the ratio between the population effect and the appropriate indicator of the individual differences for the effect) and to go beyond a conclusion in the sole terms of non-null effects. On the basis of a maximal a priori uncertainty, this method was complementary to the traditional Null Hypothesis Significance Testing, enabling us to determine a probabilistic judgment on the population effect size. It served to extend the Bayesian interpretation of the confidence interval so that, after the experiment, it is possible to consider the range of values for the parameter with an acceptable guarantee (e.g., $\delta > a$, “a” considered as notable or $|\delta| < \varepsilon$, “ ε ” being negligible). In the results section, statements on population effect correspond to a probability of .90. When no relevant conclusion could be reached, at least with this guarantee, we have noted this as “no gen.”, meaning that no generalization in terms of population effect size could be reached.

9 RESULTS

First, we will present the PCA results for the scheduling and the rescheduling stage. By discriminating some strategic operations (such as goal formulation and evaluation for the scheduling stage, constraint violation for the rescheduling stage), it was possible to identify two levels of abstraction in the cognitive control of processing. We will then go on to compare all strategic operations (including procedure formulation, goal formulation and evaluation, constraint violation) and all tactical operations (such as constraint formulation, and propagation). The types of goals formulated during scheduling activity will be reported. We will then outline distinctions between operations that imply the Constraints Space, operations within the Objects Space, and transitions between predicates. Finally, the descriptive differences between groups with regard to the performance of the participants will be presented.

9.1 LEVELS OF CONTROL

PCA underlines the first axes, leading to the same interpretation for both the scheduling and rescheduling stages. These first axes denominate the level of control. With regard to the former stage, the first axis is bipolar (explaining 41% of the variance), and contrasts two classes of activities (cumulated contribution of 86% to the first axis): tactical operations of constraint management (constraint formulation, propagation and satisfaction) versus strategic operations (goal formulation and evaluation) to which expertise is correlated. As stated previously, these two classes of activities are interpreted in terms of the levels of abstraction in the control of processing. Tactical operations define a low level of abstraction

whereas strategic operations involve a high level of abstraction. With regard to the rescheduling stage, the first axis is also bipolar (explaining 32% of the variance), and contrasts two classes of activities (cumulated contribution of 69% to the first factor): tactical operations (low level of control) of constraint management (constraint formulation, propagation and satisfaction), versus strategic operations (high level of control: constraint violation, goal formulation and evaluation) to which expertise is correlated. In our study, constraint violation appeared only during the rescheduling stage and related to constraints about periods of maintenance. We conducted a Bayesian statistical inference on the new variable (level of control) resulting from the PCA axes (table 8).

	Novices		Experts		Calibrated effect (d/s)	t test ($\alpha = .05$)	Calibrated effect size (δ/σ)
	Mean	Standard Deviation	Mean	Standard Deviation			
Level of control (scheduling)	-0.73	1.83	1.46	1.10	-1.34	$t(16) = -2.68$ $p < .025$	$P(\delta/\sigma < -0.61) = .90$
Level of control (rescheduling)	-0.83	1.36	1.67	1.65	-1.72	$t(16) = -3.43$ $p < .0045$	$P(\delta/\sigma < -0.94) = .90$

Table 8: Comparison of novices and experts on level of control (first axis) used for scheduling and rescheduling (a positive value means a high level of control and a negative value means a low level of control).

Since the unit is arbitrary, we assessed the population effect size in relation to individual differences; thus, the effect was calibrated. For both stages, we can conclude that there was a notable effect. In terms of a comparison of novices and experts, experts used the strategic level for both the scheduling and rescheduling stages more frequently.

9.2 ALL STRATEGIC OPERATIONS VERSUS TACTICAL OPERATIONS

	Novices		Experts	
	Mean	Standard Deviation	Mean	Standard Deviation
Strategic operations (scheduling)	34.6	11.8	43.7	20.9
Tactical operations (scheduling)	65.4	11.8	56.3	20.9
Total	100.0 ($\bar{N} = 89.7$)		100.0 ($\bar{N} = 89.5$)	
Strategic operations (rescheduling)	10.7	3.6	21.0	4.7
Tactical operations (rescheduling)	89.3	3.6	79.0	4.7
Total	100.0 ($\bar{N} = 82.9$)		100.0 ($\bar{N} = 47.3$)	

Table 9: Percentage of all strategic operations and tactical operations during scheduling and rescheduling stage. (\bar{N} is the mean frequency).

Table 9 shows that, regardless of the level of expertise and stage of the task, tactical operations are much more frequent than strategic operations (72.5% vs. 27.5%). This difference is greater for the rescheduling stage (84.2% vs. 15.8%) than for the scheduling one (60.9% vs. 39.1%). Moreover, whatever the stage of the task, the percentage of strategic operations for experts is much higher than for novices (32.4% vs. 22.7%). We cannot conclude to a significant difference for the scheduling phase, $d = 43.7 - 34.6 = 9.1\%$; $t(16) = 1.20$, $p > .24$; $\delta > -1.1\%$. However, for the rescheduling stage, the difference is significant, $d = 21.0 - 10.7 = 10.3\%$; $t(16) = 5.23$, $p < .001$, and Bayesian inference proves that it is notable ($\delta > 7.7\%$). This result is consistent with the analysis of the first axis from the PCA.

9.3 TYPES OF GOALS FORMULATED

	Novices		Experts	
	Mean	Standard Deviation	Mean	Standard Deviation
Minimizing Makespan	0.50	0.20	0.20	0.22
Minimizing job lateness	0.25	0.16	0.17	0.15
Minimizing waiting time	0.15	0.16	0.47	0.26
Introducing margin to anticipate maintenance	0.10	0.16	0.16	0.34
Total	1.0 ($\bar{N} = 4.2$)		1.0 ($\bar{N} = 4.7$)	

Table 10: Proportion of types of goal formulated during scheduling stage (\bar{N} is the mean frequency). On average, novices formulated 4.2 goals and experts formulated 4.7 goals.

Table 10 shows that, during the scheduling stage, novices formulated the goal of "Minimizing Makespan" (the total duration of the schedule) more frequently than experts, $d = 49.0 - 19.4 = 29.6\%$; $t(16) = 2.72$, $p < .02$; $\delta > 15.1\%$. On the contrary, experts formulated the goal of "minimizing waiting time" more frequently than novices, $d = 46.8 - 14.5 = 32.3\%$; $t(16) = 3.34$, $p < .005$; $\delta > 19.4\%$. We assumed the goal of "minimizing waiting time" corresponded to minimizing machine idle time, which is equivalent to maximizing machine utilization. These goals deal with periods of non-productivity. Goals formulated during rescheduling were not considered because of their very low frequency.

9.4 OPERATIONS IMPLYING THE CONSTRAINTS SPACE VERSUS OPERATIONS WITHIN THE OBJECTS SPACE

9.4.1 SCHEDULING STAGE

During the scheduling stage novices produced, on average, 62 operations that imply constraints or objects, whereas experts produced 51 operations. Moreover, whatever the group, object modification represents about 50% of the operations at this stage (figure 18).

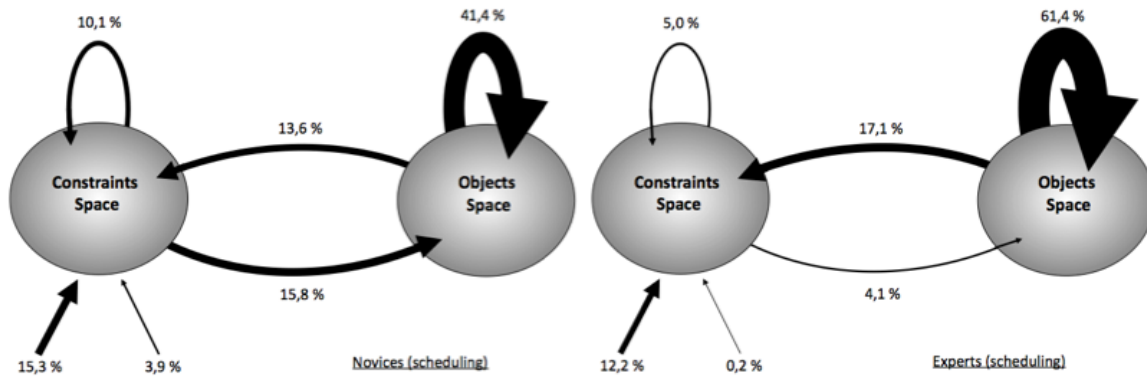


Figure 18: Relations between spaces for novices (on the left) and experts (on the right) for the scheduling stage. The arrows' represents a ratio of operations (predicates).

Operations within the OS are much more frequent for experts than for novices, $d = 61.4 - 41.4 = 20.0\%$; $t(16) = 2.11$, $p < .051$; $\delta > 7.3\%$). Conversely, the percentage of operations implying constraints is much higher for novices than for experts, especially:

- Constraint formulation from preferences, $d = 3.9 - 0.2 = 3.7\%$; $t(16) = 3.61$, $p < .003$; $\delta > 2.3\%$
- Constraint propagation, $d = 10.1 - 5.0 = 5.1\%$; $t(16) = 2.25$, $p < .04$; $\delta > 2.1\%$
- Constraint satisfaction, $d = 15.8 - 4.1 = 11.7\%$; $t(16) = 2.73$, $p < .02$; $\delta > 6.0\%$

9.4.2 RESCHEDULING STAGE

During the rescheduling stage, novices produced, on average, 74 operations that imply constraints or objects, whereas experts produced 38 operations. Moreover, whatever the group, constraint formulation from specifications represents about 38% of the operations at this stage (figure 19).

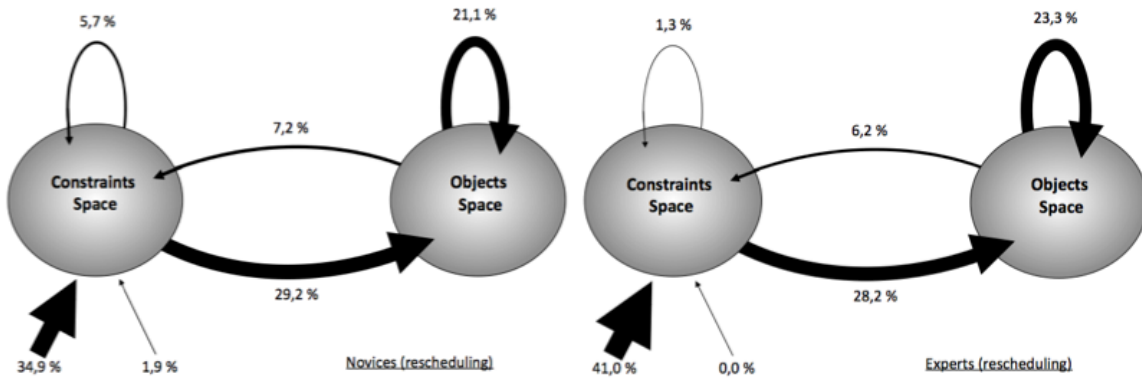


Figure 19: Relations between spaces for novices (on the left) and experts (on the right) for the rescheduling stage. The arrows' represents a ratio of operations (predicates).

This operation is much more frequent for experts than for novices, $d = 41.0 - 34.9 = 6.1\%$; $t(16) = 2.12$, $p < .051$; $\delta > 2.3\%$. Other operations imply constraints that are much more frequent for novices than for experts, especially:

- Constraint formulation from preferences, $d = 1.9 - 0.0 = 1.9\%$; $t(16) = 2.30$, $p < .04$; $\delta > 0.8\%$
- Constraint propagation, $d = 5.7 - 1.3 = 4.4\%$; $t(16) = 2.89$, $p < .02$; $\delta > 2.4\%$

9.5 ANALYSIS OF DIRECT TRANSITIONS FROM A CONSTRAINT FORMULATION

This analysis of predicates covers transitions between tactical operations and strategic ones for the scheduling and rescheduling stages. We performed an analysis of the 1-order transitions from the predicate CTR-FORM to other predicates (20 for novices, 13 for experts for the scheduling stage, and 32 for novices, 18 for experts for the rescheduling stage), in order to gain more insight into the strategies. In particular, we compared the percentages of direct transitions toward tactical operations of constraints management and toward strategic operations. For the scheduling stage, experts show more frequent transition to strategic activities than novices, $d = 23.6 - 7.3 = 16.3\%$; $t(16) = 2.91$, $p < .02$; $\delta > 8.8\%$, and novices show more frequent transition to tactical activities implying constraints than experts, $d = 73.6 - 51.3 = 22.3\%$; $t(16) = 2.13$, $p < .05$; $\delta > 8.3\%$. The same results were obtained for the rescheduling stage, experts show more frequent transition to strategic activities than novices, $d = 14.9 - 3.5 = 11.4\%$; $t(16) = 4.16$, $p < .001$; $\delta > 7.7\%$) and novices show more frequent transition to tactical activities implying constraints than experts, $d = 89.4 - 76.3 = 13.1\%$; $t(16) = 3.33$, $p < .005$; $\delta > 7.8\%$. This is consistent with the greater tendency to work with constraints by novices than experts, and with the high level of control (strategic activities) shown by experts than novices.

9.6 PERFORMANCE

For the scheduling and rescheduling stages, performance was assessed from a behavioral viewpoint (completion time, number of schedules recorded), and from an industrial viewpoint (*Makespan*, number of late manufacturing order, *Total Lateness*). For the scheduling step, the criterion of "difference in completion time" is marginally significant. The difference, which is a greater completion time for experts than for novices, is not negligible, $d = 22.0 - 15.0 = 7.0$ min; $t(16) = 1.67$, $p > .11$; $\delta > 1.3$ min. For the rescheduling stage, the

“industrial” performance tends to be better for experts (less lateness is better than more lateness). The criterion “number of manufacturing order in late” is better for experts but marginally significant and the difference is not negligible, $d = 1.2 - 0.5 = 0.7$; $t(16) = 1.76$, $p > .09$; $\delta > 0.2$. Finally, the criterion “total lateness” is better for experts but marginally significant and the difference is notable, $d = 365.8 - 50.3 = 315.5$ min; $t(16) = 1.77$, $p > .09$; $\delta > 77.1$ min.

10 DISCUSSION

Before discussing the results of this study, we will sum up the main findings about the significant and notable differences (inferential analyses) between experts and novices (table 11).

Level of control	Scheduling - First axis: high level of control (goal formulation and evaluation) vs. low level of control (constraint formulation, propagation and satisfaction)	High level of control: E > N
	Rescheduling - First axis: high level of control (constraint violation, goal formulation and evaluation) vs. low level of control (constraint formulation, propagation and satisfaction)	High level of control: E > N
All strategic operations vs. tactical operations	Rescheduling	All strategic operations: E > N
Types of goal formulated	Scheduling	Minimizing Makespan: E < N
		Minimizing Waiting time: E > N
Operations implying the Constraints Space vs. operations within the Objects Space	Scheduling	Constraint formulation from preferences: E < N
		Constraint propagation: E < N
		Constraint satisfaction: E < N
	Rescheduling	Object modification: E > N
		Constraint formulation from specifications: E > N
		Constraint formulation from preferences: E < N
Direct transitions from a constraint formulation	Scheduling	Constraint propagation: E < N
		Transitions to strategic activities: E > N
	Rescheduling	Transitions to tactical activities implying constraints: E < N
		Transition to strategic activities: E > N
		Transition to tactical activities implying constraints: E < N

Table 11: Summary of results (percentage). All differences between experts (E) and novices (N) are significant and notable.

Two major results related to expertise in scheduling appeared in this study: the high level of control with the use of strategic activities, and the external control of cognition with the use of the Objects Space. These differences provide some insight into the nature of expertise in industrial scheduling.

First, a PCA showed that experts adopted a more strategic level of control than novices during the scheduling and rescheduling stages. This was especially the case for goal formulation and the evaluation of so-called strategic activities. This finding confirms

abstraction ability in terms of a more abstract and functional representation of the scheduling problem for experts than for novices (Cellier et al., 1997; Rasmussen, 1986). Guidance at this strategic level of planning relates to goals refined by experts (Hoc, 1988), particularly the minimization of waiting time, with the probable aim of maximizing machine utilization (McKay et al., 1992.). On the contrary, novices tried to minimize the Makespan (total duration of the schedule). Maximizing machine utilization is related to the workload on the shop floor. In this study, experts favored the minimization of workers' free time over faster production. On the other hand, the goal of introducing a margin into the Gantt chart was not observed. McKay et al. (1995) pointed out that pursuing this goal was useful for anticipating disturbances and to facilitate rescheduling. The reason for this is possibly our choice of disturbances (uncertain duration and periods of maintenance). In future research work, other disturbances could be used, including the arrival of urgent orders, order cancellations, and stock supply issues (Davenport & Beck, 2000; Hoc et al., 2004; McKay et al., 1995; Sanderson, 1989). Moreover, two other results confirmed that experts used a higher level of control. In the rescheduling stage, experts formulated more strategic operations, mixed in nature, than novices. The analysis of direct transitions from a constraint formulation also showed that experts were more able than beginners to use strategic activities.

Second, besides goal formulation and evaluation, the strategic level of control appearing from the PCA for the rescheduling stage involves constraint violation. Eliminating a constraint is a strategic operation because it implies the redefinition of the scheduling task. On the shop floor, schedulers can modify constraints, and some modifications are negotiated (Higgins, 1996). Although negotiation and the modification of constraints were not covered in this study, experts did reintroduce this aspect with constraint violation. The constraints violated were exclusively periods of maintenance introduced during the rescheduling stage. The appearance of these constraints produced conflicts with due dates, because the participants were unable to satisfy the constraints simultaneously (a feature of the task). In order to find an acceptable solution, experts violated constraints of maintenance. This result shows the choice of favoring one goal (no delay for customers) at the expense of another one (maintenance of the machine) because of conflicting goals (Higgins, 1996; Mietus, 1994; Tabe & Salvendy, 1988). In this task it seems that experts preferred to negotiate with the maintenance department than with the customers.

Third, experts performed fewer constraint management operations than novices, particularly constraint propagations. While experts executed more object modification (within-OS operations), novices appeared to rely more heavily on constraint propagations. In other words, experts are more likely than novices to handle objects, i.e. representations on the Gantt chart that enable greater visibility of the deeper structure of a constraint, which is more abstract. This wider usage of the required external representation formats by experts than by novices validates the hypothesis that the externalization of mental representations is a characteristic of expertise (Hoc & Amalberti, 2007).

Finally, although we found individual differences in level of control and in object management between experts and novices, it was not possible to draw inferential conclusions with regard to expertise. However, there was a notable difference during rescheduling for the criterion of "total lateness", which is better for experts. This difference

is closely linked to the favoring the due date at the expense of the constraints of maintenance, as stated previously.

11 CONCLUSION

Although this study was taken from a textbook case, the results were relevant to a better understanding of expertise in scheduling. In the study by Hoc et al. (in press), the description of the nature of expertise in university timetabling, as a particular case of scheduling, showed the same feature of mental representation externalization for experts in comparison with novices. Experts had a wider usage of the required external representation formats (objects) than did novices. In this study of expertise in an industrial scheduling task, it was argued that the ability to externalize mental representations appeared to be an invariant of expertise, with the aim of alleviating the workload. With similar results, the cognitive control model proposed by Hoc and Amalberti (2007) also seems to be relevant to the study of scheduling. This model was developed to describe different modes of dynamic situation management in which uncertainty is an important component. Uncertainty is also a major feature of industrial scheduling situations (Akkerman & van Donk, 2009; Higgins, 1996; McKay et al., 1988). Future work could focus on this feature, with a controlled ecological validity task.

However, some differences between university timetabling and industrial scheduling do exist. In university timetabling, for example, there was a prominence of constraint management activity, whatever the expertise level, in comparison with object management within the external RPS imposed for expressing the solution. In this study, and especially during the scheduling stage, object modification represents more than half of the operations, whatever the expertise level (figure 18). This difference must be linked to the type of external RPS imposed for expressing the solution: an Excel® spreadsheet for the task of university timetabling and a Gantt chart for the industrial scheduling task. With the Gantt chart proposed by LEKIN®, the movement of objects was easier to do than the movement of objects on the timetable.

Another difference between the two scheduling situations refers to the appearance of the strategic level in the cognitive control of processes in industrial scheduling. This was particularly the case for the procedures and goals managed by the scheduler. In industrial manufacturing scheduling, a number of algorithms (EDD for Earliest Due Date, LPT for Longest Processing Time, etc.) and goals (maximizing machine utilization, minimizing tardiness, etc.) are clearly identified and used, perhaps to minimize manufacturing costs. In the field of university timetabling, however, issues are different and no economic dimension is present (e.g., one dimension of performance is the “comfort” of students, assessed, for example, in terms of time lag given between exams, and waiting periods between courses).

In an industrial context, it is almost impossible to adopt an optimal schedule because of the large number of aspects of the problem to be taken into account (NP hard problems). A computer system that supports schedulers in the designing of a schedule must enable them to manage the complexity of such problems. In this study, we showed that experts use a higher level of control (more abstract). The question is one of finding a suitable abstraction level to guide the scheduling activity, thus reducing the complexity of the situations (number of constraints). This computer system could bear on the OS, because experts are able to

extend their cognition toward objects (external cognitive control). Future research work must be conducted with the same ergonomic perspective, because developing decision support for scheduling tasks is interesting both from a theoretical and practical viewpoint. A deeper understanding of problem solving and decision-making processes in scheduling is needed. In order to design an efficient human-computer system, the interface must facilitate the switch between internal and external representations. Higgins (1996) criticized the use of a Gantt chart because, he argued, this display does not show all the information that an operator may use to design a schedule; thus, it does not support the decision-making processes (e.g., inference, pattern recognition). Studies by Sanderson (1989) and Hoc et al. (2004) highlighted the importance of perceptive property of the interface in terms of perceptive suggestion of solution. As stated by Trentesaux, Moray and Tahon (1998), it may be of interest to explore the work of Vicente and Rasmussen (1990) on ecological interface design. The aim of these interfaces is to make visible any relevant information for the operator. For that purpose, the abstraction hierarchy is used to determine the constraints that should be displayed on external supports, which are compatible with several levels of processing. By using these interfaces, schedulers can do more than just see a solution to a scheduling problem; they are able to calculate a solution.

Finally it is important to specify that the scheduler's task is to design a schedule rather than to execute it. Therefore, one of the scheduler's roles is to contribute to the prescription of work on the shop floor (machines and workers). For example, in this study experts favored the maximization of machine utilization over the total duration of the schedule. In other words, they favored minimizing workers' free time over faster production. Scheduling decisions have an effect on workers; thus, it is important to understand the problem-solving processes of schedulers. From the perspective of designing an efficient human-computer system, such ergonomics recommendations must be taken into account in the design of production systems (Jensen, 2002).

12 APPENDIX: ILLUSTRATIONS OF PREDICATES

Predicates	Arguments	Examples
Strategic operations		
PR-FORM	Procedure:	"I'm going to arrange the manufacturing orders from the shortest to the longest " <i>SPT: Shortest Processing Time</i>
GOAL-FORM	Goal:	"I'm going to consider due dates in order to obtain the very least lateness as possible " <i>Minimizing job lateness</i>
GOAL-EV	Goal: Evaluation:	"There is a lot of margin, machines are not completely used" <i>Minimizing waiting time</i> <i>Negative</i>
CTR-VIOL	Origin: Manufacturing order: Machine: Period:	"Finally, I'm not going to integrate the first maintenance on the welding machine" <i>Prescribed</i> Not relevant here <i>Cutting</i> <i>Period</i>
Tactical operations		
<i>Transition operations from the specifications, the designer's preferences or the Objects Space toward the Constraints Space</i>		
CTR-FORM	Origin: Manufacturing order: Machine: Period:	"The duration of the welding stage for the MO 6 is 80 minutes" <i>Prescribed</i> 6 <i>Welding</i> <i>Duration</i>
<i>Operations within the Constraints Space</i>		
CTR-PRG	Origin: Manufacturing order: Machine: Period:	Combines two previous constraints: "The duration of the MO 1 is 400" Coded: CTR-FORM (<i>prescribed, MO1, <machine>, duration</i>) "The due date of the MO 1 is 400 " Coded: CTR-FORM (<i>prescribed, MO1, <machine>, due date</i>): To deduce that "the MO1 must be schedule in first" <i>Deduced</i> 1 <i>All</i> <i>Position (first)</i>
<i>Transition operations from the Constraint Space to the Objects Space</i>		
CTR-FEAS	Result:	"The period of maintenance for the cutting machine is OK " In this example, the scheduler considers satisfied the constraint about one period of maintenance <i>Feasible</i>
CTR-SATF		By moving a MO to another period, the scheduler is satisfying a constraint previously formulated
<i>Operations within the Objects Space</i>		
OBJ-MOD		The scheduler is moving a MO to another period without expression of any constraint

13 ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank students from the University of Nantes (France) as well as experts in production management for their participation.

14 REFERENCES

- Akkerman, R., & Donk, D.P. van (2009). Analyzing scheduling in the food-processing industry. *Cognition, Technology & Work*, *11*, 215-266.
- Baker, K.R. (1974). *Introduction to sequencing and scheduling*. New York: Wiley.
- Boshuizen, H.P.A., & Schmidt, H.G. (1992). On the role of biomedical knowledge in clinical reasoning by experts, intermediates and novices. *Cognitive Science*, *16*, 153-184.
- Cegarra, J. (2008). A cognitive typology of scheduling situations: a contribution to laboratory and field studies. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, *9*, 201-222.
- Cellier, J.M., Eyrolle, H., & Mariné, C. (1997). Expertise in dynamic environments. *Ergonomics*, *40*, 28-50.
- Chi, M., Glaser, R., & Farr, M. (Eds.). *The Nature of Expertise*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Crawford, S., MacCarthy, B.L., Wilson, J.R., & Vernon, C. (1999). Investigating the work of industrial schedulers through field study. *Cognition, Technology & Work*, *1*, 63-77.
- Darses, F. (1991). The constraint satisfaction approach to design: a psychological investigation. *Acta Psychologica*, *78*, 307-325.
- Davenport, A.J., & Beck, J.C. (2000). *A survey of techniques with uncertainty*. Unpublished Manuscript. Available: <http://www.eil.utoronto.ca/EIL/profiles/chris/zip/uncertainty-survey.ps.zip>.
- Ericsson, K.A., & Smith, J. (Eds.). (1991). *Toward a general theory of expertise*. New York: Cambridge University Press.
- Feldman, A., & Pinedo, M. (2001). Lekin (version 2.4) computer software. Retrieved from: <http://www.stern.nyu.edu/om/software/lekin/>
- Fox, M.S. (1990). Constraint-guided scheduling - a short history of research at CMU. *Computers in Industry*, *14*, 79-88.
- Gacias, B., Cegarra, J., & Lopez, P. (2010). Work domain analysis and ecological interface for the vehicle routing problem, *11th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems*, Valenciennes (France), August 31-September 3.
- Garrett, S.K., Caldwell, B.S., Harris, E.C., & Gonzalez, M.C. (2009). Six dimensions of expertise: a more comprehensive definition of cognitive expertise for team coordination. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, *10*, 93-105.
- Gibson, J.J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Mifflin.
- Gibson, R., & Laios, L. (1978). The presentation of Information to the Job-Shop Scheduler. *Human Factors*, *20*, 725-732.

- Glaser, R., & Chi, M.T.H. (1988). Overview. In M.T.H. Chi, R. Glaser, & M.J. Farr (Eds.), *The Nature of Expertise* (pp. xv-xxviii). Hillsdale: Lawrence Erlbaum.
- Goel, V. (1995). *Sketches of thought*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Higgins, P.G. (1996). Interaction in hybrid intelligent scheduling. *International Journal of Human Factors in Manufacturing*, 6, 185-203.
- Hoc, J.M. (1988). *Cognitive psychologie of planning* (C. Greenbaum, Trad). London: Academic Press (Original work published in 1987).
- Hoc, J.M., & Amalberti, R. (2007). Cognitive control dynamics for reaching a satisficing performance in complex dynamic situations. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1, 22-55.
- Hoc, J.M., Guerin, C., & Mebarki, N. (in press). The nature of expertise in scheduling: the case of timetabling. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*.
- Hoc, J.M., Mebarki, N., & Cegarra, J. (2004). L'assistance à l'opérateur humain pour l'ordonnancement dans les ateliers manufacturiers [Human operator support to manufacturing scheduling]. *Le Travail Humain*, 67, 181-208.
- Jackson, S., Wilson, J.R., & MacCarthy, B.L. (2004). A new model of scheduling in manufacturing: tasks, roles, and monitoring. *Human Factors*, 46, 533-550.
- Jambu, M. (1991). *Exploratory and Multivariate Data Analysis*. Orlando, FL: Academic Press.
- Jensen, P.L. (2002). Human factors and ergonomics in the planning of production. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 29, 121-131.
- Jorna, R. (2006). Cognition, planning, and domains: an empirical study into the planning processes of planners. In W. van Wezel, R.J. Jorna, & A.M. Meystel (Eds.), *Planning in intelligent systems: aspects, motivations, and methods* (pp. 101-135). Hoboken, NJ: Wiley.
- Kiewiet, D.J., Jorna, R.J., & van Wezel, W. (2005). Planners and their cognitive maps: an analysis of domain representations using multi dimensional scaling. *Applied Ergonomics*, 36, 695-708.
- Larkin, J., & Reif, R. (1979). Understanding and teaching problem solving in physics. *European Journal of Science Education*, 1, 191-203.
- Lebahar, J.C. (1983). *Le dessin d'architecte*. Roquevaire, France: Editions Parenthèses.
- Lecoutre, B., & Poitevineau, J. (2005). Le logiciel « LePAC » [PAC Software: English version available]. *La Revue de Modulad*, 33 (whole volume). Retrieved [22.12.10] from: <http://www.univ-rouen.fr/LMRS/Persopage/Lecoutre/PAC.htm>
- MacCarthy, B.L. & Wilson, J.R. (2001). The human contribution to planning, scheduling and control in manufacturing industry. In B.L. MacCarthy & J.R. Wilson (Eds.), *Human performance in planning and scheduling* (pp. 3-14). London: Taylor & Francis.
- MacCarthy, B.L., Wilson, J.R., & Crawford, S. (2001). Human performance in industrial scheduling: a framework for understanding. *International Journal of Human Factors in Manufacturing*, 11, 299-320.

- McKay, K.N., Safayeni, F.R., & Buzacott, J.A. (1988). Job-shop scheduling theory: what is relevant? *Interfaces*, 18, 84-90.
- McKay, K.N., Safayeni, F.R., & Buzacott, J.A. (1995). 'Common Sense' realities of planning and scheduling in printed circuit board production. *International Journal of Production Research*, 33, 1587-1603.
- McKay, K.N., Buzacott, J.A., Charness, N., & Safayeni, F.R. (1992). The scheduler's predictive expertise. An interdisciplinary perspective. In G.I. Doukidis & R.J. Paul (Eds.), *Artificial Intelligence in Operational Research* (pp. 139-150). London: MacMillan Press.
- Mietus, D. (1994). *Understanding planning for effective decision support. A cognitive task analysis of nurse scheduling*. Doctoral Dissertation, University of Groningen, The Netherlands.
- Moray, N., Dessouky, M.I., Kijowski, B.A., & Adapathya, R. (1991). Strategic behavior, workload, and performance in task scheduling. *Human Factors*, 33, 607-629.
- Nakamura, N., & Salvendy, G. (1988). An experimental study of human decision-making in computer-based scheduling of flexible manufacturing system. *International Journal of Production Research*, 26, 567-583.
- Pinedo, M. (1994). *Scheduling: Theory, Algorithms and Systems*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 13, 257-266.
- Rasmussen, J. (1986). *Information processing and human-machine interaction*. Amsterdam: North-Holland.
- Rouanet, H. (1996). Bayesian methods for assessing importance of effects. *Psychological Bulletin*, 119, 149-158.
- Sanderson, P.M. (1989). The human planning and scheduling role in advanced manufacturing systems: an emerging human factors domain. *Human Factors*, 31, 635-666.
- Sanderson, P.M. (1991). Towards the model human scheduler. *International Journal of Human Factors in Manufacturing*, 1, 195-219.
- Sanderson, P., Scott, J., Johnson, T., Mainzer, J., Watanabe, L., & James, J. (1994). MacSHAPA and the enterprise of exploratory sequential data analysis (ESDA). *International Journal of Human-Computer Studies*, 41, 633-681.
- Sakphisal, A., & Higgins, P.G. (2010). Studying the existing service process of three hospital outpatient departments. *International Journal of Health Management and Information*, 1, 111-130.
- Statistica (version 6) computer software. Retrieved from: <http://www.statsoft.com/french/welcome.html>
- Stefik, M. (1981a). Planning with constraints (MOLGEN: Part1). *Artificial Intelligence*, 16, 111-140.
- Stoop, P.M., & Wiers, V.C.S. (1996). The complexity of scheduling in practice. *International Journal of Operations and Production Management*, 16, 37-53.

- Tabe, T., & Salvendy, G. (1988). Toward a hybrid intelligent system for scheduling and rescheduling. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 1, 154-164.
- Tabe, T., Yamamuro, S., & Salvendy, G. (1990). Knowledge elicitation in scheduling FMS: towards a hybrid intelligent system. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 5, 17-27.
- Trentesaux, D., Moray, N., Tahon, C. (1998). Integration of the human operator into responsive discrete production management systems. *European Journal of Operational Research*, 109, 342-361.
- van Wezel, W., & Jorna, R.J. (2006). Introduction. In W. van Wezel, R.J. Jorna, & A.M. Meystel (Eds.), *Planning in intelligent systems* (pp. 1-22). Hoboken, NJ: Wiley.
- van Wezel, W., & Jorna, R.J. (2009). Cognition, tasks, and planning: supporting the planning of shunting operations at Netherlands Railways. *Cognition, Technology & Work*, 11, 165-176.
- van Wezel, W., Cegarra, J., & Hoc, J.M. (2011). Allocating functions to human and algorithm in scheduling. In J.C. Fransoo, T. Wäfler, & J. Wilson (Eds.), *Behavioral Operations in Planning and Scheduling* (pp. 339-370). Berlin: Springer-Verlag.
- Vicente, K.J., & Rasmussen, J. (1990). The ecology of human-machine systems II: mediating direct perception in complex work domains. *Ecological Psychology*, 2, 207-249.
- Visser, W. (2006). *The cognitive artifacts of designing*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Wiers, V.C.S. (1996). A quantitative field study of the decision behaviour of four shop floor schedulers. *Production Planning and Control*, 7, 383-392.
- Zhang, J., & Norman, D.A. (1994). Representations in distributed cognitive tasks. *Cognitive Science*, 18, 87-122.

CHAPITRE 8 : COOPERATION HOMME-MACHINE POUR L'ORDONNANCEMENT : LE CAS DE L'ORDONNANCEMENT DE GROUPES

1	INTRODUCTION	159
2	METHODOLOGIE	160
2.1	TACHE DU PARTICIPANT ET OUTIL D'ASSISTANCE A L'ORDONNANCEMENT	160
2.2	PROTOCOLE EXPERIMENTAL	164
2.3	FACTEURS EXPERIMENTAUX	165
2.4	DESCRIPTION DES PARTICIPANTS ET DU PLAN D'ANALYSE	166
2.5	METHODE DE RECUEIL DES DONNEES : PRISE D'INFORMATION, PRISE DE DECISION ET PERFORMANCE	166
3	QUESTIONS ET HYPOTHESES DE RECHERCHE	167
4	RESULTATS	169
4.1	PRESENTATION GLOBALE DES RESULTATS	169
4.2	AVANT LA PROPOSITION DE LA MACHINE	169
4.2.1	PERFORMANCE "LOCALE" D'ORDONNANCEMENT	169
4.2.2	DUREE DE PRISE DE DECISION	170
4.2.3	NOMBRE DE PRISES D'INFORMATION	170
4.2.4	TYPES D'INDICATEURS CONSULTES AU COURS DES PRISES D'INFORMATION	171
4.3	APRES LA PROPOSITION DE LA MACHINE	172
4.3.1	EFFET DE LA PROPOSITION DE LA MACHINE SUR LA PERFORMANCE "LOCALE" D'ORDONNANCEMENT	172
4.3.2	DESCRIPTION "CLINIQUE" DE LA RELANCE DE L'ANALYSE DES INDICATEURS	173
4.3.3	ÉVOLUTION DE LA PRISE DE DECISION	174
4.4	PERFORMANCE GLOBALE D'ORDONNANCEMENT	175
4.4.1	RETARD ALGEBRIQUE MAXIMUM	175
4.4.2	DUREE TOTALE DE MISE EN ŒUVRE DE L'ORDONNANCEMENT	176
5	DISCUSSION	177
6	CONCLUSION	179
7	BIBLIOGRAPHIE	180

1 INTRODUCTION

Contrairement aux deux études précédentes, le travail présenté dans ce chapitre n'a pas cherché à décrire les stratégies d'ordonnement en termes de processus stratégiques et tactiques et de gestion de contraintes et d'objets. La problématique de cette étude a été initiée par un travail mené antérieurement à l'IRCCyN dans le domaine de la recherche opérationnelle (Pinot, 2008), et s'inscrit donc dans une perspective pluridisciplinaire. Elle a cherché à examiner une situation de coopération homme-machine pour l'ordonnement d'une production, constituée d'un ensemble d'opérations à réaliser. Plus précisément, le contexte est celui de l'ordonnement de groupes, dont la méthode a été développée par la recherche opérationnelle il y a plus de 30 ans (Artigues, 1997 ; Billaut, 1993 ; Esswein, 2003 ; Pinot, 2008 ; Thomas, 1980). L'idée de cette approche est que pour générer de la

flexibilité séquentielle (degrés de liberté *a priori* quant à l'ordre des séquences d'opérations sur les machines), on peut utiliser des groupes d'opérations permutable. Sur la base d'un algorithme, la machine découpe l'ensemble des opérations à réaliser en groupes d'opérations. Chaque groupe d'opérations est présenté l'un après l'autre à l'opérateur qui doit décider de la séquence des opérations à l'intérieur de chaque groupe (ordonnancement intra-groupes). Cette méthode réalise donc une répartition de fonctions entre l'opérateur et la machine, l'opérateur étant considéré comme le "décideur final", en réalisant l'ordonnancement intra-groupes. Par ailleurs, pour l'aider dans ses décisions, l'ordonnanceur disposait d'un ensemble d'indicateurs, dont l'indicateur "qualité dans le meilleur des cas" qui été spécialement développée dans le travail de thèse de Pinot (2008). Dans cette étude nous avons cherché à examiner l'impact de l'ensemble des indicateurs sur l'activité d'ordonnancement, et plus particulièrement l'effet de l'indicateur "qualité dans le meilleur des cas".

Le contexte de l'ordonnancement de groupes a été pour nous l'occasion de formuler quelques questions un peu plus guidées par les travaux de psychologie. En effet, nous avons examiné l'une des modalités de la coopération homme-machine, le contrôle mutuel, agissant au niveau du résultat (interférence au niveau de l'action). Plus précisément, l'effet du contrôle mutuel d'un agent "machine" sur l'activité d'ordonnancement d'un agent "humain" : une fois que l'opérateur humain avait pris une décision, la machine faisait une proposition, exerçant alors sur lui un contrôle mutuel. Enfin, l'atelier étant un environnement souvent instable car soumis à l'apparition d'aléas, nous avons confronté les participants à deux scénarios : la présence d'un risque fort quant à la panne d'une machine contre l'absence d'un tel risque.

L'objectif de cette étude a donc été triple. Tout d'abord, examiner le rôle d'un outil d'assistance à l'ordonnancement dans l'activité d'ordonnancement intra-groupes réalisée par les opérateurs. Puis nous avons cherché à étudier l'effet du contrôle mutuel sur ces décisions d'ordonnancement intra-groupes. Enfin, nous avons appréhendé la question de la gestion du risque de panne par les ordonnanceurs.

2 METHODOLOGIE

2.1 TACHE DU PARTICIPANT ET OUTIL D'ASSISTANCE A L'ORDONNANCEMENT

Le participant était placé face à deux écrans informatiques. Le premier écran représentait la simulation d'une chaîne de production permettant de visualiser la progression de palettes dans un atelier. L'intérêt d'une simulation est de permettre une progression de la chaîne de production à vitesse accélérée. Cette chaîne de production simulée peut alors s'arrêter lorsque une décision d'ordonnancement est demandée au participant, sans attendre que les opérations soient réalisées en temps réel. La chaîne de production était de type *Job Shop*. Chaque produit transporté par une palette subissait une opération²⁴ sur chacun des cinq postes (ou machines) de la chaîne (Poste 1 à Poste 5 – figure 20), mais l'ordre de ces

²⁴ Une opération est un ensemble d'actions permettant la transformation ou le contrôle d'un produit (circulant sur une palette) et effectués sur un poste de travail sans que le produit quitte le poste. Chaque opération traite un produit à la fois. Le temps de traitement d'une opération est variable selon le produit.

opérations, déterminant l'ordre de passage sur les différents postes, était propre à chaque palette (sa gamme). La tâche du participant était de prendre des décisions d'ordonnancement d'un poste de travail en particulier (dans notre expérience, nous avons choisi arbitrairement le poste 2), comme cela pourrait être le cas dans une situation réelle d'atelier pour laquelle un opérateur est affecté à une machine. L'objectif demandé aux participants était de minimiser les retards.

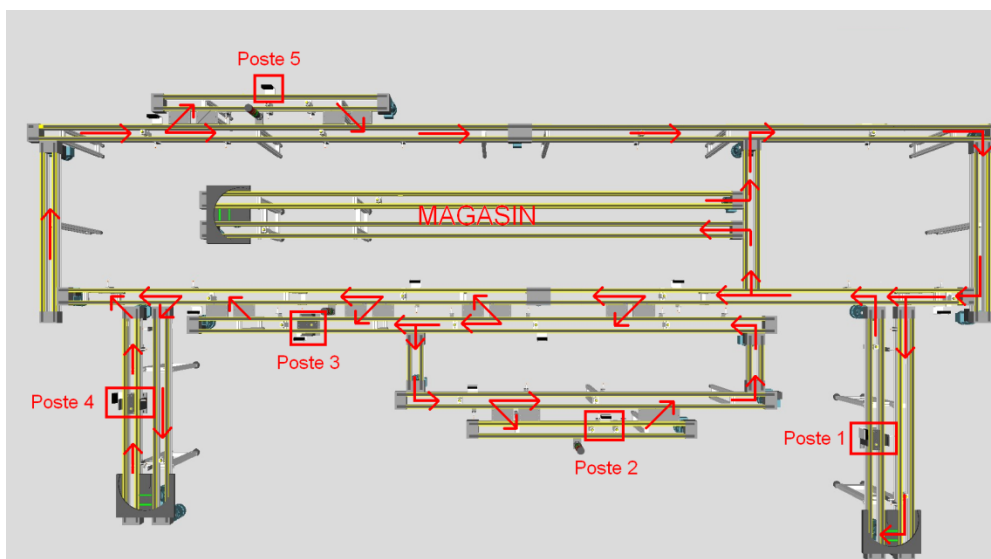


Figure 20 : Vue de la simulation de la chaîne de production utilisée dans l'expérience. Chaque palette circulait sur des rails avant de subir une opération sur l'un des 5 postes. La tâche du participant était d'ordonner le poste 2.

La simulation de la chaîne progressait à vitesse accélérée et marquait une pause lorsque le participant devait prendre une décision d'ordonnancement. Face à un groupe de palettes défini par la machine, la tâche du participant était de choisir l'une d'entre elles sur le deuxième écran informatique (figure 21). On a donc défini une *prise de décision* comme un choix, par le participant, d'une palette dans un groupe. Chaque décision était rendue visible sur l'interface (sélection de la palette puis clic sur le bouton "Choix terminé"). Pour l'aider dans ses prises de décision, le participant pouvait consulter des indicateurs (outil d'assistance à l'ordonnancement intra-groupes – figure 21). On a défini alors une *prise d'information* comme la consultation d'un indicateur.

Expérimentations ACSED / PsyCoTEC						
	Marge libre séquentielle	Qualité dans le pire des cas	Qualité dans le meilleur cas	Durée opératoire	Rang dans la gamme/ Rang actuellement	Choix terminé
<input type="checkbox"/> Palette n°12	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	<input type="text" value=""/> Palette n°12 Palette n°10 Palette n°8 Palette n°3
<input type="checkbox"/> Palette n°10	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	
<input type="checkbox"/> Palette n°8	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	
<input type="checkbox"/> Palette n°3	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	

Vue complète de l'atelier

Figure 21 : Outil d'assistance à l'ordonnancement proposant un groupe de palettes, et permettant de consulter les valeurs d'indicateurs pour chaque palette du groupe. Tous les indicateurs ne pouvaient être consultés simultanément. Dans cet exemple, la tâche du participant était de choisir une palette parmi les quatre proposées.

Une fois que le participant avait pris sa décision, la machine faisait une proposition de solution. Il pouvait alors consulter une nouvelle fois les indicateurs à disposition et modifier son choix à souhait. La simulation redémarrait puis s'arrêtait dès qu'une nouvelle décision de l'ordonnanceur était requise.

Les indicateurs de l'outil d'assistance à l'ordonnancement intra-groupes étaient les suivants :

- La **marge libre séquentielle** est un indicateur numérique renseignant sur la capacité d'absorption des retards dans le futur. Plus la marge libre séquentielle est grande, plus il sera possible d'absorber les retards éventuels. Si un opérateur choisit une palette présentant une marge libre séquentielle négative, alors il y aura un risque de retard à la fin de l'ordonnancement. En revanche, s'il choisit une palette présentant une marge libre séquentielle positive, alors les retards potentiels pourront mieux être absorbés. Prenons par exemple un groupe de trois palettes présentant les marges libres séquentielles suivantes : $P_1 = -3$, $P_2 = 0$, et $P_3 = 2$. Si l'opérateur choisit la palette P_1 , alors il est probable qu'à la fin de l'ordonnancement un retard apparaisse. S'il choisit la palette P_3 , alors il est possible qu'aucune palette ne soit traitée en retard (y compris la palette P_1). D'un point de vue psychologique, cet indicateur est lié à la flexibilité, pour garantir une certaine robustesse à l'ordonnancement. Privilégier cet indicateur montre que l'opérateur cherche à disposer de degrés de liberté pour anticiper les perturbations dans l'atelier. Cet indicateur est également lié à la qualité de l'ordonnancement final en permettant d'anticiper la performance (lien avec l'objectif de minimiser les retards).
- La **qualité dans le meilleur des cas** et la **qualité dans le pire des cas** sont deux indicateurs numériques renseignant sur la qualité de l'ordonnancement. La qualité est calculée à partir d'un critère objectif issu de méthodes de recherche opérationnelle. Pour l'expérience que nous avons menée, le critère objectif qui a été utilisé par la machine était de minimiser le retard ou l'avance des opérations par rapport aux dates de livraison des produits. Une des mesures utilisées dans ce cas est le retard algébrique maximum (*Maximum Lateness*) et est notée L_{max} . Ce retard est algébrique car il correspond à une avance (calculée à partir d'une date de livraison souhaitée pour chaque palette) s'il est négatif, et à un retard s'il est positif. Le retard algébrique maximum est le plus grand retard algébrique observé pour toutes les palettes traitées. Par conséquent, la qualité dans le meilleur des cas correspond au retard algébrique maximum dans le meilleur des cas, et la qualité dans le pire des cas correspond au retard algébrique maximum dans le pire des cas. En consultant les indicateurs de qualité pour une palette donnée, l'opérateur est informé du retard algébrique maximum le plus grand (qualité dans le pire des cas) ou du retard algébrique maximum le plus petit (qualité dans le meilleur des cas), qu'on pourrait obtenir en traitant en priorité cette palette. Par exemple, si l'opérateur choisit une palette qui présente une qualité de 12 dans le meilleur des cas, alors il obtiendra à la fin de l'ordonnancement, et dans le meilleur des cas, un retard maximum supérieur ou égal à 12 (12 étant le meilleur des cas). De même, si l'opérateur choisit une palette qui présente une qualité de 25 dans le pire des cas, alors il obtiendra à la fin de l'ordonnancement, et dans le pire des cas, un retard maximum inférieur ou égal à 25 (25 étant le pire des cas). Enfin, une qualité présentant une valeur négative est à interpréter comme une avance. D'un point de vue psychologique, les indicateurs de qualité sont liés à la qualité de l'ordonnancement final. Ces informations permettent donc à l'opérateur d'évaluer une performance anticipée de l'ordonnancement (lien avec l'objectif de minimiser les retards).

- La **durée opératoire** est un indicateur numérique représentant la durée de traitement d'une palette sur un poste (dans notre expérience le poste 2). En observant un opérateur privilégiant cet indicateur, cela peut nous renseigner sur l'utilisation d'une règle (procédure) d'ordonnancement. Par exemple, s'il choisit d'abord les palettes présentant de petites durées de traitement, on peut alors interpréter ce comportement comme l'utilisation de la règle SPT (*Shortest Processing Time*) qui consiste à ordonnancer en premier les tâches ayant les plus petites durées opératoires. De même, s'il privilégie les palettes présentant de grandes durées de traitement, c'est probablement parce qu'il utilise la règle LPT (*Longest Processing Time*) qui consiste à ordonnancer en premier les tâches ayant les plus grandes durées opératoires.
- L'indicateur **rang dans la gamme/rang actuel** est composé de deux nombres. Pour une palette donnée, le premier nombre indique le rang de l'opération réalisée par le poste 2. La 2^{ème} valeur de cet indicateur (rang actuel) correspond quant à lui au nombre d'opérations déjà effectuées sur le produit circulant sur la palette (le rang de la gamme actuellement atteint par le produit), les autres opérations étant réalisées par les autres postes de la chaîne de production (figure 20). Par exemple, la valeur 1/0 signifie que le produit circulant sur la palette doit, dans sa gamme, être traité en premier par le poste 2 (signification du 1) et qu'il n'a encore subi aucune opération sur les autres postes de la chaîne (signification du 0). De la même manière, si une palette présente la valeur 3/1, cela signifie que le produit circulant sur cette palette doit, dans sa gamme, être traité par le poste 2 comme troisième opération de la gamme (signification du 3), et qu'il a déjà subi une seule opération (signification du 1). Par conséquent, avant de passer sur le poste 2, ce produit doit subir une autre opération (celle du poste 1, celle du poste 3, celle du poste 4, ou celle du poste 5 de la chaîne). L'indicateur rang dans la gamme/rang actuel permet donc à l'opérateur d'être informé sur le nombre d'opérations qu'un produit doit subir avant qu'il n'arrive sur le poste 2 (pour lequel, on le rappelle, il réalise un ordonnancement intra-groupes). D'un point de vue psychologique, cet indicateur permet donc d'organiser des priorités dans l'ordonnancement des palettes.
- La **vue complète de l'atelier** est un indicateur permettant de visualiser, à un instant "donné", la localisation de l'ensemble des palettes sur la chaîne de production. Le choix de cet indicateur impliquait un arrêt temporaire de la simulation. La vue complète de l'atelier était visible sous forme d'une image (capture d'écran) permettant de localiser les palettes sur la chaîne. Par défaut, un masque était appliqué sur la vue des postes 1, 3, 4, 5 et sur le magasin de la chaîne de production (figure 20). Par défaut, le participant ne disposait donc que d'une vue localisée sur le poste 2 (figure 22), car sa tâche était de prendre des décisions d'ordonnancement intra-groupes pour ce poste en particulier. Cette vue localisée permettait à l'opérateur de visualiser les palettes circulant dans cette zone. Parmi les palettes qui circulaient, l'opérateur pouvait détecter celles qui appartenaient à un groupe de palettes défini par la machine, et pour lequel il devait prendre des décisions d'ordonnancement. En pouvant localiser les palettes sur la chaîne, on pense que l'indicateur "vue complète de l'atelier" permet à l'opérateur d'estimer des temps de transport avant le traitement d'un poste. Cette vue complète est donc un "outil" permettant d'anticiper l'arrivée de certaines palettes. Ce sont des verbalisations spontanées du type « *La palette 4 est proche de mon poste 2. Je vais donc la choisir tout de suite car elle fait partie du groupe de palettes proposé actuellement* ».

Figure 23 : Dans la tâche proposée aux participants, on indiquait que l'atelier était une chaîne d'assemblage d'arbres pour des boîtes de vitesses.

par la machine », qui nous ont permis d'interpréter la vue complète de l'atelier comme une aide à l'anticipation.

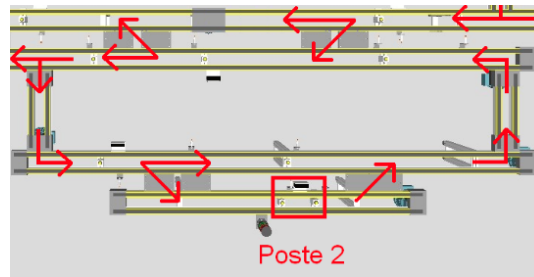


Figure 22 : Vue localisée autour de la zone du poste 2. A partir de la vue localisée sur cette zone, le participant pouvait donc visualiser des palettes circulant dans cette zone de la chaîne de production. En sélectionnant l'indicateur "Vue complète de l'atelier", il pouvait alors visualiser l'ensemble de la chaîne et donc la localisation de toutes les palettes (figure 20).

2.2 PROTOCOLE EXPERIMENTAL

L'expérimentation s'est déroulée en deux phases : une période de familiarisation avec le dispositif expérimental et une phase de test. La lecture d'une notice et l'utilisation du dispositif expérimental sur la base d'exemples ont permis aux participants de se familiariser avec les objectifs de l'étude, et d'avoir une représentation claire des indicateurs proposés par le logiciel d'assistance à l'ordonnancement intra-groupes.

Par ailleurs, pour créer du contexte à cette situation expérimentale, nous avons indiqué dans la notice que l'atelier était une chaîne d'assemblage d'arbres pour des boîtes de vitesses. Il était précisé que sur chaque poste de la chaîne, les opérations étaient réalisées manuellement par des opérateurs (figure 23).

Dans cette chaîne de production, trois modèles d'arbre sont fabriqués, par montage de roues dentées de caractéristiques différentes (représentées par des couleurs différentes) :

Sur le poste 1, l'opérateur prépare les lots de roues dentées (bleues, jaunes et vertes)

Sur le poste 2, l'opérateur prépare les kits d'arbres

Sur le poste 3, l'opérateur monte l'arbre primaire AP101

Sur le poste 4, l'opérateur monte l'arbre primaire AP201

Sur le poste 5, l'opérateur monte l'arbre secondaire

2.3 FACTEURS EXPERIMENTAUX

Cette étude a examiné l'effet de trois facteurs expérimentaux à deux modalités :

- **Richesse des informations (I_2)**. Dans la condition expérimentale i1, seulement deux indicateurs étaient proposés au participant, alors que dans la condition i2, les six indicateurs étaient proposés. Les modalités du facteur I_2 sont résumées dans le tableau 12. D'un point de vue psychologique, la richesse des informations peut être liée à la complexité des informations à considérer pour prendre une décision. Ainsi, plus le participant dispose d'indicateurs pour prendre une décision, plus cela peut compliquer son choix.

Indicateur	Condition i1	Condition i2
Marge libre séquentielle	X	X
Vue globale de l'atelier	X	X
Qualité dans le meilleur des cas		X
Qualité dans le pire des cas		X
Durée opératoire		X
Rang dans la gamme et rang actuel		X

Tableau 12 : Indicateurs présents dans chaque modalité du facteur I_2 (richesse des informations).

- **Contrôle mutuel entre l'humain et la machine (C_2)**. Dans la condition de contrôle mutuel (c2), la machine faisait une proposition au participant suite à chacune de ses prises de décision. Il pouvait alors soit confirmer son choix initial, soit changer d'avis. Il y avait donc deux décisions du participant : celle avant la proposition de la machine et celle après. Dans la condition d'absence de contrôle mutuel (c1), aucune proposition n'était faite par la machine. Cette condition est considérée comme la condition contrôle. D'un point de vue psychologique, le contrôle mutuel est une interférence qui agit au niveau des résultats d'une prise de décision de l'opérateur. L'effet du contrôle mutuel peut agir à deux niveaux. Lorsqu'il agit avant la proposition de la machine, cet effet est qualifié d'anticipatif. On est alors susceptible d'observer deux comportements différents. Soit l'opérateur réalise une analyse approfondie de la situation avant de prendre une décision, soit il en effectue une analyse superficielle et attend la réponse de la machine pour éventuellement se corriger. Ce type de comportement peut alors être expliqué par le phénomène de contentement (Parasuraman & Riley, 1997). Enfin, en cas de désaccord, l'effet du contrôle mutuel peut agir après la proposition de la machine en produisant chez l'opérateur une relance de son activité.
- **Risque de panne (R_2)**. Dans la condition avec risque fort (r2), on indiquait dans la consigne que le poste 5 de la chaîne était défaillant et susceptible de tomber en panne (« *on s'est aperçu que le poste n°5 de la chaîne tombait en panne régulièrement car la maintenance de la machine n'a pas été faite depuis longtemps. Certaines opérations peuvent donc prendre beaucoup plus de temps que prévu* »). Puisque les palettes devaient passer sur toutes les machines, une panne du poste 5 pourrait avoir un effet sur tous les postes de la chaîne et donc sur le poste 2. Par ailleurs, il faut préciser que dans cette condition r2, la panne se produisait réellement, et elle était subie par le participant. Dans la condition r1 aucun risque de panne du poste 5 n'était signalé au participant, et aucune panne ne se produisait. D'un point de vue psychologique, ce facteur nous a permis de manipuler la représentation du risque, la panne étant une opérationnalisation de ce risque.

2.4 DESCRIPTION DES PARTICIPANTS ET DU PLAN D'ANALYSE

Dix-huit étudiants en Licence 3 de logistique à l'IUT de Nantes ont participé à cette étude. Dans le cadre de leur formation, ces étudiants ont suivi des cours d'ordonnancement. Ils étaient donc familiers avec les concepts classiques liés à ce domaine (Makespan, chaîne de production, etc.).

Parmi les dix-huit étudiants, huit d'entre eux suivaient leur formation en alternant cours théoriques et pratique professionnelle en entreprise (apprentissage). Dix étudiants ne suivaient donc que des cours théoriques. De ces deux catégories d'étudiants, nous n'avions pas d'hypothèse spécifique sur des différences de comportement que nous allions observer dans cette étude. L'analyse des résultats n'a pas mis en évidence de différences particulières entre ces étudiants. Nous avons donc regroupé ces étudiants en un seul groupe.

Pour examiner l'effet des trois facteurs expérimentaux (I_2 , C_2 , R_2), nous avons mis en œuvre le plan d'analyse suivant : deux groupes de neuf participants ont été répartis aléatoirement selon les modalités du facteur C_2 (contrôle mutuel entre l'humain et la machine). A l'intérieur de chaque groupe, chaque participant devait résoudre quatre problèmes d'ordonnancement différents correspondant au croisement des deux modalités du facteur I_2 (richesse des informations) et des deux modalités du facteur R_2 (risque de panne).

Au total, chaque participant devait prendre quarante-six décisions au cours des quatre problèmes auxquels il a été confronté. Ces quatre problèmes conçus par la recherche opérationnelle sont considérés équivalents du point de vue de leur difficulté. Chaque problème était indexé sur l'une des quatre combinaisons des modalités du facteur I_2 et du facteur R_2 . Le nombre de décisions à prendre par problème pouvait être légèrement différent (entre 11 et 13 décisions – tableau 13). Nous sommes conscients que, pour contrôler un éventuel biais lié à des caractéristiques intrinsèques des problèmes, il aurait fallu contrebalancer leur ordre en fonction des quatre combinaisons de modalités. Or, le nombre de participants était trop faible pour réaliser des contrebalancements complets, et effectuer des contrebalancements partiels n'aurait pas été satisfaisant. Enfin, pour neutraliser des effets d'apprentissage, l'ordre des combinaisons de modalités a été contrebalancé.

Croisement des modalités du facteur I_2 et du facteur R_2	Nombre de décisions à prendre
i1r1	11 (problème 1)
i1r2	11 (problème 2)
i2 r1	13 (problème 3)
I2r2	11 (problème 4)

Tableau 13 : Nombre de décisions à prendre en fonction du croisement des modalités du facteur I_2 (richesse des informations) et du facteur R_2 (risque de panne).

2.5 METHODE DE RECUEIL DES DONNEES : PRISE D'INFORMATION, PRISE DE DECISION ET PERFORMANCE

Pour connaître la nature des indicateurs consultés par le participant et leur fréquence de consultation, nous avons utilisé la technique de l'information à la demande. En masquant la valeur de chaque indicateur pour chaque palette, cette technique nous a permis de rendre observable l'activité de prise d'information impliquée dans les prises de décision

d'ordonnancement. L'usage de cette technique était un peu contraignant puisque la consultation d'un indicateur nécessitait une séquence d'actions (sélection des palettes puis choix de l'indicateur). L'accès simultané à plusieurs indicateurs était donc impossible. Toutefois, la quantité d'information respectait les contraintes de mémorisation de la mémoire de travail (Mathy & Feldman, 2012), et il était précisé que la consultation répétée de certains indicateurs était autorisée (« *Vous pouvez changer de critère, consulter à nouveau un critère déjà consulté précédemment etc.* »). Cette activité de prise d'information a été enregistrée automatiquement.

Pour chaque décision validée par le participant nous avons recueillis plusieurs données. Tout d'abord une durée de prise de décision, en seconde, calculée à partir du temps entre l'apparition des valeurs du premier indicateur et le choix d'une palette par le participant. Au travers du recueil de cette variable, il y a l'idée d'accéder à une mesure de la durée des traitements. Il faut alors signaler l'imprécision relative de cette mesure. En effet, derrière cette durée, il y avait aussi ponctuellement des durées de lecture de la notice (pour se remémorer la signification des indicateurs de l'outil d'assistance), et parfois quelques questions posées à l'expérimentateur.

La qualité de chaque prise de décision de l'opérateur a également été mesurée. Cette évaluation "locale" de la performance a été catégorisée en fonction de critères de performance issus de la recherche opérationnelle. La solution choisie par l'opérateur était soit bonne soit mauvaise. La performance "locale" était donc soit bonne soit mauvaise.

Enfin, dans la situation de contrôle mutuel dans laquelle la machine faisait une proposition, nous avons mesuré l'évolution de la décision de l'opérateur : change-t-il d'avis ? Choisit-il la proposition de la machine ou une nouvelle solution ?

En plus de la performance "locale" mesurée à chaque prise de décision de l'opérateur, nous avons évalué globalement la résolution de chaque problème d'ordonnancement, en adoptant toujours le point de vue de la recherche opérationnelle. Deux critères objectifs ont été utilisés pour évaluer la performance "globale" : le retard algébrique maximum et la durée totale de mise en œuvre de l'ordonnancement (*Makespan*) et notée C_{max} . Le retard algébrique maximum (*Maximum Lateness*), notée L_{max} , a été mesuré en minutes. Plus le L_{max} est petit, meilleure est la performance, un L_{max} de 0 signifiant qu'aucune palette n'est sortie en retard. Le *Makespan* (C_{max}) correspond à la durée totale de mise en œuvre de l'ordonnancement et a également été mesuré en minutes. A l'instar du L_{max} , plus le C_{max} est petit, meilleure est la performance.

3 QUESTIONS ET HYPOTHESES DE RECHERCHE

Dans cette étude, nous avons cherché à répondre à un ensemble de questions de recherche liées à l'effet des facteurs sur l'activité d'ordonnancement. En particulier, quel pouvait être l'effet des indicateurs supplémentaires (richesse des informations) et du contrôle mutuel, par exemple :

- La performance de l'ordonnanceur est-elle améliorée avec plus d'indicateurs ? avec une proposition machine ?

- La proposition machine a-t-elle un effet de relance de l'activité (l'opérateur examinerait à nouveau les informations proposées par l'outil d'assistance) ?
- Quels sont les indicateurs privilégiés par l'ordonnanceur ?

Pour répondre à ces questions, l'activité d'ordonnancement a été appréhendée sous deux angles :

- La performance d'ordonnancement, à partir d'une mesure "locale" (qualité d'une prise de décision, évolution de cette décision en présence d'une proposition machine) et deux indicateurs "globaux" (L_{max} et C_{max}), en adoptant le point de vue de la machine (performance calculée par la machine).
- Les processus impliqués dans l'activité d'ordonnancement, et supposés expliquer la performance : durée des prises de décision, nombre de prises d'information, nature des indicateurs consultés, évolution de l'avis suite à une proposition de la machine.

A partir de ces deux points de vue (performance et processus), nous avons formulé les hypothèses suivantes :

- (H1) En proposant des informations plus riches pour prendre des décisions, on s'attend à une augmentation du niveau d'activité chez l'opérateur (hypothèse de l'effet de l'outil d'assistance), ce qui permettrait de produire une meilleure performance.
 - (H1a) Lorsque plusieurs indicateurs sont fournis à l'opérateur (i_2), dont la qualité dans le meilleur des cas, on observe une augmentation de la durée des prises de décision et du nombre de prises d'information.
 - (H1b) Lorsque plusieurs indicateurs sont fournis à l'opérateur (i_2), dont la qualité dans le meilleur des cas, on observe une amélioration de la qualité des prises de décision (performance "locale").
 - (H1c) Lorsque plusieurs indicateurs sont fournis à l'opérateur (i_2), il va privilégier la marge libre séquentielle, la qualité dans le pire des cas, et la qualité dans le meilleur des cas. Ces indicateurs étant liés à la qualité de l'ordonnancement en termes de retard, ils sont pertinents pour poursuivre l'objectif fixé par la consigne (minimiser les retards).
- (H2) Lorsque la décision de l'opérateur est critiquée par la machine, on s'attend à une augmentation du niveau d'activité chez l'opérateur (hypothèse de l'effet du contrôle mutuel), ce qui permettrait de produire une meilleure performance.
 - (H2a) En présence de contrôle mutuel (c_2), la critique de la machine a un effet en termes de relance de l'analyse des indicateurs (prises d'information supplémentaires).
 - (H2b) En présence de contrôle mutuel (c_2), la critique de la machine permet d'améliorer la qualité des prises de décision (performance "locale").
 - (H2c) En présence de contrôle mutuel (c_2), la performance "globale" est meilleure.
- (H3) En situation de risque fort de panne, l'opérateur chercherait à minimiser les effets de la panne en introduisant des degrés de liberté dans l'ordonnancement

(H3a) Lorsque le risque de panne est fort, un poids important est accordé à la consultation de la marge libre séquentielle car cet indicateur permet d'introduire de la flexibilité dans l'ordonnancement, pour être plus robuste aux aléas.

4 RESULTATS

4.1 PRESENTATION GLOBALE DES RESULTATS

Dans la condition avec contrôle mutuel, l'ordonnanceur devait prendre ses décisions en deux étapes : avant que la machine ne propose une solution et après qu'elle ait fait sa proposition. Dans la présentation des résultats, nous avons donc distingué ces deux étapes. A l'intérieur de ces deux phases, nous avons mesuré la performance "locale" d'ordonnancement (qualité de chaque prise de décision) et les processus impliqués dans cette performance (durée de prise de décision, nombre de valeurs de prises d'information). Enfin, deux indicateurs de performance "globale" d'ordonnancement (retard algébrique maximum et durée totale de mise en œuvre de l'ordonnancement) ont été mesurés à l'issue de la résolution de chaque problème. L'analyse statistique des résultats a été réalisée à partir de la méthode d'inférence fiducio-bayésienne (chapitre 5).

4.2 AVANT LA PROPOSITION DE LA MACHINE

4.2.1 PERFORMANCE "LOCALE" D'ORDONNANCEMENT

La performance "locale" d'ordonnancement consiste à évaluer chaque prise de décision de l'ordonnanceur. Nous avons choisi de représenter la proportion des bonnes solutions, selon la richesse des informations et la présence ou non d'un contrôle mutuel, et en distinguant la condition avec risque faible de celle avec risque fort (figure 24).

En moyenne, les décisions de l'opérateur avant la proposition de la machine sont assez bonnes, puisque dans au moins 75% des cas il choisit de bonnes solutions. Plus particulièrement, on note un effet notable de la richesse des informations puisque la proportion de bonnes solutions augmente avec 6 indicateurs, $d = 0,08$; $t(16) = 3,30$; $p < .005$; $\delta > 0,05$. En revanche, le contrôle mutuel ne semble pas avoir d'effet anticipatif sur la qualité des prises de décision, mais on ne peut pas conclure à un effet négligeable, $d = -0,03$; $t(16) = -0,52$; $p > .60$; $|\delta| < 0,10$. De plus, lorsque le risque augmente, la proportion de bonnes solutions augmente également, $d = 0,13$; $t(16) = 5,59$; $p < .001$; $\delta > 0,10$. Enfin, bien que les observations le suggèrent, on ne peut pas conclure à un effet d'interaction négligeable entre les trois facteurs, $d = 0,04$; $t(16) = 0,33$; $p > .74$; $|\delta| < 0,23$.

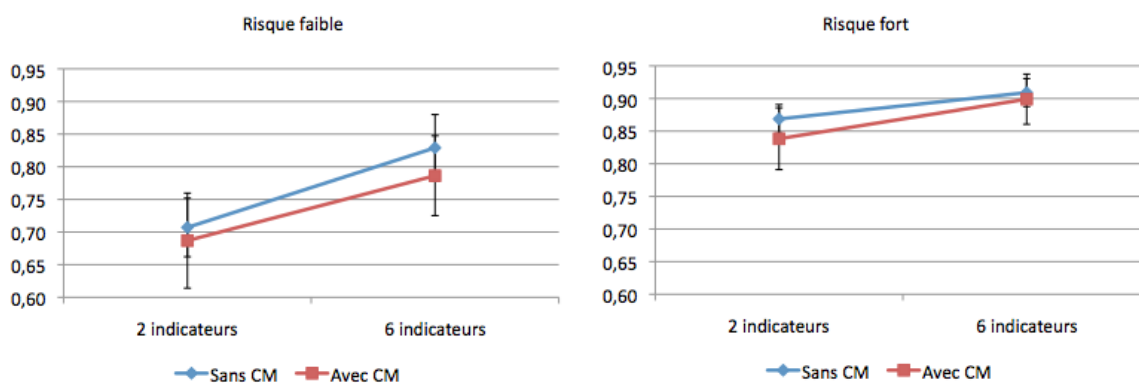


Figure 24 : Proportion moyenne de solutions bonnes selon la richesse des informations (2 ou 6 indicateurs) et le contrôle mutuel (avec ou sans CM) dans la situation avec risque faible et dans la situation avec risque fort. Les “moustaches” représentent les erreurs types.

4.2.2 DUREE DE PRISE DE DECISION

On rappelle que les durées de prise de décision ont été mesurées en secondes. Dans la figure 25, on observe un effet notable de la richesse des informations sur la durée de prise de décision puisqu'elle augmente lorsque le nombre d'indicateurs augmente, $d = 23,7$; $t(16) = 8,62$; $p < .001$; $|\delta| > 20,0$. Ce résultat suggère que plus de valeurs d'indicateurs sont consultées lorsque la richesse des informations à disposition pour prendre une décision augmente. Par ailleurs, l'effet anticipatif du contrôle mutuel semble absent, mais l'inférence statistique ne permet pas de conclure à un effet négligeable, $d = -2,5$; $t(16) = -0,47$; $p > .64$; $|\delta| < 10,1$. Enfin, bien que les observations le suggèrent, on ne peut également pas conclure à un effet négligeable du niveau risque, $d = -1,6$; $t(16) = -0,60$; $p > .56$; $|\delta| < 5,3$, et de l'interaction des trois facteurs, $d = 6,5$; $t(16) = 0,51$; $p > .62$; $|\delta| < 24,6$.

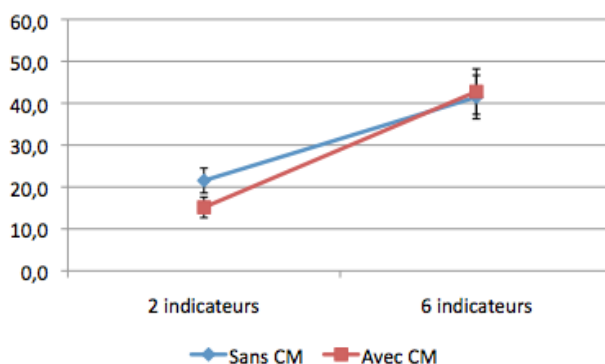


Figure 25 : Durée moyenne de prise de décision (secondes) selon la richesse des informations (2 ou 6 indicateurs) et le contrôle mutuel (avec ou sans CM). Les “moustaches” représentent les erreurs types.

4.2.3 NOMBRE DE PRISES D'INFORMATION

Le résultat représenté dans la figure 26 confirme que lorsque la richesse des informations augmente, les ordonnanceurs consultent de manière notable plus de valeurs d'indicateurs, $d = 2,44$; $t(16) = 11,88$; $p < .001$; $|\delta| > 2,16$. Par ailleurs, bien que les observations le suggèrent, on ne peut pas conclure à effet négligeable d'un contrôle mutuel anticipatif, $d = 0,08$; $t(16) = 0,28$; $p > .78$; $|\delta| < 0,51$, du niveau de risque, $d = -0,01$; $t(16) = -0,06$; $p > .95$; $|\delta| < 0,19$, et de l'interaction des trois facteurs, $d = 0,51$; $t(16) = 1,24$; $p > .23$; $|\delta| < 1,07$.

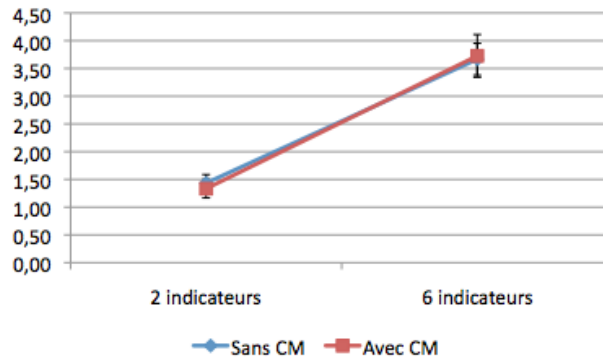


Figure 26 : Nombre moyen de valeurs de prises d'information selon la richesse des informations (2 ou 6 indicateurs) et le contrôle mutuel (avec ou sans CM). Les "moustaches" représentent les erreurs types.

4.2.4 TYPES D'INDICATEURS CONSULTÉS AU COURS DES PRISES D'INFORMATION

Pour chaque prise d'information réalisée par les participants à l'étude, nous avons recueilli le type d'indicateur consulté. Nous présentons la répartition des proportions selon le type indicateur avec 2 indicateurs et avec 6 indicateurs (figure 27).

Lorsque 2 indicateurs sont proposés à l'ordonnanceur, la marge libre séquentielle est consultée de manière bien plus importante que la vue complète de l'atelier, $d = 0,76$; $t(17) = 10,23$; $p < .001$; $\delta > 0,66$. Lorsque 6 indicateurs sont proposés à l'ordonnanceur, c'est d'abord la marge libre séquentielle qui est consultée le plus souvent, puis le rang, la durée opératoire, la qualité dans le pire des cas, la qualité dans le meilleur des cas et enfin la vue complète de l'atelier.

Plus précisément, trois groupes d'indicateurs se distinguent du point de vue des différences de proportions de consultation, et on peut conclure à des différences notables (tableau 14) :

- 1) La marge libre séquentielle.
- 2) Le rang dans la gamme et rang actuel, et la durée opératoire.
- 3) La qualité dans le pire, dans le meilleur des cas, et la vue complète de l'atelier.

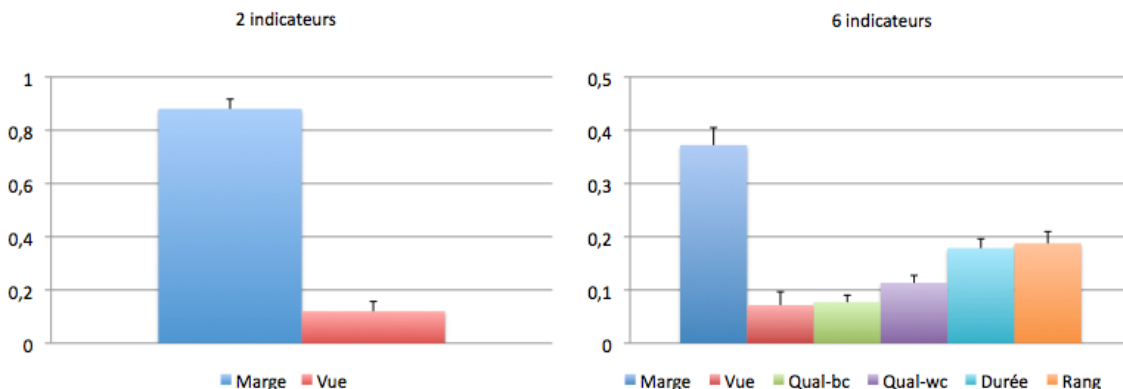


Figure 27 : Proportion moyenne des indicateurs consultés dans la condition avec 2 indicateurs et dans la condition avec 6 indicateurs. On rappelle les 6 indicateurs : marge libre séquentielle (Marge), vue complète de l'atelier (Vue), qualité dans le meilleur des cas (Qual-bc), qualité dans le pire des cas (Qual-wc), durée opératoire (Durée), rang dans la gamme et rang actuel (Rang). Les "moustaches" représentent les erreurs types.

Comparaison	Moyennes	Différence (d)	Test t ($\alpha = .05$)	Conclusion Bayésienne (δ)
Marge, Durée_Rang	Marge = 0,37 Durée_Rang = 0,18	0,19	$t(17) = 4,71$ $p < .001$ S	$\delta > 0,14$
Marge, Vue_Qual-bc_Qual-wc	Marge = 0,37 Vue_Qual-bc_Qual-wc = 0,08	0,29	$t(17) = 7,03$ $p < .001$ S	$\delta > 0,23$
Durée_Rang, Vue_Qual-bc_Qual-wc	Durée_Rang = 0,18 Vue_Qual-bc_Qual-wc = 0,08	0,10	$t(17) = 6,54$ $p < .001$ S	$\delta > 0,08$

Tableau 14 : Différences des proportions moyennes d'indicateurs consultés dans la condition avec 6 indicateurs : Marge (marge libre séquentielle), Vue (vue complète de l'atelier), Qual-bc (qualité dans le meilleur des cas), Qual-wc (qualité dans le pire des cas), Durée (durée opératoire), Rang (rang dans la gamme et rang actuel).

4.3 APRES LA PROPOSITION DE LA MACHINE

Compte tenu du plan d'expérience adopté (les participants sont emboîtés dans le facteur contrôle mutuel), les analyses suivantes ne concernent que neuf des dix-huit participants, ceux qui ont été soumis au contrôle mutuel. Nous analyserons tout d'abord l'évolution de la performance "locale" suite à la proposition de la machine (l'issue de la prise de décision). L'effet de cette proposition n'ayant produit qu'une relance très modeste de l'analyse des indicateurs, nous ne présenterons alors qu'une description "clinique" de cette prise d'information (c'est-à-dire sans réaliser d'analyse inférentielle). Enfin, l'évolution de la prise de décision de l'ordonnanceur sera décrite.

4.3.1 EFFET DE LA PROPOSITION DE LA MACHINE SUR LA PERFORMANCE "LOCALE" D'ORDONNANCEMENT

La figure 28 met en évidence que lorsque l'opérateur produit une bonne solution initiale, le contrôle mutuel ne dégrade pas la qualité de cette solution puisque dans la majorité des cas il se maintient dans une solution bonne. Cette différence de proportion est notable et significative, $d = 0,76$; $t(8) = 18,60$; $p < .001$; $\delta > 0,70$. En revanche, lorsque la solution de l'ordonnanceur est mauvaise, le contrôle mutuel ne permet pas d'améliorer cette solution. En effet, l'opérateur a plutôt tendance à se maintenir dans une mauvaise solution. Cette différence de proportion est également notable et significative, $d = 0,17$; $t(8) = 3,93$; $p < .005$; $\delta > 0,11$.

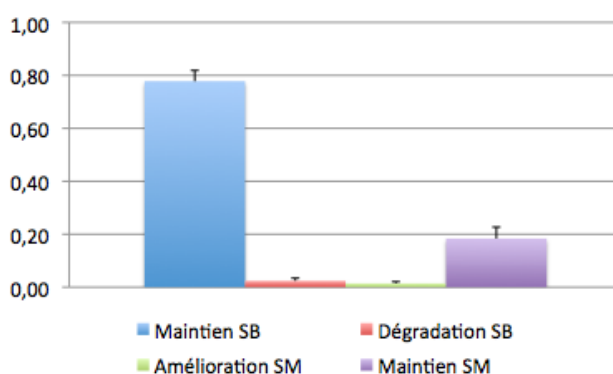


Figure 28 : Effet de la proposition de la machine (condition contrôle mutuel) sur la performance moyenne locale d'ordonnancement (qualité des prises de décision mesurée par une proportion) lorsque l'opérateur propose une solution bonne (SB) - maintien SB ou dégradation SB - ou une solution mauvaise (SM) - amélioration SM ou maintien SM. Les "moustaches" représentent les erreurs types.

4.3.2 DESCRIPTION "CLINIQUE" DE LA RELANCE DE L'ANALYSE DES INDICATEURS

La proposition machine n'ayant produit chez les neufs participants qu'une relance très modeste de l'analyse des indicateurs, nous n'en ferons ici qu'une description "clinique" (c'est-à-dire sans réaliser d'analyse inférentielle).

Parmi ces neufs participants, six d'entre eux ont relancé leur analyse après la proposition de la machine. Toutefois, lorsqu'il s'agit de caractériser cette relance d'analyse du point de vue du nombre et du type d'indicateurs consultés, ou de l'évolution de la qualité des prises de décision, on a noté une variabilité interindividuelle importante.

Un participant en particulier est plus actif que les cinq autres puisqu'il a relancé son analyse dans les quatre conditions expérimentales :

- La relance est apparue au cours de 7 prises de décision.
- La prise d'information a représenté un total de 13 valeurs d'indicateurs (3 fois la marge libre séquentielle, 6 fois la vue complète de l'atelier, 2 fois la qualité dans le meilleur des cas, et 2 fois la qualité dans le pire des cas).
- Parmi les 7 prises de décision, on a observé 4 maintiens dans une bonne solution, 2 maintiens dans une mauvaise solution, et seulement 1 amélioration de mauvaise solution.

Un participant a été actif dans deux des quatre conditions expérimentales (i_2r_1 : 6 indicateurs/risque faible et i_1r_2 : 2 indicateurs/risque fort) :

- La relance est apparue au cours de 3 prises de décision.
- La prise d'information a représenté un total de 4 valeurs d'indicateurs (1 fois la vue complète de l'atelier, 1 fois la qualité dans le meilleur des cas, 2 fois la durée opératoire).
- Parmi les 3 prises de décision, on a observé 2 dégradations d'une solution bonne et 1 maintien dans une mauvaise solution.

Les 4 participants restants ont produit le comportement suivant :

- La relance est apparue au cours de 2 prises de décision pour l'un des quatre, et pour 1 seule prise de décision pour les trois autres.
- Le nombre de valeurs de prises d'information par prise de décision varie entre 1 et 5. Aucun indicateur n'est privilégié.
- Cependant, il est à noter que pour ces 5 prises de décision, réparties chez ces 4 participants, toutes ont été du type "maintien dans une solution bonne".

Les informations liées à cette relance de l'analyse sont résumées dans le tableau 15.

Participant	Nombre de conditions expérimentales (sur 4)	Nombre de PD (sur 46)	Nombre de PI	Indicateurs consultés	Évolution de la qualité de la solution humaine
1	4 (i1r1; i1r2 ; i2r1 ; i2r2)	7	13	Marge libre séquentielle (3) Vue complète de l'atelier (6) Qualité dans le meilleur des cas (2) Qualité dans le pire des cas (2)	Maintien SB (4) Maintien SM (2) Amélioration SM (1)
2	2 (i2r1 ; i1r2)	3	4	Vue complète de l'atelier (1) Qualité dans le meilleur des cas (1) Durée opératoire (2)	Dégradation SB (2) Maintien SM (1)
3	1 (i1r2)	1	5	Marge libre séquentielle (3) Vue complète de l'atelier (2)	Maintien SB (1)
4 et 5	0	0	0	-	-
6	1 (i2r1)	1	1	Durée opératoire (1)	Maintien SB (1)
7	1 (i2r2)	1	4	Marge libre séquentielle (1) Qualité dans le meilleur des cas (1) Qualité dans le pire des cas (1) Durée opératoire (1)	Maintien SB (1)
8	0	0	0	-	-
18	1 (i2r2)	2	4	Marge libre séquentielle (1) Qualité dans le meilleur des cas (1) Qualité dans le pire des cas (1) Rang dans la gamme (1)	Maintien SB (2)

Tableau 15 : Relance d'analyse après la proposition de la machine. Ont été distinguées les conditions expérimentales concernées par la relance, le nombre de prises de décision (PD), le nombre de prises d'information (PI), les indicateurs consultés, et l'évolution de la qualité de la première solution de l'opérateur (bonne – SB, ou mauvaise – SM).

4.3.3 ÉVOLUTION DE LA PRISE DE DECISION

Lorsqu'on examine l'évolution de la prise de décision (figure 29), on observe que dans une large majorité des cas, l'ordonnanceur ne change pas d'avis lorsque la machine lui fait une proposition, $d = 0,92$; $t(8) = 43,82$; $p < .001$; $\delta > 0,89$.

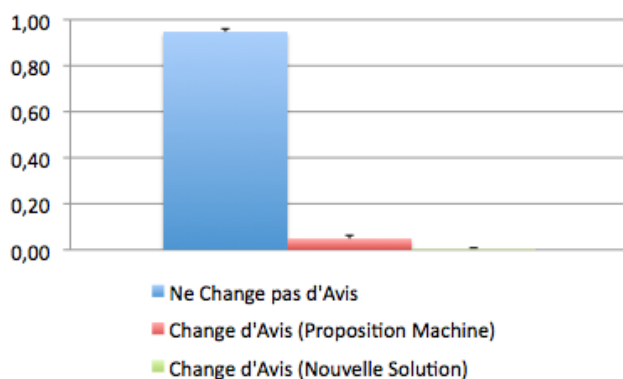


Figure 29 : Évolution de l'avis de prise de décision (proportion moyenne) en présence d'une proposition de la machine (condition avec contrôle mutuel). Les "moustaches" représentent les erreurs types.

4.4 PERFORMANCE GLOBALE D'ORDONNANCEMENT

La performance globale d'ordonnancement a été mesurée à partir de critères calculés par la machine : le retard algébrique maximum (L_{max}) et la durée totale de mise en œuvre de l'ordonnancement (C_{max}). Pour la présentation suivante des résultats liés à la performance globale, il est important de préciser que dans la condition où l'on induisait chez le participant la représentation d'un risque fort de panne sur le poste 5 de la chaîne, la panne se produisait réellement et elle était subie par l'ordonnanceur. Il en résultait nécessairement une forte dégradation de la performance, par rapport à la condition avec risque faible. Par conséquent, il était attendu d'observer un effet massif du risque, résultat considéré comme trivial car indépendant des décisions de l'opérateur.

4.4.1 RETARD ALGEBRIQUE MAXIMUM

On rappelle que la signification de cet indicateur de performance est la suivante : plus le retard algébrique maximum est petit, meilleure est la performance.

Dans la situation avec risque faible (figure 30), la performance se dégrade avec la richesse des informations. Plus précisément, le retard algébrique maximum augmente lorsque le nombre d'indicateurs à disposition pour prendre une décision augmente. L'effet est notable et la différence est significative, $d = 56,8$; $t(16) = 6,65$; $p < .001$; $\delta > 45,4$. Dans la situation avec risque fort (figure 30), la performance semble s'améliorer avec plus d'indicateurs. Mais il est difficile de conclure à un effet notable, et on ne peut conclure que l'effet vrai est dans le même sens que l'effet observé, $d = -22,7$; $t(16) = -1,37$; $p > .19$; $\delta < -0,5$.

Par ailleurs, bien que les observations le suggèrent, on ne peut pas conclure à un effet notable dans le sens d'une amélioration de la performance grâce à la présence du contrôle mutuel, aussi bien dans la condition avec risque faible, $d = -13,8$; $t(16) = -1,16$; $p > .26$; $\delta < 2,1$, que dans la condition avec risque fort, $d = -14,0$; $t(16) = -1,19$; $p > .25$; $\delta < 1,7$.

Enfin, comme nous l'avons indiqué précédemment, l'effet du risque est notable, $d = -208,6$; $t(16) = -25,18$; $p < .001$; $\delta < -197,5$, mais ce résultat est trivial.

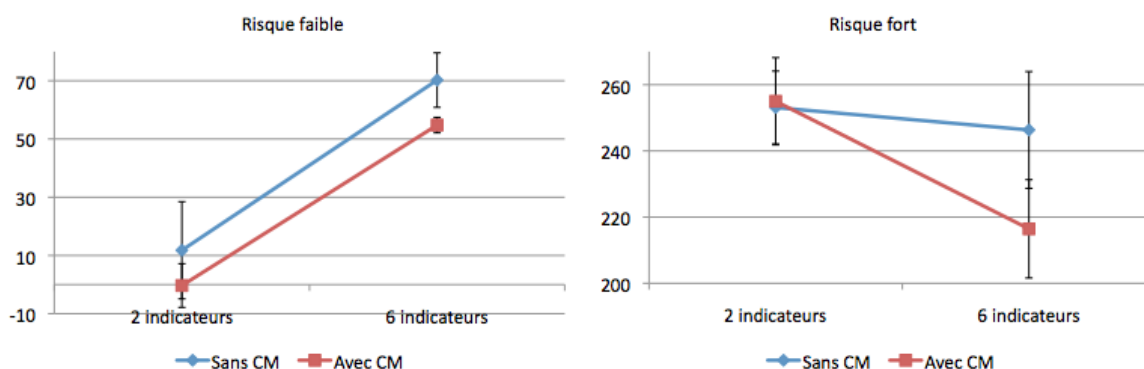


Figure 30 : Retard algébrique maximum (L_{max} en minutes) moyen selon la richesse des informations (2 ou 6 indicateurs) et le contrôle mutuel (avec ou sans CM) dans la situation avec risque faible et dans la situation avec risque fort. Les "moustaches" représentent les erreurs types

4.4.2 DUREE TOTALE DE MISE EN ŒUVRE DE L'ORDONNANCEMENT

On rappelle que la signification de cet indicateur de performance est la suivante : plus la durée totale de mise en œuvre de l'ordonnancement est petite, meilleure est la performance.

Dans la situation avec risque faible (figure 31), la performance s'améliore avec la richesse des informations. Plus précisément, la durée totale diminue lorsque le nombre d'indicateurs à disposition pour prendre une décision augmente. Toutefois, on ne peut pas conclure à un effet notable, $d = -13,4$; $t(16) = -0,99$; $p > .34$; $\delta < 4,7$. Dans la situation avec risque fort (figure 31), le constat est le même car la performance semble s'améliorer avec plus d'indicateurs. Toutefois, il est difficile de conclure à un effet notable, et on ne peut seulement conclure que l'effet vrai est dans le même sens que l'effet observé, $d = -31,2$; $t(16) = -1,61$; $p > .13$; $\delta < -5,3$.

Par ailleurs, bien que les observations le suggèrent, on ne peut pas conclure à un effet négligeable du contrôle mutuel dans la condition avec risque faible, $d = 4,8$; $t(16) = 0,27$; $p > .79$; $|\delta| < 32,4$, et à un effet notable du contrôle mutuel dans la condition avec risque fort, $d = -15,3$; $t(16) = -1,28$; $p > .22$; $\delta < 0,7$.

Enfin, comme nous l'avons indiqué précédemment, l'effet du risque est notable, $d = -181,7$; $t(16) = -15,92$; $p < .001$; $\delta < -166,5$, mais ce résultat est trivial.

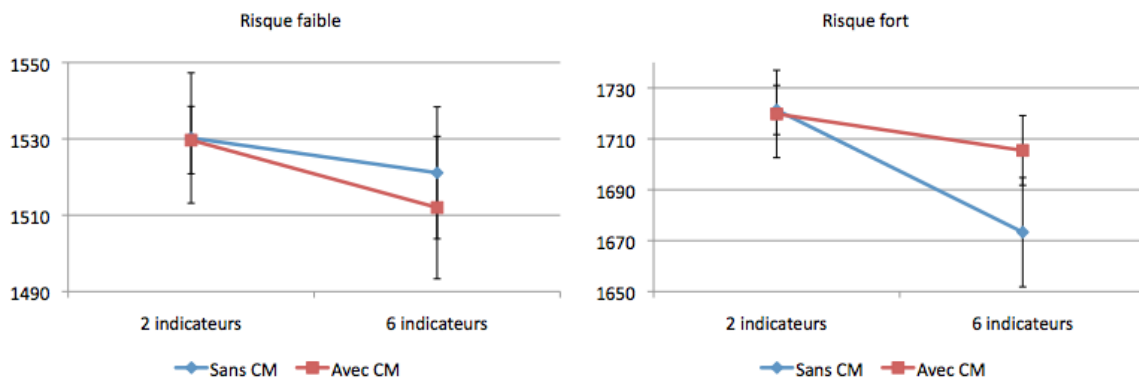


Figure 31 : Durée totale moyenne de mise en œuvre de l'ordonnancement (*Makespan* ou *Cmax* en minutes) selon la richesse des informations (2 ou 6 indicateurs) et le contrôle mutuel (avec ou sans CM) dans la situation avec risque faible et dans la situation avec risque fort. Les "moustaches" représentent les erreurs types.

4.5 DISCUSSION

Le tableau 16 présente un résumé des principaux résultats de cette expérience :

Avant la proposition de la machine	Après la proposition de la machine	Performance globale	
		Risque faible	Risque fort
<p>QUALITE DES DECISIONS Bonnes solutions humaines – Amélioration avec plus d'indicateurs – Pas d'effet anticipatif du contrôle mutuel – Amélioration avec le risque fort de panne</p> <p>DUREE DES DECISIONS Augmente avec plus d'indicateurs Pas d'effet anticipatif du contrôle mutuel</p> <p>PRISES D'INFORMATION Augmente avec plus d'indicateurs Pas d'effet anticipatif du contrôle mutuel Marge libre séquentielle privilégiée quel que soit le nombre d'indicateurs. Avec 6 indicateurs, les qualités (meilleur et pire des cas) sont le moins consultées</p>	<p>QUALITE DES DECISIONS Pas de dégradation des bonnes solutions MAIS pas d'amélioration des mauvaises solutions</p> <p>PRISES D'INFORMATION Faible relance de l'analyse des indicateurs Variabilité interindividuelle</p> <p>ÉVOLUTION DE LA DECISION Pas de changement d'avis</p>	<p>LMAX Dégradation avec plus d'indicateurs Pas de conclusion d'effet du contrôle mutuel</p> <p>CMAX Pas de conclusion d'effet des indicateurs Pas de conclusion d'effet du contrôle mutuel</p>	<p>LMAX Amélioration avec plus d'indicateurs Pas de conclusion d'effet du contrôle mutuel</p> <p>CMAX Amélioration avec plus d'indicateurs Pas de conclusion d'effet du contrôle mutuel</p>

Tableau 16 : Résumé des principaux résultats de l'expérience. Le Lmax (ou *Maximum Lateness*) est le retard algébrique maximum. Le Cmax (ou *Makespan*) est la durée totale de mise en œuvre de l'ordonnancement.

En s'inscrivant dans une perspective pluridisciplinaire avec la recherche opérationnelle, l'objectif principal de cette étude a été d'évaluer un outil d'assistance à l'ordonnancement intra-groupes : la machine proposait à l'opérateur un regroupement d'opérations sur la base d'un algorithme mathématique, puis à l'intérieur de chaque groupe la tâche de l'opérateur était de choisir l'ordre de ces opérations. Il appartenait donc à l'opérateur de prendre la décision finale d'ordonnancement intra-groupes. Pour l'aider dans ses prises de décision, l'outil d'assistance proposé était défini par un ensemble d'indicateurs. Parmi ces indicateurs, la qualité dans le meilleur des cas a particulièrement été développée dans le cadre du travail de thèse de Pinot (2008).

A partir de cette problématique suggérée par la recherche opérationnelle, nous avons examiné un questionnement théorique fondé sur des travaux de la psychologie. Plus particulièrement, nous avons étudié l'une des modalités de la coopération homme-machine, le contrôle mutuel, à partir d'une situation dans laquelle une proposition de la machine était

faite à l'issue de la décision de l'ordonnanceur. Par ailleurs, dans une approche plus exploratoire, nous avons étudié l'effet d'un risque de panne d'une machine d'atelier, sur les décisions d'ordonnancement intra-groupes de l'opérateur.

Globalement, les résultats de cette étude montrent qu'avant la proposition de la machine, l'ordonnanceur prend de bonnes décisions, et cette qualité des décisions s'améliore lorsque plus d'indicateurs sont proposés. L'amélioration des prises de décision de l'opérateur peuvent s'expliquer par une augmentation de son niveau d'activité (Roth, Bennett, & Woods, 1988). En proposant des informations plus riches à l'ordonnanceur, on l'a encouragé à analyser plus finement le problème, en examinant l'ensemble des indicateurs dont il avait à disposition. Cette hypothèse est validée lorsque l'on observe les durées de prise de décision et le nombre de prises d'information qui augmentent avec six indicateurs.

Même si tous les indicateurs sont consultés, la marge libre séquentielle reste l'indicateur privilégié alors que la qualité dans le meilleur des cas (l'indicateur proposé par Pinot, 2008) n'est que faiblement consultée, reléguée après la durée opératoire et le rang dans la gamme/rang actuel. L'objectif des participants était de minimiser les retards. On s'attendait donc à ce que trois indicateurs (marge libre séquentielle, qualité dans le meilleur des cas et qualité dans le pire des cas) soient les plus favorisés car ils donnent tous des informations sur les retards dans l'atelier.

Cette supériorité de consultation de la marge libre séquentielle s'explique peut-être par son intérêt : la capacité d'absorber des retards dans le futur. En effet, bien que nous n'ayons pas eu d'attentes précises sur l'effet du risque d'une panne machine dans l'atelier, ce facteur a eu un impact sur la performance d'ordonnancement à la fois localement (prises de décision) et plus globalement (retard algébrique maximum et durée totale de mise en œuvre de l'ordonnancement). Or c'est précisément l'intérêt que présente la marge libre séquentielle, qui a peut-être permis aux ordonnanceurs d'anticiper que la panne allait retarder la production. La présence d'un risque fort a peut-être également conduit l'opérateur à prendre plus de précautions sur la qualité de l'ordonnancement, en cherchant à introduire des degrés de liberté pour être robuste aux aléas, comme l'apparition d'une panne machine. Une analyse plus fine de la situation par l'ordonnanceur aurait été réalisée pour tenter de réduire les conséquences de cet événement indésirable. Le risque aurait alors tendance à accroître le niveau d'exigence sur la qualité de chaque prise de décision et donc sur la performance d'ordonnancement. Il faudrait cependant chercher à expliquer pourquoi dans la situation avec risque faible et avec plusieurs indicateurs, la performance s'est détériorée particulièrement du point de vue du retard algébrique maximum.

Par ailleurs, on s'attendait à observer une augmentation du niveau d'activité de l'opérateur en présence de contrôle mutuel, et plus précisément à partir du moment où sa décision était critiquée par la machine (désaccord). Au-delà de l'absence d'un effet anticipatif du contrôle mutuel, l'effet n'a par ailleurs que très peu agi après la proposition de la machine. En effet, nous avons observé une relance de l'analyse des indicateurs très modeste, et cette relance était caractérisée par une variabilité interindividuelle entre opérateurs.

Du point de vue de l'évolution de la qualité des décisions, le contrôle mutuel n'a pas non plus produit l'effet attendu. Lorsque l'ordonnanceur proposait une mauvaise première décision, la proposition de la machine n'a pas conduit à l'améliorer.

Enfin, dans la majorité des cas, le choix initial de l'ordonnanceur ne changeait pas en présence de la proposition de la machine. D'autres informations ont pu jouer un rôle non négligeable dans les décisions humaines d'ordonnancement intra-groupes et pourraient expliquer qu'il n'ait pas changé d'avis. Par exemple, la vue localisée sur le poste 2 (figure 22) a peut-être renseigné le participant sur l'apparition d'interactions entre palettes circulant en boucle sur les rails autour de ce poste. Cela l'aurait conduit à adopter une règle d'ordonnancement du type FCFS (*First-Come First-Served*) que l'on pourrait formuler ici de la manière suivante : "pour un groupe de palettes donné, la première arrivée à proximité de la zone du poste 2 sera la première traitée par ce poste". Comme nous n'avons pas compté les prises d'information réalisées à partir de la vue localisée sur le poste 2, nous n'avons pas pu comparé la proportion de consultation de cet indicateur "vue locale du poste 2" avec celle des autres indicateurs proposés aux participants.

5 CONCLUSION

Au travers de cette approche "ordonnancement de groupes" proposée par la recherche opérationnelle, l'humain est considéré dans le système homme-machine comme le "décideur final" de l'ordonnancement, puisque c'est lui qui réalise l'ordonnancement intra-groupes, sur la base de groupes d'opérations définis par la machine. Du point de vue de la recherche opérationnelle, le fait de proposer à l'ordonnanceur des groupes d'opérations devrait lui simplifier la tâche car il ne lui reste plus qu'à ordonnancer à l'intérieur de chaque groupe. On sait qu'une des caractéristiques des situations d'ordonnancement est qu'elles sont marquées par la complexité (Cegarra, 2004). En effet, d'un point de vue mathématique, les problèmes d'ordonnancement sont qualifiés de NP-complets car elles conduisent rapidement à l'exposition combinatoire. Compte tenu des capacités de traitement dont sont actuellement dotées les ordinateurs, il pourrait être séduisant d'adopter un tel système homme-machine pour résoudre les problèmes d'ordonnancement, la machine réalisant en quelques minutes des calculs que l'ordonnanceur mettrait plusieurs heures voire plusieurs jours à faire (Crawford, MacCarthy, Wilson, & Vernon, 1999 ; Nakamura & Salvendy, 1994).

Dans une perspective psychologique, une telle répartition des fonctions entre l'opérateur et la machine pose la question de son intérêt pour l'ordonnanceur humain. En effet, du point de vue de l'ordonnanceur humain, est-ce réellement plus simple d'ordonnancer à l'intérieur de groupes déjà définis ou préférerait-il ne pas être contraint par ces groupes pré-définis ? De même, est-ce qu'il y aurait un intérêt pour l'ordonnanceur à participer à la définition des groupes d'opérations ? Enfin, on peut se demander si cette approche de la répartition des fonctions, telle qu'elle est définie actuellement par la recherche opérationnelle, ne pourrait pas conduire à une perte progressive de l'expertise des opérateurs, comme d'autres travaux ont pu le mettre en évidence (Bainbridge, 1983) ?

Dans cette étude, nous n'avons pas évalué l'intérêt de l'ordonnancement de groupes du point de vue de l'ordonnanceur. On pourrait par exemple comparer cette situation à celle dans laquelle il réaliserait manuellement l'ordonnancement des opérations sans un travail préalable de la machine. On pourrait aussi déterminer des situations expérimentales dans lesquelles l'ordonnanceur participerait, en étroite collaboration avec la machine, à différentes étapes de définition des groupes d'opérations.

L'idée défendue par Pinot (2008) était que, dans le contexte de l'ordonnancement de groupes, l'opérateur humain peut apporter beaucoup à l'utilisation de la flexibilité proposée par cette méthode. Il dispose d'une vision de l'atelier, il peut négocier et dialoguer avec les différents niveaux de l'entreprise, etc. et peut ainsi faire des choix plus judicieux que la machine, notamment lorsqu'il s'agit d'anticiper l'apparition d'un aléa. Même si nous avons essayé de rendre la situation expérimentale concrète (une chaîne d'assemblage d'arbres pour des boîtes de vitesses), elle manquait peut-être de réalisme pour observer la mise en œuvre des compétences de l'ordonnanceur humain.

Toutefois, les résultats obtenus dans cette étude montrent un rôle non négligeable du risque de panne sur l'amélioration de la performance d'ordonnancement. Il pourrait être intéressant de poursuivre des travaux dans cette perspective. En répliquant ce genre d'expérience, on pourrait par exemple faire varier le nombre et le type d'aléas (par ex., retard de livraison de matériaux, absentéisme dans l'atelier, périodes de maintenance nécessitant l'arrêt de postes, commande urgente, etc.) et observer leurs effets sur l'activité humaine d'ordonnancement.

6 BIBLIOGRAPHIE

- Artigues, C. (1997). *Ordonnancement en temps réel d'ateliers avec temps de préparation des ressources*. Thèse, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.
- Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. *Automatica*, 19, 775-779.
- Billaut, J.C. (1993). *Prise en compte des ressources multiples et des temps de préparation dans les problèmes d'ordonnancement en temps réel*. Thèse, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.
- Cegarra, J. (2004). *La gestion de la complexité dans la planification : le cas de l'ordonnancement*. Thèse, Université Paris 8, France.
- Crawford, S., MacCarthy, B.L., Wilson, J.R., & Vernon, C. (1999). Investigating the work of industrial schedulers through field study. *Cognition, Technology & Work*, 1, 63-77.
- Esswein, C. (2003). *Un apport de flexibilité séquentielle pour l'ordonnancement robuste*. Thèse, Université François Rabelais, Tours, France.
- Mathy, F., & Feldman, J. (2012). What's magic about magic numbers? Chunking and data compression in short-term Memory. *Cognition*, 122, 346-362.
- Nakamura, N., & Salvendy, G. (1994). Human planner and scheduler. In G. Salvendy, & W. Karwowski (Eds.), *Design of work and development of personnel in advanced manufacturing* (pp.331-354). New York: Wiley.
- Parasuraman, R., & Riley, V. (1997). Humans and automation: use, misuse, disuse, abuse. *Human Factors*, 39, 230-253.
- Pinot, G. (2008). *Coopération homme-machine pour l'ordonnancement sous incertitudes*. Thèse, Université de Nantes, France.
- Roth, E.M., Bennett, K.B., & Woods, D.D. (1988). Human interaction with an "intelligent" machine. In G. Mancini, D.D. Woods, & E. Hollnagel (Eds.) *Cognitive Engineering in Complex Dynamic Worlds* (pp. 23-69). London, UK: Academic Press.

Thomas, V. (1980). *Aide à la décision pour l'ordonnancement d'atelier en temps réel*. Thèse, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.

CHAPITRE 9 : PERSPECTIVES : LA PLANIFICATION DES TRAVAUX DE MAINTENANCE FERROVIAIRE

1	INTRODUCTION	183
2	LA PLANIFICATION DE LA MAINTENANCE DE LA SIGNALISATION A LA SNCF	184
2.1	L'ACTIVITE D'ORDONNANCEMENT S'ARTICULE AUTOUR DE PLUSIEURS TACHES	184
2.2	L'INCERTITUDE DES INFORMATIONS ET LA GESTION DES ALEAS	184
2.3	LA GESTION DE CONTRAINTES DANS L'ORDONNANCEMENT DES OPERATIONS DE MAINTENANCE	185
2.4	LE SYSTEME DE REPRESENTATION ET DE TRAITEMENT EXTERNE UTILISE	186
3	PERSPECTIVES : DESCRIPTION DU PROJET DE RECHERCHE	187
3.1	CONTEXTE DE RECHERCHE : L'INTRODUCTION D'UNE GMAO.....	187
3.2	NOS OBJECTIFS DE RECHERCHE.....	188
3.3	QUESTIONS DE RECHERCHE	188
3.4	FACTEURS EXPERIMENTAUX	189
3.5	HYPOTHESES DE RECHERCHE	189
3.6	PROTOCOLE DE RECHERCHE.....	191
3.6.1	DESCRIPTION DES PARTICIPANTS	191
3.6.2	DESCRIPTION DES PRINCIPALES PHASES DU PROTOCOLE.....	191
3.6.3	DESCRIPTION DE LA TACHE EXPERIMENTALE ET DE L'INTERFACE	191
3.7	METHODE DE RECUEIL DES DONNEES	193
4	CONCLUSION.....	193
5	BIBLIOGRAPHIE	193

1 INTRODUCTION

Ce chapitre présente des perspectives d'étude de l'ordonnancement dans un domaine d'application : le contexte ferroviaire. La société nationale des chemins de fer français (SNCF) est une entreprise publique caractérisée par plusieurs missions dont le transport de voyageurs (ex. : TVG, TER, Transilien), le transport de marchandises (Fret), et la gestion des infrastructures ferroviaires (investissement et maintenance). Pour que chacune de ces missions puisse être réalisée, des activités d'ordonnancement sont mises en œuvre. C'est par exemple le cas lorsqu'il agit d'organiser les horaires des trains (Cegarra & Hoc, 2011).

Dans le cadre d'une série d'entretiens menés pendant la thèse, des activités d'ordonnancement ont été identifiées dans le domaine de la gestion des infrastructures ferroviaires. Plus particulièrement, nous avons engagé une investigation de la planification des travaux de maintenance des installations électriques par des dirigeants de proximité du service de signalisation électrique générale (DPX SEG) à la SNCF (Guerin, 2009). En raison de plusieurs difficultés techniques et organisationnelles, nous n'avons pu mener les expérimentations prévues avant la rédaction du manuscrit de thèse. Toutefois, il nous semble que le projet de recherche est suffisamment avancé pour en décrire ici les principaux objectifs, et pour justifier son articulation avec le travail réalisé dans d'autres situations

d'ordonnement (conception d'emploi du temps universitaire, ordonnancement manufacturier).

Tout d'abord nous présenterons les principales caractéristiques de cette situation d'étude. Nous insisterons notamment sur l'activité de gestion de contraintes chez les ordonnanceurs de la maintenance ferroviaire que nous avons rencontrés, les DPX SEG. Ensuite, nous tracerons les perspectives de recherche que nous avons adoptées, en lien avec l'activité de gestion de contraintes. Nous formulerons alors quelques questions et hypothèses de recherche ainsi que les grandes lignes du protocole expérimental qui va être mis en place.

2 LA PLANIFICATION DE LA MAINTENANCE DE LA SIGNALISATION A LA SNCF

Au partir d'entretiens menés pendant la thèse (Guerin, 2009), nous avons cherché à décrire la réalité de cette situation d'ordonnement pour les dirigeants de proximité du service de signalisation électrique générale (DPX SEG). Nous proposons ici d'en décrire les principales caractéristiques.

2.1 L'ACTIVITE D'ORDONNEMENT S'ARTICULE AUTOUR DE PLUSIEURS TACHES

L'activité d'ordonnement du DPX SEG, au sens de l'affectation de ressources à des opérations de maintenance, est distribuée dans le temps. Cette tâche s'insère entre des appels téléphoniques (effectués ou reçus), des consultations et envois d'emails, des consultations de différents logiciels, des déplacements sur des chantiers, diverses réunions, etc. Toutes ces tâches permettent notamment au DPX SEG de :

- *Recueillir des informations.* Par exemple, au cours d'une réunion de coordination, il apprend que des travaux prévus par le service de la voie vont nécessiter une procédure d'arrêt de circulation des trains. A partir de cette information, il va ordonner certains travaux de signalisation en parallèle. De l'information est également recueillie lorsqu'un courriel indique au DPX SEG qu'un de ses agents est convoqué pour une visite médicale. Le jour de la visite, cet agent ne pourra donc pas être affecté à une opération de maintenance.
- *Négocier.* Par exemple, il négocie par téléphone avec un de ses agents SEG pour qu'il intervienne sur un incident technique. Il peut aussi négocier avec son collègue de la voie la disponibilité d'un agent voie (annonceur)²⁵ pour les besoins d'un chantier qu'il coordonne, etc.

2.2 L'INCERTITUDE DES INFORMATIONS ET LA GESTION DES ALEAS

L'activité d'ordonnement du DPX SEG est réalisée dans un contexte où des informations peuvent être incomplètes voire incertaines. Au cours d'une réunion par exemple, le DPX peut apprendre que des travaux d'investissement²⁶ sont prévus, et qu'ils nécessiteront des besoins en agents SEG. Toutefois ni la période ni le nombre d'agents SEG ne lui sont

²⁵ Agent de la voie habilité pour annoncer l'arrivée d'un train.

²⁶ Par exemple les GOP (grosse opérations programmées : renouvellement de voie et de ballast, renouvellement d'appareil de voie, etc.) que la SNCF distingue des travaux de maintenance.

précisés. Il va devoir considérer ces informations incomplètes, puisqu'il existe un risque pour que la réalisation de ce chantier d'investissement remette en question l'état actuel (ou futur) de son ordonnancement.

Le contexte de l'ordonnancement ferroviaire est également marqué par la gestion de nombreux aléas qui peuvent conduire à des modifications plus ou moins profondes de l'ordonnancement en cours :

- *Aléas liés à des incidents techniques.* Il s'agit de dysfonctionnements d'installations de signalisation liés par exemple à un phénomène climatique ou à des actes de vandalisme. Ce type d'aléa nécessite pour le DPX SEG d'ordonnancer une maintenance corrective²⁷. Par ailleurs, au cours de la maintenance préventive systématique³, les agents de terrain peuvent repérer sur les infrastructures ferroviaires des éléments défectueux qui n'ont pas d'effet sur la sécurité des trains. L'information est alors transmise au DPX qui ordonnancera ensuite des opérations de maintenance préventive conditionnelle³.
- *Aléas liés à l'indisponibilité de ressources (matérielles ou humaines).* Du point de vue des ressources humaines on peut citer par exemple : un agent SEG absent pour congé maladie, un agent SEG devenu indisponible car "prêté" pour des besoins externes à la maintenance de la signalisation²⁸. Du point de vue des ressources matérielles, le retard d'un train peut remettre en cause la disponibilité d'une voie pour réaliser des opérations de maintenance.

2.3 LA GESTION DE CONTRAINTES DANS L'ORDONNANCEMENT DES OPERATIONS DE MAINTENANCE

L'activité d'ordonnancement nécessite pour le DPX SEG de gérer une multitude de contraintes, essentiellement de nature temporelle :

- *Date d'échéance.* Par exemple, la liste des opérations de maintenance préventive systématique (MPS) est générée automatiquement par un logiciel qui prescrit la date d'échéance²⁹.
- *Succession d'opérations.* Par exemple, certains travaux nécessitent au préalable la réalisation de plusieurs opérations.
- *Disponibilité de ressources.* Par exemple, outre la disponibilité d'agent(s) SEG (ressources humaines), certaines opérations de MPS³⁰ nécessitent la disponibilité de la voie (ressource matérielle). L'ordonnanceur doit donc mettre en place une procédure d'arrêt de circulation des trains en respectant des délais pour faire sa demande. Pour

²⁷ Différents types de maintenances existent : corrective (suite à un incident), préventive systématique (selon une périodicité), préventive conditionnelle (suite à une maintenance préventive systématique).

²⁸ Par exemple pour les besoins du service de maintenance de la Voie, ou encore pour accompagner une visite de sécurité qui nécessite un agent SEG habilité pour manipuler certaines installations électriques. Parfois ces demandes externes se font tardivement et sont alors subies par le DPX SEG.

²⁹ Cette date n'est pas entièrement définie puisque le logiciel ne prescrit que le mois de réalisation. A cette date prescrite s'ajoute une durée tolérée de dépassement. Trois durées permettent de distinguer des opérations "critiques" (30 jours), d'opérations "moins critiques" (60 ou 90 jours).

³⁰ La plupart des opérations de MPS sont exécutées de manière autonome par les agents SEG, sans ordonnancement préalable. Certaines opérations nécessitent cependant d'être ordonnancées par le DPX SEG.

certaines opérations, d'autres ressources matérielles (ex. : nacelle élévatrice) ou humaines (annonceurs, conducteurs travaux, etc.) peuvent également être requises.

D'autres types de contraintes ont également été évoqués au cours des entretiens :

- *Compétences d'un agent.* L'affectation d'un agent SEG sur une opération nécessite de considérer son habilitation à réaliser l'opération (ex. : manipuler des installations électriques à très haute tension). Le maintien des compétences passe par des formations qui doivent être à jour.
- *Contraintes "sociales".* Certaines opérations nécessitent que plusieurs agents travaillent en équipe. Dans la composition des équipes, l'ordonnanceur peut considérer les "incompatibilités d'humeurs".

2.4 LE SYSTEME DE REPRESENTATION ET DE TRAITEMENT EXTERNE UTILISE

Pour représenter leur ordonnancement, la plupart des DPX SEG utilisent des planning "faits maison" sur Excel®. Sur ce type de représentation apparaît généralement en ligne le nom des agents et en colonne les jours de la semaine (figure 32).

Semaine n°	20	du	15 mai 2010	au	21 mai 2010			
	Samedi 15 mai 2010	Dimanche 16 mai 2010	Lundi 17 mai 2010	Mardi 18 mai 2010	Mercredi 19 mai 2010	Jeudi 20 mai 2010	Vendredi 21 mai 2010	
PAYRAUDEAU	RP	RP	F3	FV	Maintenance Parcours 8			
OLIVIER	RP	RP	Remplacement CBR PN 388	Maintenance Parcours 8				
MOREAU	RP	RP	VM	Maintenance Parcours 7				
ROBERT	RP	RP	VM 10h00	Maintenance Parcours 7				
DANIEL	RP	RP	Maintenance Aiguilles JJ CARNAUD 10h00-12h00 tous les jours					Délégation
LANDATS	RP	RP	Maintenance Aiguilles JJ CARNAUD 10h00-12h00 tous les jours					
BOULAY		RP	Maintenance Parcours 6	F3	Maintenance Parcours 6			
JAUNET	RP	RP	CA	CA	CA	CA	RP7	
DELESSARD	RP	RP	Pancartes Repérages	Maintenance parcours 7	Remplacement RV PN 398	Maintenance parcours 7	Travaux GOP	
EON	RP	RP	4 nuits incorpo Coueron					
CLENET	RP	RP	Moulin Neuf	Moulin Neuf	Moulin Neuf	Moulin Neuf	Moulin Neuf	
CHEGANCAS	RP	RP	Formation La Roche Migenes					
TRANCHANT	RP	RP						
BLOYET	RP	RP	Remplacement CBR PN 388		Formation PIPC	Formation PIPC		
DURAND	RP	RP						
FRASLIN	RP	RP	Formation PIPC	Formation PI PC + radio le 20 17h30 + PN398 le 19+MTPC 13h30 Je			SPRC sébastien	

Figure 32 : Exemple de SRT externe utilisé par un DPX SEG. En lignes apparaît le nom des agents SEG et en colonnes les jours de la semaine. Les cases du planning représentent l'affectation d'un agent à une tâche ou une indisponibilité (repos, congé, visite médicale, etc.). Il n'existe pas d'homogénéité entre DPX SEG quant à l'utilisation des intitulés et des codes couleurs.

L'utilisation de ce Système de Représentation et de Traitement (SRT) externe n'est pas homogène chez tous les DPX SEG. Les entretiens et les observations réalisées nous ont permis de mettre en évidence la nécessité de rendre visibles certaines informations par un code couleur propre à chaque utilisateur (par ex. : surligner en rouge les opérations nécessitant une demande d'interception de la voie réalisée au moins 3 semaines avant la

date prévue). Ce type de comportement est lié à la problématique de la visibilité des contraintes que nous chercherons à examiner dans ce projet de recherche.

3 PERSPECTIVES : DESCRIPTION DU PROJET DE RECHERCHE

3.1 CONTEXTE DE RECHERCHE : L'INTRODUCTION D'UNE GMAO

Le projet de recherche s'inscrit dans un contexte d'évolution organisationnelle de l'entreprise ferroviaire qui cherche à introduire un outil de gestion de la maintenance assistée par ordinateur (GMAO). D'un point de vue informatique, la GMAO est décrite comme un système d'information disposant d'un patrimoine (l'ensemble des installations de la SNCF) et d'un ensemble de règles³¹ déclenchant systématiquement des opérations de maintenance.

Précisons que la GMAO sera *un outil de planification et non d'ordonnancement*. La distinction entre le service de planification et le service d'ordonnancement est généralement effective au sein d'une entreprise (Blondel, 2007). Comme c'est le cas dans la gestion de production, la SNCF considère que la planification ne traite pas de l'affectation des ressources. La tâche du DPX SEG sera donc de raffiner la planification de la GMAO en ordonnant l'affectation de ressources à des opérations de maintenance, en tenant compte de contraintes. Par conséquent, les DPX SEG continueront à concevoir des plannings sur Excel®.

L'objectif du projet de recherche défini avec la SNCF est de déterminer quelles vont être les implications liées à l'introduction de la GMAO chez les dirigeants de proximité de la maintenance signalisation (DPX SEG). Suite à plusieurs réunions avec le responsable du projet à la SNCF, nous avons caractérisé deux des fonctionnalités proposées par l'outil :

1. *Un outil de planification proposant au DPX SEG des dates entièrement spécifiées (jour, mois)*. Il s'agit d'une nouveauté par rapport au logiciel actuel qui propose des dates partiellement spécifiées (mois). Cette fonctionnalité impliquera une modification de la flexibilité dans l'activité du DPX SEG, définie comme les degrés de liberté présents *a priori* dans l'ordonnancement (Pinot, 2008). Cette flexibilité aura un effet sur les marges de manœuvre du DPX SEG, notamment lorsqu'il s'agira de modifier son ordonnancement.
2. *Un outil de planification permettant de visualiser un plan de charge* La GMAO permettra de représenter la liste des opérations de maintenance préventive systématique prévues pour une période donnée. Cette fonctionnalité permettrait au DPX SEG de détecter des pics, représentant une charge de travail importante, et de mettre en place des stratégies pour lisser la charge dans le temps.

³¹ Ces règles décrivent des cycles de maintenance à appliquer en fonction par exemple de critères géographique, du type des installations, de leur criticité et de leur utilisation.

3.2 NOS OBJECTIFS DE RECHERCHE

Pour tenter de satisfaire notre commanditaire et nos propres intérêts de recherche, nous avons cherché à articuler l'objectif fixé par la SNCF avec nos objectifs de recherche. Au cours des différents entretiens menés pendant la thèse (section 2), les informations recueillies nous ont permis de mettre en évidence plusieurs pistes de travail pertinentes pour l'étude de l'ordonnancement. Par exemple, examiner la gestion des incertitudes et des aléas par les DPX SEG pourrait être l'occasion d'observer les processus adaptatifs de l'ordonnanceur.

Dans la continuité du travail déjà réalisé, nous avons plutôt choisi de mettre l'accent sur l'étude de l'activité de gestion de contraintes par les DPX SEG, en fonction de différents niveaux d'expertise. Dans le chapitre 2, nous proposons qu'au niveau tactique, l'activité d'ordonnancement consiste à articuler dans un SRT externe, la satisfaction de contraintes qui s'expriment souvent dans des SRT différents. Les chapitres sur la conception d'emploi du temps (chapitre 6) et sur l'ordonnancement manufacturier (chapitre 7) nous ont permis de valider cette proposition. Dans la planification des travaux de maintenance ferroviaire, il semble que cette proposition soit également pertinente. En effet, dans la section 2.3 de ce chapitre, nous avons décrit quelques exemples de contraintes gérées par le DPX SEG, et qui doivent être traduites dans des plannings "faits maison" (figure 32). Par ailleurs, les entretiens menés ont mis en évidence la problématique de la visibilité des contraintes : des stratégies sont mises en œuvre par les DPX SEG pour rendre plus ou moins visibles la satisfaction de certaines contraintes au niveau des objets du SRT externe.

Au delà des objectifs fixés par le contrat de recherche collaborative avec la SNCF, nous chercherons à examiner la problématique de la visibilité des contraintes au travers de l'activité de gestion de contraintes et d'objets, et selon le niveau d'expertise des DPX SEG. Dans cette perspective, l'étude va analyser la réalisation d'un scénario typique d'ordonnancement grâce à un logiciel expérimental conçu pour les besoins de l'expérience et intégrant les deux fonctionnalités prévues dans le cahier des charges. Cette démarche nous permettra de déterminer les stratégies d'ordonnancement mises en œuvre par les DPX SEG. Une meilleure connaissance de ces stratégies et de leur efficacité nous permettra de formuler des recommandations ergonomiques pour la SNCF.

3.3 QUESTIONS DE RECHERCHE

À partir des deux fonctionnalités de la GMAO étudiées et de nos objectifs de recherche, nous avons formulé plusieurs questions de recherche :

- Comment les DPX SEG ordonnent la planification prescrite par la GMAO qui définit des dates précises pour les opérations de maintenance ? Cette fonctionnalité implique-t-elle une modification de la flexibilité dans l'activité du DPX SEG ?
- Quel est l'usage d'un plan de charge pour un DPX SEG ? Permet-il de mettre en place des stratégies particulières comme le lissage de la charge de travail dans le temps ?
- Comment la multitude des contraintes et des objectifs (qui se traduisent en contraintes) est gérée par les DPX SEG au cours de l'activité d'ordonnancement ? Plus précisément, comment sont gérées des contraintes et des objectifs qui apparaissent contradictoires ? Le DPX SEG met-il en œuvre des processus de pondération ou de hiérarchisation ?

- Quel est le rôle du SRT externe dans la gestion des contraintes ? Existe-t-il différents niveaux de visibilité dans la satisfaction des contraintes ?
- Quel est l’effet de l’expertise dans l’ordonnancement des travaux de maintenance ferroviaire ? Observe-t-on, comme c’est le cas dans d’autres situations, une tendance chez les DPX SEG experts à externaliser leur cognition sur les objets du SRT externe ?
- Enfin, est-ce que les DPX SEG introduisent des marges dans leur ordonnancement ? Même si nous ne cherchons pas particulièrement à étudier cette question, ce comportement pourrait nous renseigner sur une stratégie de gestion des aléas (introduire des marges dans l’ordonnancement pour qu’il soit plus robuste aux aléas).

3.4 FACTEURS EXPERIMENTAUX

Cette étude va chercher à étudier l’effet de trois facteurs sur l’activité d’ordonnancement :

- *Fonctionnalités de la GMAO* (G_2) à 2 modalités : présence des fonctionnalités (g_1) et absence des fonctionnalités (g_2). La condition g_2 est considérée comme la condition contrôle : dates de maintenance partiellement définies (mois) et absence du plan de charge.
- *Visibilité des contraintes* (V_2) à 2 modalités : visibles (n_1) et moins visibles (n_2). Les contraintes traitées par les participants seront caractérisées *a posteriori*, à partir des protocoles recueillis³². La visibilité d’une contrainte est étroitement liée au format de représentation externe de l’ordonnancement. Une contrainte est qualifiée de “visible” lorsqu’elle est inférée directement à partir de la représentation de l’ordonnancement. Par exemple, si un objet du planning indique le repos d’un agent (cf. RP – Figure 32), cette information permet d’inférer directement l’indisponibilité de l’agent pour la période donnée. En revanche, on ne peut pas inférer directement une contrainte du type “les opérations doivent être regroupées planifiées en fonction de leur localisation géographique dans le but de minimiser les dépenses en carburant” car le SRT externe ne permet pas de rendre visible cette contrainte.
- *Expertise du participant* (E_2) à 2 modalités : experts (e_1) contre moins experts (e_2). Le niveau d’expertise sera caractérisé *a posteriori* selon le niveau d’expérience (nombre d’années en tant que DPX)

3.5 HYPOTHESES DE RECHERCHE

La première série d’hypothèses de recherche (H1) concerne l’effet des fonctionnalités de la GMAO sur l’activité de d’ordonnancement du DPX SEG :

- (H1a) La proposition par la GMAO d’une date de maintenance entièrement spécifiée (le jour), conduit le DPX SEG à disposer de moins de flexibilité pour son ordonnancement par rapport à une situation dans laquelle la date est partiellement définie (le mois). Par conséquent, cette moindre flexibilité va gêner le DPX lorsqu’il devra réaliser des modifications de son ordonnancement, par exemple s’il a oublié de traiter certaines

³² Par exemple, à partir d’un critère objectif comme les durées de traitement des contraintes. Les contraintes visibles sont supposées produire des durées de traitement plus rapides.

contraintes du problème. Pour examiner cette hypothèse, nous comparerons la mise en œuvre du scénario d'ordonnancement dans les conditions g1 et g2.

- (H1b) La fonctionnalité de visualisation d'un plan de charge permet au DPX SEG une meilleure prévision de la maintenance et l'oriente vers une stratégie de détection des pics et de lissage de la charge. Pour examiner cette hypothèse, nous analyserons le taux d'usage de cette fonctionnalité ainsi que les verbalisations liées à son usage.
- (H1c) La proposition par la GMAO d'une date de maintenance entièrement spécifiée conduit le DPX à mettre en œuvre un ordonnancement guidé par une procédure³³ selon la date de maintenance au plus tôt. Pour examiner cette hypothèse, nous allons proposer deux dates de maintenance entièrement spécifiées : une date au plus tôt, et une date au plus tard (date au plus tôt + durée tolérée de dépassement).

La deuxième série d'hypothèses de recherche (H2) concerne les stratégies de gestion de contraintes des DPX SEG :

- (H2a) La différence de visibilité des contraintes à traiter a un effet sur les stratégies de gestion de contraintes et d'objets dans l'activité d'ordonnancement des DPX SEG. Plus précisément, les contraintes visibles à partir des objets seraient plus faciles à traiter que celles qui ne sont pas rendues visibles par les objets.
- (H2b) Les conflits entre contraintes sont plus facilement détectés à partir de la représentation de l'ordonnancement (planning des agents). Plus précisément, des conflits entre contraintes visibles sont plus facilement détectés que des conflits entre contraintes moins visibles.
- (H2c) La résolution des conflits entre contraintes passe par des opérations de relâchement de contraintes. Pour examiner cette hypothèse, nous allons examiner la nature des opérations en jeu dans les situations de résolution de conflit.

La troisième série d'hypothèses de recherche (H3) concerne l'effet de l'expertise sur l'activité d'ordonnancement du DPX :

- (H3a) Il existe une variabilité importante entre experts comme dans d'autres domaines.
- (H3b) Avec l'expérience, le DPX SEG ordonnance en introduisant de la flexibilité (des marges) dans son ordonnancement, pour pouvoir répondre aux situations problématiques liées à l'apparition d'aléas. Il s'agit là d'une marque d'anticipation liée à l'expertise. En revanche, les moins experts seraient moins anticipatifs car ils veulent concilier la multiplicité des objectifs (productivité, quantité de maintenance, etc.) en privilégiant la productivité (moins de marges).

³³ Dans les travaux de recherche sur l'ordonnancement manufacturier, cette procédure fait référence à la règle EDD (earliest due date) : les opérations sont ordonnancées selon la date d'échéance au plus tôt.

3.6 PROTOCOLE DE RECHERCHE

3.6.1 DESCRIPTION DES PARTICIPANTS

Les participants à cette expérience sont des DPX SEG (Dirigeants de ProXimité du Service Électrique Général de maintenance des installations), chargés de planifier la maintenance des installations d'un secteur géographique donné.

3.6.2 DESCRIPTION DES PRINCIPALES PHASES DU PROTOCOLE

La recherche se déroulera en trois principales phases :

- 1) *Questionnaire signalétique.* Par courriel, les DPX SEG participants à l'expérience rempliront un questionnaire signalétique (âge, nombre d'années d'expérience en tant que DPX SEG, autres postes occupés, nombre d'années d'expérience en ordonnancement dans les autres postes occupés) permettant de contrôler certaines des sources de variabilité de l'expertise et de faire en amont une répartition équivalente des groupes expérimentaux.
- 2) *Expérimentation.* Dans le scénario d'ordonnancement proposé, le DPX devra ordonnancer la maintenance préventive systématique d'une liste d'installations de signalisation, fournie à partir d'interfaces expérimentales, soit dans une situation proposant les fonctionnalités de la GMAO étudiées (condition g_1), soit dans une situation ne proposant pas ces fonctionnalités (condition g_2). Plusieurs objectifs seront prescrits par la tâche : lisser la charge de travail des agents SEG, maximiser la productivité, minimiser les retards, minimiser les dépenses en carburant en minimisant les déplacements géographiques, éviter le travail en équipe de certains agents car ils ne s'entendent pas, favoriser la même composition d'équipe pour les interventions sur plusieurs jours.
- 3) *Entretien post expérimental.* A l'issue de l'expérimentation, nous recueillerons le "ressenti" des participants à propos de la tâche et du logiciel expérimental proposés (notamment les fonctionnalités d'affichage d'un plan de charge et la prescription par la GMAO de dates entièrement spécifiées). Ces informations nous permettront de recueillir le point de vue des DPX SEG quant à l'arrivée de la GMAO.

3.6.3 DESCRIPTION DE LA TACHE EXPERIMENTALE ET DE L'INTERFACE

La démarche adoptée pour construire la tâche et le matériel expérimental a été de partir de situations réelles. Puisqu'elles sont complexes et que dans le cadre d'expérimentations, il est nécessaire de réduire cette complexité, nous avons fait en sorte que cette réduction ne soit pas trop "simplificatrice". C'est pourquoi nous avons travaillé en étroite collaboration avec un DPX référent qui connaît le métier depuis presque 10 ans. Cela nous a permis de construire une tâche et un matériel pertinent et acceptable, aussi bien pour les besoins de l'étude que du point de vue des participants à l'expérience.

Dans toute activité professionnelle, les opérateurs construisent une expertise en lien avec l'utilisation des outils de travail. À la SNCF, les DPX SEG ont probablement développé une expertise dans l'utilisation d'outils informatiques, et plus particulièrement dans l'utilisation d'Excel®. Nous proposons donc une tâche expérimentale réalisable dans un environnement informatique familier et dont la prise en main sera rapide. Dans cette expérimentation, la

tâche du DPX SEG sera d'ordonnancer des opérations de maintenance préventive systématique (MPS) pour 4 agents du service électrique sur un horizon temporel de 10 semaines. Toutes les opérations de MPS à ordonnancer sont typiques et connues de tout DPX SEG. Par ailleurs, nous avons respecté l'activité telle qu'elle se déroule habituellement en intégrant dans le planning des *repos*³⁴ (RU, RP, congés annuels), des *visites médicales*³⁵, des *visites de sécurité*³⁶ de passages à niveau ou d'aiguilles, des *formations*³⁷ (habilitation, formations techniques, etc.), des *journées d'inventaire*, des *travaux ponctuels*³⁸.

L'interface expérimentale est composée de quatre zones (figure 33) : le planning des agents SEG pour concevoir l'ordonnancement (en haut), la liste des opérations à ordonnancer (en bas à gauche), la demande de ressources³⁹ matérielles ou humaines et l'affichage d'un plan de charge (en bas à droite), et les boutons d'interaction (copier, couper, coller, supprimer) entre le planning des agents SEG et la liste des opérations à ordonnancer (au milieu).

Semaine	05-mars	06-mars	07-mars	08-mars	09-mars	10-mars	11-mars					
	Sam	Dim	Lun-m	Lun-am	Mar-m	Mar-am	Mer-m	Mer-am	Jeu-m	Jeu-am	Ven-m	Ven-am
Paul Martin												
David Petit			RP	RP							Penthièvre_Verif_Tech_MeS_TravVoies	Penthièvre_Verif_Tech_MeS_TravVoies
Claude Durand					Penthièvre_Verif_Tech_MeS_TravVoies	Penthièvre_Verif_Tech_MeS_TravVoies	Penthièvre_Verif_Tech_MeS_TravVoies	Penthièvre_Verif_Tech_MeS_TravVoies	Penthièvre_Verif_Tech_MeS_TravVoies	Penthièvre_Verif_Tech_MeS_TravVoies	Penthièvre_Verif_Tech_MeS_TravVoies	Penthièvre_Verif_Tech_MeS_TravVoies
Jacques Leroy			Ag23a=Ag24b_Craiss		Penthièvre_Verif_Tech_MeS_TravVoies	Penthièvre_Verif_Tech_MeS_TravVoies	Penthièvre_Verif_Tech_MeS_TravVoies	Penthièvre_Verif_Tech_MeS_TravVoies	Penthièvre_Verif_Tech_MeS_TravVoies	Penthièvre_Verif_Tech_MeS_TravVoies	RP	RP

N°	Intitulé de l'intervention à programmer	Type d'installation	Localisation géographique	Nombre d'agents	Tolérance d'intervention (en jours)	Date de début au plus tôt	Date de début au plus tard	Annonceur	Commande d'AHT
1	Sign01_Main_CT	Panneau lumineux	Ph01	1	30	08-mars-2011	07-avr-2011	0	non
2	Sign02_Main_CT	Panneau lumineux	Ph02	1	30	08-mars-2011	07-avr-2011	0	non
3	Sign03_Main_CT	Panneau lumineux	Ph03	1	30	07-mars-2011	06-avr-2011	0	non
4	Sign04_Main_CT	Panneau lumineux	Ph04	1	30	08-mars-2011	07-avr-2011	0	non
5	Sign05_Main_CT	Panneau lumineux	Ph05	1	30	10-mars-2011	09-avr-2011	0	non
6	Sign06_Main_CT	Panneau lumineux	Ph06	1	30	10-mars-2011	09-avr-2011	0	non
7	Sign07_Main_CT	Panneau lumineux	Ph07	1	30	11-mars-2011	10-avr-2011	0	non

Figure 33 : Interface du logiciel expérimental d'ordonnancement avec le planning des agents SEG (en haut), la liste des opérations à ordonnancer (en bas à gauche), la demande de ressources et l'affichage d'un plan de charge (en bas à droite), et les boutons d'interaction entre le planning des agents SEG et la liste des opérations à ordonnancer (au milieu).

³⁴ Les dates de repos des agents sont généralement prévues à l'avance. Dans certaines situations, ces dates peuvent être renégociées entre le DPX SEG et l'agent concerné.

³⁵ Les dates des visites médicales sont prévues un mois à l'avance et sont imposées au DPX.

³⁶ Les visites de sécurité (VS) durent entre 1 et 3 jours. Toute VS nécessite la présence d'agent(s) SEG, et parfois celle du DPX SEG. Les dates sont prévues mais peuvent être renégociées entre l'inspecteur et le DPX SEG.

³⁷ Exemples : formations réglementaires pour l'habilitation d'un agent, formations techniques, etc.

³⁸ Exemples : déplacement des moteurs d'un passage à niveau, graissage d'aiguilles, mise en service dans une gare d'une traversée de voie pour piétons (information lumineuse).

³⁹ Certaines opérations nécessitent aux DPX de faire des demandes de ressources comme ils ont l'habitude de le faire dans leur activité quotidienne. Nous avons matérialisé ces demandes à travers des fenêtres pop-up.

Enfin, pour gagner en réalisme, nous proposerons aux participants un schéma papier, inspiré d'un schéma existant, et représentant les installations à maintenir dans un secteur donné.

3.7 METHODE DE RECUEIL DES DONNEES

Nous utiliserons la méthode des verbalisations simultanées à l'activité que nous traiterons et analyserons grâce au formalisme de codage prédicat-arguments mis en œuvre avec MacSHAPA (chapitre 5). Par exemple, la verbalisation « *Lorsque je place une maintenance d'aiguille prévue sur 3 jours, je préfère prévoir 5 jours* » reflète la formulation d'une contrainte mettant en relation une tâche (maintenance d'aiguille) avec une période (marge). Cette contrainte, qui manifeste l'introduction d'une préférence, n'est pas directement visible sur le planning des agents.

Par ailleurs, le logiciel expérimental comporte un module, complètement transparent pour le participant, et qui nous permettra d'enregistrer automatiquement certaines actions des participants qui seront ensuite importées dans le logiciel MacSHAPA :

- Les actions de prise d'information liées à la consultation des différentes zones de l'interface.
- Les actions sur les objets du planning (création, modification, suppression), et qui seront articulées avec l'activité de gestion de contraintes accessibles à partir des verbalisations.

4 CONCLUSION

Dans cette situation de terrain liée à la planification des travaux de maintenance ferroviaire, l'approche gestion de contraintes, utilisée précédemment pour deux cas expérimentaux (chapitres 6 et 7), semble pertinente pour décrire les stratégies d'ordonnement des DPX SEG. En considérant également le niveau d'expertise de ces ordonnanceurs, nous pourrions alors mettre en parallèle les résultats que nous obtiendrons avec ceux déjà obtenus.

De plus, en cherchant à caractériser les contraintes du point de vue de leur niveau de visibilité, nous tenterons d'examiner plus en détail cette problématique.

5 BIBLIOGRAPHIE

Blondel, F. (2007). *Gestion de la production (5ème édition)*. Paris : Dunod.

Cegarra, J., & Hoc, J.M. (2011). *Effet du niveau d'expérience des opérateurs et de la complexité du problème sur les stratégies d'élaboration de plans : une étude auprès de concepteurs d'horaires de trains*. Manuscrit soumis pour publication.

Guerin, C. (2009). *Analyse du travail des dirigeants de proximité chargés de la planification opérationnelle des travaux du domaine signalisation de la branche Infrastructure de la SNCF en vue de l'introduction d'un outil de Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur* [Rapport de stage]. IRCCyN, Nantes, France.

Pinot, G. (2008). *Coopération homme-machine pour l'ordonnement sous incertitudes*. Thèse, Université de Nantes, France.

DISCUSSION GENERALE

1	RAPPEL DES OBJECTIFS DE LA THESE.....	195
1.1	DESCRIPTION DES STRATEGIES D'ORDONNANCEMENT ET NATURE DE L'EXPERTISE	195
1.2	ROLE DE L'OPERATEUR DANS LE CONTEXTE DE L'ORDONNANCEMENT DE GROUPES	196
2	RAPPEL DES QUESTIONS DE RECHERCHE.....	197
2.1	ÉTUDES SUR LA CONCEPTION D'EMPLOI DU TEMPS ET SUR L'ORDONNANCEMENT MANUFACTURIER	197
2.2	ÉTUDE SUR LA COOPERATION HOMME-MACHINE POUR L'ORDONNANCEMENT.....	197
3	RESULTATS OBTENUS ET INTERPRETATIONS	198
3.1	ÉTUDES SUR LA CONCEPTION D'EMPLOI DU TEMPS ET SUR L'ORDONNANCEMENT MANUFACTURIER	198
3.1.1	<i>PERTINENCE DE L'APPROCHE GESTION DE CONTRAINTES ET ARTICULATION AVEC LA PLANIFICATION</i>	<i>198</i>
3.1.2	<i>NATURE DE L'EXPERTISE DANS L'ACTIVITE D'ORDONNANCEMENT.....</i>	<i>198</i>
3.1.3	<i>COMPARAISON DES SITUATIONS D'ORDONNANCEMENT ETUDIEES</i>	<i>200</i>
3.2	ÉTUDE SUR LA COOPERATION HOMME-MACHINE POUR L'ORDONNANCEMENT.....	201
3.2.1	<i>ÉVALUATION DE L'OUTIL D'ASSISTANCE A L'ORDONNANCEMENT</i>	<i>201</i>
3.2.2	<i>EFFET DU CONTROLE MUTUEL.....</i>	<i>202</i>
3.2.3	<i>GESTION DES RISQUES DE PANNES</i>	<i>202</i>
4	BIBLIOGRAPHIE.....	203

1 RAPPEL DES OBJECTIFS DE LA THESE

Au cours de la réalisation de cette thèse, deux axes d'étude de l'ordonnancement ont été abordés. Tout d'abord, décrire les stratégies humaines d'ordonnancement en termes de gestion de contraintes, notamment chez les experts. Ensuite, aborder des questions de recherche dans le contexte d'un travail pluridisciplinaire avec la recherche opérationnelle : évaluer un outil d'assistance à l'ordonnancement d'opérations à l'intérieur de groupes définis par la machine, examiner une modalité de la coopération homme-machine (le contrôle mutuel), et explorer la question de la gestion des risques de pannes par les ordonnanceurs.

1.1 DESCRIPTION DES STRATEGIES D'ORDONNANCEMENT ET NATURE DE L'EXPERTISE

En adoptant le point de vue complémentaire des représentations manipulées par l'ordonnanceur, un des objectifs de ce travail de thèse a été de décrire les stratégies humaines d'ordonnancement en termes de traitement de ces représentations, et plus particulièrement de gestion de contraintes et d'objets. Dans cette perspective, le point de départ a consisté à considérer le problème d'ordonnancement comme un cas particulier de problème de conception. Cet ancrage théorique a été justifié par des similarités entre problèmes de conception et problèmes d'ordonnancement : la complexité des problèmes, la démarche opportuniste et la stratégie de moindre compromission mises en œuvre par les ordonnanceurs, la traduction de représentations dans les termes de la solution.

Nous avons ensuite considéré que la résolution de problèmes d'ordonnancement est une situation privilégiée pour observer les mécanismes généraux de planification, activité qui se

développe dans des espaces abstraits, ce qui implique des changements de représentation et différents niveaux de contrôle des processus cognitifs. La référence au modèle du contrôle cognitif de Hoc et Amalberti (2007) et à la hiérarchie d'abstraction de Rasmussen (1985, 1986) nous a ensuite permis d'examiner deux niveaux d'abstraction dans la résolution du problème d'ordonnement : un niveau stratégique concernant les plans (buts et procédures) et un niveau tactique concernant leur mise en œuvre.

Puis nous avons développé l'approche gestion de contraintes pour décrire l'activité d'ordonnement. Pour cela, nous avons emprunté à Hoc (1987) le concept de Systèmes de Représentation et de Traitement (SRTs). Nous avons rappelé que les contraintes d'un problème peuvent s'exprimer dans différents SRTs et que le processus de résolution consiste notamment à traduire ces contraintes dans les termes de la solution au problème, un SRT externe unique. Pour formaliser d'un point de vue psychologique l'activité de gestion de contraintes des ordonneurs, nous avons fait référence aux travaux de Stefik (1981a) qui a défini une contrainte comme une relation entre variables permettant de décrire partiellement un objet. En prolongeant la définition de l'auteur, nous avons distingué la contrainte de l'objet en un sens strict : *la contrainte n'est pas représentée dans les termes de la solution au problème, alors que l'objet représente la satisfaction de contrainte(s) dans les termes de la solution*. Cette distinction pouvait alors être mise en perspective avec le concept de SRT : *la contrainte n'est pas représentée dans le SRT externe requis par la solution alors que l'objet représente la satisfaction de contrainte(s) dans ce même SRT*. Des exemples de SRT externe – l'emploi du temps et le diagramme de *Gantt* – nous ont permis d'illustrer les concepts de contrainte et d'objet dans l'activité d'ordonnement.

Les cadres théoriques développés jusqu'alors ont été le fondement de notre définition de l'ordonnement :

L'activité d'ordonnement articule deux niveaux d'abstraction dans le contrôle cognitif des processus symboliques :

- *Un haut niveau d'abstraction, composé d'activités stratégiques de planification (gestion de plans d'action, de buts et de procédures).*
- *Un bas niveau d'abstraction, composé d'activités tactiques de gestion de contraintes et d'objets. A ce niveau, il s'agit de traduire dans un Système de Représentation et de Traitement externe la satisfaction de contraintes, qui s'expriment souvent dans des SRTs différents.*

A partir de cette conceptualisation, un des objectifs spécifiques de la thèse a été de décrire la nature de l'expertise dans l'activité d'ordonnement, et particulièrement de préciser son rôle du point de vue des activités stratégiques de planification et des activités tactiques de gestion de contraintes et d'objets. Pour cela nous avons choisi d'étudier deux situations : la conception d'emploi du temps et l'ordonnement manufacturier.

1.2 RÔLE DE L'OPÉRATEUR DANS LE CONTEXTE DE L'ORDONNEMENT DE GROUPES

La méthode de l'ordonnement de groupes est issue des travaux de la recherche opérationnelle. En proposant des groupes d'opérations pour lesquels l'ordonneur doit réaliser un ordonnement à l'intérieur des groupes (ordonnement intra-groupes), cette méthode permet, du point de vue de la recherche opérationnelle, de réduire la

complexité du problème pour l'ordonnanceur. Dans ce contexte, l'opérateur est supposé faire les choix les plus judicieux, notamment en tenant compte des aléas pouvant apparaître dans l'atelier.

Dans une perspective pluridisciplinaire entre l'équipe PsyCoTec et l'équipe ACSED à l'IRCCyN, nous avons examiné plusieurs points. Le premier a consisté à évaluer un outil d'assistance à l'ordonnancement intra-groupes, basé sur des indicateurs d'aide à la décision. Cet outil a été développé dans le cadre d'un travail antérieur mené par la recherche opérationnelle (Pinot, 2008). Ensuite, nous avons abordé les implications d'une modalité de la coopération homme-machine, le contrôle mutuel, sur les décisions humaines d'ordonnancement intra-groupes. Enfin, en adoptant un point de vue un peu plus exploratoire, nous avons examiné la question de la gestion des risques de pannes par les ordonnanceurs.

2 RAPPEL DES QUESTIONS DE RECHERCHE

2.1 ÉTUDES SUR LA CONCEPTION D'EMPLOI DU TEMPS ET SUR L'ORDONNANCEMENT MANUFACTURIER

En choisissant de décrire les stratégies d'ordonnancement dans les situations de conception d'emploi du temps et d'ordonnancement manufacturier, nous avons cherché à répondre à plusieurs questions de recherche :

- Est-ce que le point de vue complémentaire des représentations manipulées par les ordonnanceurs est pertinent pour étudier ces deux situations d'ordonnancement ? Plus précisément, est-ce qu'une approche en termes de gestion de contraintes est adaptée pour décrire l'activité mentale d'un ordonnanceur ?
- Comment s'articule l'activité de gestion de contraintes avec des composants plus abstraits de la planification ?
- En quoi l'activité d'ordonnancement d'un expert est-elle différente de celle d'un novice ?
- Quelles différences et points communs peut-on observer entre les deux situations étudiées ?

2.2 ÉTUDE SUR LA COOPERATION HOMME-MACHINE POUR L'ORDONNANCEMENT

Le travail pluridisciplinaire autour de l'approche "ordonnancement de groupes" a permis d'examiner les questions de recherche suivantes :

- Quel est l'intérêt d'un système d'aide aux décisions d'ordonnancement intra-groupes proposant à l'ordonnanceur des informations comme la qualité dans le meilleur des cas (Pinot, 2008) ?
- Quel effet produit un contrôle mutuel de la machine suite aux décisions d'ordonnancement intra-groupes de l'opérateur? Est-ce que cela provoque chez lui une analyse plus approfondie de la situation ?
- Quel est l'effet d'un risque de panne d'une machine de l'atelier sur l'activité des ordonnanceurs ?

3 RESULTATS OBTENUS ET INTERPRETATIONS

Puisque les démarches adoptées dans l'étude de la conception d'emploi du temps et de l'ordonnancement manufacturier ont été assez similaires, nous regrouperons tout d'abord les résultats obtenus dans ces deux situations. Ensuite, nous développerons les résultats de l'étude sur la coopération homme-machine dans le contexte de l'ordonnancement de groupes.

3.1 ÉTUDES SUR LA CONCEPTION D'EMPLOI DU TEMPS ET SUR L'ORDONNANCEMENT MANUFACTURIER

3.1.1 PERTINENCE DE L'APPROCHE GESTION DE CONTRAINTES ET ARTICULATION AVEC LA PLANIFICATION

En adoptant le point de vue de la gestion de contraintes et d'objets pour décrire les stratégies d'ordonnancement dans les deux situations étudiées, nous avons montré que cette approche était pertinente puisqu'il nous a permis de décrire une bonne partie des protocoles recueillis. Le schème de codage utilisé pour décrire l'activité s'est appuyé sur des travaux issus de la littérature sur la résolution de problèmes de conception, mais aussi sur les spécificités liées à chaque situation.

Au-delà des différences qui existent entre la conception d'emploi du temps et l'ordonnancement manufacturier (section 3.1.3), les opérations de gestion de contraintes et d'objets ne permettent toutefois pas de décrire exhaustivement l'activité d'ordonnancement. Des aspects plus abstraits de la planification existent dont la gestion de buts et la sélection de procédures standards. C'est pourquoi nous avons fait la distinction, dans notre schème de codage, entre deux niveaux d'abstraction dans le contrôle cognitif des processus : le niveau stratégique et le niveau tactique. Ce schème de codage nous a permis de mettre en évidence certaines caractéristiques de l'expertise dans l'activité d'ordonnancement.

3.1.2 NATURE DE L'EXPERTISE DANS L'ACTIVITE D'ORDONNANCEMENT

Dans cette section, nous traiterons d'abord des différences liées à l'expertise indépendamment des situations d'étude. La question de la comparaison des situations sera traitée dans le point suivant. Nous préciserons toutefois les caractéristiques des experts qui n'ont pu être observées que dans l'une ou l'autre des situations.

Premièrement, **les experts réalisent proportionnellement moins d'opérations de gestion de contraintes par rapport aux novices**. Les experts ont plutôt tendance à travailler à partir des objets de l'ordonnancement, c'est-à-dire sur la base de contraintes visibles dans le SRT externe. Ce comportement s'explique probablement par des heuristiques construites à partir d'une expérience prolongée (Sanderson, 1989, 1991). Au contraire, **les novices semblent gérer "mentalement" plus de contraintes, en réalisant proportionnellement plus d'opérations de propagation de contraintes que les experts**. Dans la conception d'emploi du temps, les novices combinent plus souvent les contraintes entre elles avant de les satisfaire en spécifiant des objets sur l'emploi du temps. Dans l'ordonnancement manufacturier, la satisfaction de contraintes, qui ont été combinées précédemment, se manifeste par des déplacements d'objets du *Gantt*. De plus, même si la question du réordonnancement n'a pas abordée dans l'étude de la conception d'emploi du temps, nous avons également observé que **les experts réalisaient proportionnellement moins**

d'opérations de gestion de contraintes par rapport aux novices dans la phase de réordonnement manufacturier. Par ailleurs, l'examen des transitions à partir des contraintes formulées vient appuyer ces observations. A partir de la formulation d'une contrainte, les experts en conception d'emploi du temps basculent plus directement dans l'espace des objets en réalisant des opérations à l'intérieur de cet espace. Un point de vue un peu différent mais complémentaire de cette analyse a été réalisé dans l'ordonnement manufacturier. A partir d'une opération de formulation de contrainte, les novices traitent plus rapidement d'autres contraintes que ne le font les experts, aussi bien dans la phase d'ordonnement que dans la phase de réordonnement.

Deuxièmement, **les experts réalisent proportionnellement plus d'opérations à l'intérieur de l'espace des objets par rapport aux novices.** En travaillant dans l'espace des objets, les experts n'auraient pas besoin de rendre explicite la structure profonde des contraintes (relations entre variables). Ils pourraient alors manipuler les objets directement sur le SRT externe, sans traiter des contraintes sous-jacentes. Ce résultat peut avoir deux interprétations complémentaires. Tout d'abord, les experts ont adopté un mode de **contrôle cognitif externe** (Hoc & Amalberti, 2007). Dans les termes du modèle du contrôle cognitif proposé par les auteurs, l'expert est caractérisé par son habileté à externaliser ses représentations mentales dans l'environnement, pour pouvoir réduire sa charge mentale. Dans l'activité d'ordonnement, ce contrôle cognitif externe s'est manifesté par un usage plus fréquent des objets du SRT externe (emploi du temps et diagramme de *Gantt*) comme support à l'activité. Par ailleurs, en considérant les contraintes comme des composants de la structure profonde des problèmes d'ordonnement, on peut adopter une interprétation proposée par exemple par Boshuizen et Schmidt (1992) dans le domaine médical. Selon ces auteurs, la structure profonde des problèmes est une forme de connaissance encapsulée que les experts "déplient" si nécessaire. Enfin, une dernière hypothèse interprétative est possible pour expliquer le travail des experts dans l'espace des objets : la reconnaissance de configurations significatives dans le SRT externe (Dessouky, Moray, & Kijowski, 1995 ; Moray, Dessouky, Kijowski, & Adapathya, 1991). Il pourrait alors être intéressant d'examiner plus en détail cette hypothèse interprétative. On pourrait par exemple construire une situation expérimentale dans laquelle on présenterait à des experts et à des novices des configurations différentes de diagrammes de *Gantt*. L'objectif serait alors de comparer leur activité mentale en utilisant des techniques comme l'oculométrie (pour déterminer les zones de fixations oculaires voire les parcours visuels) ou les temps de réaction (par ex., pour se décider entre deux diagrammes de *Gantt* à choisir, technique qui pourrait être prolongée par des entretiens d'explication de ces choix).

Troisièmement, **les experts utilisent un plus haut niveau d'abstraction que les novices dans le contrôle des processus cognitifs.** Au cours de l'activité d'ordonnement, les opérations stratégiques étaient plus fréquentes chez les experts que chez les novices. Dans la conception d'emploi du temps, la formulation de plans d'action était proportionnellement plus importante chez les experts. Dans l'ordonnement manufacturier, nous avons pu distinguer des plans déclaratifs (buts) et des plans procéduraux (procédures) plus fréquents chez les experts. Ces résultats s'expliquent par des capacités d'abstraction plus importantes qui caractérisent l'expertise (Hoc, 1987). Par ailleurs, dans l'ordonnement manufacturier, l'examen des buts poursuivis par les experts ne nous a pas permis de mettre en évidence une anticipation de perturbations comme certains auteurs ont pu le montrer. C'est plutôt la minimisation des temps libres entre opérations qui a été privilégiée car elle permet de

réduire les périodes d'improductivité des machines, un des objectifs importants que les entreprises doivent atteindre pour minimiser les coûts de fabrication.

Quatrièmement, **les experts s'appuient sur une stratégie de moindre compromission pour résoudre les problèmes d'ordonnancement.** Ce résultat n'a pu être observé que dans la conception d'emploi du temps, car le SRT utilisé dans cette situation le permettait. Au cours de l'activité, les experts ont plus eu tendance que les novices à satisfaire des contraintes à partir d'objets abstraits, c'est-à-dire partiellement spécifiés. Pour représenter un objet abstrait, seules quelques variables étaient renseignées (par ex., groupe(s) d'étudiants, période et module). Par conséquent, les experts ont réalisé proportionnellement plus de particularisations d'objets que les novices, opérations leur permettant d'aboutir à des objets concrets. Au contraire, les novices ont eu tendance à gérer proportionnellement plus de contraintes avant de se compromettre sur la définition d'objets concrets.

Cinquièmement, **les experts modifient la structure des problèmes d'ordonnancement.** Ce comportement permettant de réduire la complexité d'un problème en le simplifiant, a été observé au cours de la phase de réordonnancement manufacturier. Plus particulièrement, les experts ont violé délibérément des contraintes prescrites liées à des périodes de maintenance, pour privilégier le respect des dates de livraison des ordres de fabrication. Dans l'ordonnancement, des comportements de cet ordre permettent aux ordonnanceurs de sortir d'impasses (Higgins, 1996). Un des outils souvent utilisé est la négociation pour relâcher des contraintes. Dans notre expérience, les ordonnanceurs n'avaient pas la possibilité de négocier pour modifier les périodes de maintenance. En mettant en œuvre des violations de contraintes, ils ont donc choisi de supprimer certaines des contraintes liées à ces périodes prescrites au moment de la phase de réordonnancement manufacturier.

3.1.3 COMPARAISON DES SITUATIONS D'ORDONNANCEMENT ETUDIÉES

Une définition de l'ordonnancement que l'on retrouve régulièrement dans la littérature consiste à considérer cette activité comme l'affectation de ressources à des tâches en prenant en considération des contraintes. Dans l'ordonnancement manufacturier, les tâches peuvent être des ordres de fabrication (OF). Chaque tâche est constituée par un ensemble d'opérations réalisées par des machines. Parmi les contraintes temporelles gérées par les ordonnanceurs, on retrouve par exemple les dates de livraison des OF (dates d'échéance), la durée des tâches et des opérations mais aussi la succession des opérations requises pour réaliser la tâche. Dans la conception d'emploi du temps, les tâches sont remplacées par des groupes d'étudiants, les opérations par des modules d'enseignement et les machines par des enseignants. Les salles sont des ressources supplémentaires qui doivent être considérées par l'ordonnanceur. Du point de vue des contraintes temporelles, une importance moins forte est accordée à la "durée ou aux dates d'échéances des groupes d'étudiants" contrairement aux tâches réalisées dans l'ordonnancement manufacturier.

Au-delà de cette mise en perspective des deux situations du point de vue de la terminologie utilisée dans l'ordonnancement manufacturier, deux différences majeures quant à l'activité des ordonnanceurs ont pu être observées, quel que soit le niveau d'expertise.

Premièrement, **la gestion de contraintes est proportionnellement plus importante que le traitement des objets dans la conception d'emploi du temps, alors que cette répartition est à peu près identique dans l'ordonnement manufacturier.** Il est possible que cette différence entre les deux situations s'explique par les caractéristiques du problème proposé, en termes de nombre de contraintes à gérer et donc de complexité. Dans la conception d'emploi du temps, de nombreuses contraintes devaient être considérées par les ordonnanceurs : disponibilité des salles, disponibilité des enseignants, succession entre les modules d'enseignement, association entre le type de salle et le type de module, durée des modules, etc. Dans la tâche d'ordonnement manufacturier, les contraintes à gérer étaient moins nombreuses : durée des opérations, dates de livraison, succession des opérations. Dans la phase de réordonnement manufacturier, des contraintes de maintenance des machines ont été ajoutées au problème. L'introduction de ces nouvelles contraintes a eu un effet sur la répartition des opérations en diminuant la part relative des opérations impliquant des objets au profit de celle impliquant des contraintes. Cet effet va dans le sens de notre hypothèse.

Deuxièmement, **la gestion de contraintes est proportionnellement plus importante que les aspects stratégiques dans la conception d'emploi du temps (plans d'actions), alors que ces aspects sont plus fréquents dans l'ordonnement manufacturier (buts et procédures).** Ce résultat montre que la conception d'emploi du temps est moins routinière que ne peut l'être l'ordonnement manufacturier. Dans l'ordonnement manufacturier, des algorithmes standards (SPT, EDD, etc.) sont de bons candidats pour mettre en œuvre des plans d'action. C'est probablement une des raisons pour laquelle Sanderson (1991) a mis l'accent sur des modèles procéduraux de l'ordonneur humain. Dans notre étude sur l'ordonnement manufacturier, l'utilisation de ce type de procédures a été observée, ainsi que la gestion de plans déclaratifs (formulation et évaluation de buts). Dans cette situation manufacturière, la part relative de la dimension stratégique a été plus importante (environ 40 % en moyenne, quel que soit le niveau d'expertise) que dans la conception d'emploi du temps (environ 12 % en moyenne, quel que soit le niveau d'expertise).

3.2 ÉTUDE SUR LA COOPERATION HOMME-MACHINE POUR L'ORDONNEMENT

3.2.1 ÉVALUATION DE L'OUTIL D'ASSISTANCE A L'ORDONNEMENT

L'outil d'assistance à l'ordonnement intra-groupes était constitué de plusieurs indicateurs d'aide à la décision. Parmi ces indicateurs, la qualité dans le meilleur des cas a été spécifiquement développée par le travail de recherche opérationnelle de Pinot (2008).

Lorsque plusieurs indicateurs étaient à disposition et lorsque le risque était fort, la performance humaine d'ordonnement a été améliorée (l'opérateur a pris de meilleures décisions). Cette augmentation de la performance s'explique par une augmentation du niveau d'activité de l'ordonneur dont les décisions ont été plus longues, et justifiées par plus de prises d'informations. Ainsi, en proposant des informations plus riches à l'ordonneur, on l'a probablement encouragé à analyser plus finement le problème. Ce résultat vient appuyer l'idée que l'augmentation du niveau d'activité de l'opérateur permet d'améliorer la performance (Roth, Bennett, & Woods, 1988).

Cependant, les indicateurs de qualité ont été le moins souvent consultés, puisque les ordonnanceurs ont privilégié la marge libre séquentielle. Nous pensons que cette supériorité de la marge libre séquentielle s'explique par son intérêt pour anticiper les retards, ce qui est particulièrement utile pour gérer les risques de pannes dans un atelier (section 3.2.3).

3.2.2 EFFET DU CONTROLE MUTUEL

En proposant une solution au participant après qu'il ait pris une décision, la machine réalisait un contrôle mutuel de l'activité humaine. Nous avons alors comparé la présence d'un contrôle mutuel de la machine à l'absence d'une intervention de celle-ci.

Tout d'abord, **aucun effet anticipatif du contrôle mutuel n'a été observé avant la proposition de la machine**, puisque ni les durées de prise de décision ni le nombre de prises d'informations n'étaient différents par rapport à la condition sans contrôle mutuel. Nous avons ensuite observé plus particulièrement l'effet de la proposition machine sur les décisions de l'ordonnanceur. Du point de vue de la performance, **le contrôle mutuel n'a pas produit de dégradation des bonnes décisions, mais surtout il n'a pas permis d'améliorer les mauvaises décisions** (l'effet attendu d'un contrôle mutuel !). Nous pensons que la présence d'un contrôle mutuel allait augmenter le niveau d'activité des ordonnanceurs ce qui allait produire chez lui une relance de l'analyse des indicateurs. Or, on observe une faible relance de son analyse, avec une variabilité interindividuelle importante entre les ordonnanceurs. De plus, l'examen de l'évolution de la décision a montré que les ordonnanceurs ne changeaient pas d'avis en présence d'une proposition de la machine.

L'absence d'un effet du contrôle mutuel en termes de relance de l'activité peut s'expliquer par l'éventuelle simplicité des problèmes proposés dans cette étude. En effet, avant que la machine ne propose une solution, l'opérateur prenait des décisions de bonne qualité du point de vue des critères de performance de la machine. De plus, on peut penser que les décisions considérées par la machine comme mauvaises, était bonnes du point de vue de l'opérateur. En effet, la stratégie de l'ordonnanceur a pu être parfois guidée par une règle d'ordonnement du type FCFS (*First-Come First-Served*: les premières palettes qui arrivent sur le poste sont traitées en priorité), à partir d'informations prélevées dans la vue locale du poste à ordonnancer (le poste 2). Toutefois nous n'avons pas eu moyen d'examiner cette hypothèse à partir des données recueillies.

3.2.3 GESTION DES RISQUES DE PANNES

En induisant dans la consigne le risque d'une panne machine dans l'atelier, nous avons comparé une situation de risque fort de panne à une situation de risque faible.

Bien que nous n'ayons pas eu beaucoup d'hypothèses concernant l'effet d'un risque fort de panne, ce facteur semble avoir un effet car la performance d'ordonnement "locale" (prises de décision de l'ordonnanceur) et "globale" (retard algébrique maximum et durée totale de mise en œuvre de l'ordonnement) est améliorée. On pense que le risque aurait tendance à augmenter le niveau d'exigence sur la qualité de l'ordonnement, ce qui conduirait le participant à adopter une analyse plus fine de la situation. Il chercherait alors à réduire les conséquences de l'apparition d'une panne. Or c'est précisément l'intérêt que présente l'indicateur "marge libre séquentielle" qui a été le plus consulté, et qui permet de

renseigner sur la capacité d'absorption des retards que peut avoir le choix d'une des opérations (ou palettes) d'un groupe.

4 BIBLIOGRAPHIE

- Boshuizen, H.P.A., & Schmidt, H.G. (1992). On the role of biomedical knowledge in clinical reasoning by experts, intermediates and novices. *Cognitive Science*, 16, 153-184.
- Dessouky, M.I., Moray, N., & Kijowski, B. (1995). Taxonomy of scheduling systems as a basis for the study of strategic behavior. *Human factors*, 37, 443-472.
- Higgins, P.G. (1996). Interaction in hybrid intelligent scheduling. *International Journal of Human Factors in Manufacturing*, 6, 185-203.
- Hoc, J.M. (1987). *Psychologie cognitive de la planification*. Grenoble: Presses Universitaires de Grenoble.
- Hoc, J.M., & Amalberti, R. (2007). Cognitive control dynamics for reaching a satisficing performance in complex dynamic situations. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1, 22-55.
- Moray, N., Dessouky, M.I., Kijowski, B.A., & Adapathya, R. (1991). Strategic behavior, workload, and performance in task scheduling. *Human Factors*, 33, 607-629.
- Pinot, G. (2008). *Coopération homme-machine pour l'ordonnancement sous incertitudes*. Thèse, Université de Nantes, France.
- Rasmussen, J. (1985). The role of hierarchical knowledge representation in decision-making and system management. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-15, 234-243.
- Rasmussen, J. (1986). *Information processing and human-machine interaction*. Amsterdam: Elsevier.
- Roth, E.M., Bennett, K.B., & Woods, D.D. (1988). Human interaction with an "intelligent" machine. In G. Mancini, D.D. Woods, & E. Hollnagel (Eds.) *Cognitive Engineering in Complex Dynamic Worlds* (pp. 23-69). London, UK: Academic Press.
- Sanderson, P.M. (1989). The human planning and scheduling role in advanced manufacturing systems: an emerging human factors domain. *Human Factors*, 31, 635-666.
- Sanderson, P.M. (1991). Towards the model human scheduler. *International Journal of Human Factors in Manufacturing*, 1, 195-219.
- Stefik, M. (1981a). Planning with constraints (MOLGEN: Part1). *Artificial Intelligence*, 16, 111-140.

CONCLUSION

1	LES PRINCIPAUX APPORTS DE CETTE THESE	205
1.1	STRATEGIES DE GESTION DE CONTRAINTES ET EXPERTISE.....	205
1.2	ABSTRACTION ET EXPERTISE	206
1.3	IMPLICATIONS SUR LA CONCEPTION D'INTERFACES	206
2	DES LIMITES DE LA THESE AUX PROPOSITIONS POUR LES DEPASSER	207
2.1	L'APPROCHE EXPERIMENTALE POUR ETUDIER LES STRATEGIES D'ORDONNANCEURS EXPERTS	207
2.2	L'EVALUATION DE LA PERFORMANCE D'ORDONNANCEMENT	210
3	PERSPECTIVES : DES QUESTIONS DE RECHERCHE APPARUES AU COURS DE LA THESE.....	211
3.1	EXAMINER LES LIENS ENTRE EXPERTISE ET INTERFACES	211
3.2	PROLONGER LES QUESTIONS AUTOUR DES SRTS ET DE LA GESTION DES CONTRAINTES	212
3.3	ÉVALUER L'INTERET DE LA METHODE "ORDONNANCEMENT DE GROUPES" D'UN POINT DE VUE PSYCHOLOGIQUE.....	214
3.4	APPROFONDIR LA QUESTION DE LA GESTION DES SITUATIONS À RISQUES	215
3.5	DES SITUATIONS D'ORDONNANCEMENT AUX SITUATIONS PLUS GENERALES DE CONCEPTION	215
4	BIBLIOGRAPHIE	215

1 LES PRINCIPAUX APPORTS DE CETTE THESE

1.1 STRATEGIES DE GESTION DE CONTRAINTES ET EXPERTISE

L'étude de l'activité d'ordonnancement dans les situations de conception d'emploi du temps et d'ordonnancement manufacturier nous a permis de mettre en évidence une caractéristique majeure de l'ordonnanceur expert. **Au cours de l'activité d'ordonnancement, la stratégie des experts est de s'appuyer sur les objets du SRT externe pour gérer certaines contraintes du problème.**

Ce résultat a pu être observé dans ces deux situations car l'activité d'ordonnancement s'appuyait sur un SRT externe, et donc sur une représentation "graphique" du résultat de cette activité (un emploi du temps ou un diagramme de *Gantt*). Dans le travail réalisé en pluridisciplinarité avec la recherche opérationnelle, la situation d'étude était également appliquée au contexte manufacturier. Toutefois, aucune représentation "graphique" de l'activité d'ordonnancement, par exemple un diagramme de *Gantt*, n'était disponible pour l'ordonnanceur, alors que sa tâche était de réaliser un ordonnancement intra-groupes. Pour décider de l'ordre des opérations à l'intérieur des groupes définis par la machine, l'ordonnanceur n'avait accès qu'à des indicateurs numériques et ne disposait que d'une vue de l'atelier. Dans cette étude pluridisciplinaire, les conditions de réalisation de l'activité d'ordonnancement intra-groupes ne nous ont donc pas permis de prolonger l'examen des stratégies d'ordonnancement en termes de gestion de contraintes et d'objets. Mais ce travail nous a permis de mettre en évidence que les choix d'ordonnancement étaient meilleurs lorsque l'opérateur disposait de plusieurs indicateurs pour prendre ses décisions, et que la performance d'ordonnancement était améliorée en présence d'un risque important de panne.

Cette dernière étude nous montre que le choix des conditions de réalisation de l'activité d'ordonnement était important pour rendre saillants les résultats obtenus à partir des principaux objectifs à l'origine de ce travail de thèse. L'étude des stratégies d'ordonnement des experts dans le cadre de la conception d'un emploi du temps et dans celui de l'ordonnement d'un diagramme de *Gantt*, a été pour nous le choix le plus adapté pour répondre à nos principaux objectifs.

Enfin, ce choix nous a permis de comparer les stratégies d'ordonnement dans deux domaines d'application pour mettre en évidence des différences et des ressemblances. Dans le prolongement de ces travaux, l'examen de l'activité d'ordonnement appliquée à de nouvelles situations (par ex., l'ordonnement des personnels soignants à l'hôpital) nécessiterait donc de considérer les conditions de réalisation de cette activité pour l'ordonneur.

1.2 ABSTRACTION ET EXPERTISE

L'abstraction est une caractéristique de l'expertise qui a déjà été observée dans de nombreux domaines. C'est le cas notamment dans l'activité de planification (Hoc, 1987). Dans cette thèse, nous avons confirmé **l'habileté de l'ordonneur expert à utiliser un plus haut niveau d'abstraction que les novices dans le contrôle des processus cognitifs mis en œuvre dans l'activité d'ordonnement**. Les travaux de Rasmussen (1985, 1986) nous ont alors permis de considérer que ce haut niveau d'abstraction impliquait des activités stratégiques de gestion de plans déclaratifs et de plans procéduraux.

1.3 IMPLICATIONS SUR LA CONCEPTION D'INTERFACES

A partir des résultats obtenus sur les stratégies d'ordonnement mises en œuvre par les experts, quelques implications en termes de conception d'interfaces peuvent être suggérées. Dans la conception d'emploi du temps en particulier, l'interface utilisée à partir du logiciel Excel® permettait à l'ordonneur de manipuler des objets abstraits (ou partiellement définis). Nous avons observé que les experts utilisaient cette possibilité. En revanche les débutants, qui disposaient de cette même interface, n'ont pas utilisé cette possibilité de satisfaire progressivement certaines contraintes à partir d'objets abstraits. Ce comportement peut s'expliquer par une "crainte" de se compromettre trop rapidement dans la satisfaction de contraintes, au risque que des modifications ultérieures de l'emploi du temps soient coûteuses à gérer.

Une assistance à la gestion des contraintes permettant de représenter leur satisfaction sous forme d'objets abstraits nous semble être une recommandation ergonomique à considérer dans la conception d'interfaces supportant les activités d'ordonnement. Mais pour que ces interfaces produisent un bénéfice chez les novices, il est important qu'elles soient suffisamment "intelligentes" pour fournir une aide à la correction d'erreurs. Ces interfaces pourraient alors suggérer les contraintes qui peuvent être immédiatement satisfaisantes par des objets abstraits, sans que cela puisse mettre en péril des modifications ultérieures.

La question de l'accessibilité aux contraintes et de leur visibilité à partir des objets semble importante dans l'activité d'ordonnement. L'étude prévue dans le contexte de la planification des travaux de maintenance ferroviaire a notamment été élaborée dans la perspective de répondre à des questions de recherche sur les mécanismes qui sont

impliqués. Même si des travaux sont encore nécessaires pour mieux comprendre ces processus, la conception des interfaces doit favoriser l'articulation entre ces différentes représentations. Le SRT externe doit donc favoriser l'articulation des contraintes s'exprimant souvent dans différents SRTs. Dans la ligne des travaux de van Wezel et Jorna (2009), nous proposerons quelques éléments de réflexion dans la dernière partie de cette conclusion qui présentera des perspectives de recherche.

2 DES LIMITES DE LA THESE AUX PROPOSITIONS POUR LES DEPASSER

Nous sommes conscient que ce travail de thèse présente plusieurs limites liées notamment à l'approche expérimentale qui a été adoptée. Nous développerons ces limites et nous proposerons quelques pistes pour tenter de les dépasser.

2.1 L'APPROCHE EXPERIMENTALE POUR ETUDIER LES STRATEGIES D'ORDONNANCEURS EXPERTS

Dans cette thèse, nous avons adopté une approche expérimentale pour étudier les stratégies d'ordonnancement, en mettant l'accent sur les processus cognitifs mis en œuvre par les experts lorsqu'ils affectent des ressources à des tâches.

Dans les situations réelles, l'ordonnancement n'est pas seulement influencé par des aspects cognitifs, puisqu'interviennent également des aspects sociaux et organisationnels (Jackson, Wilson, & MacCarthy, 2004). Par exemple, lorsque des perturbations apparaissent dans le contexte manufacturier, des négociations permettent aux ordonnanceurs de résoudre les problèmes (Higgins, 1996). Il peut s'agir de négociations avec les clients (par ex., pour modifier les dates de livraison), avec les opérateurs du service maintenance (par ex., pour modifier les périodes de maintenance des machines) ou avec le service de production (par ex., pour réaliser des chevauchements entre opérations, découper différemment les ordres de fabrication, etc.). Pour résoudre les difficultés rencontrées, l'ordonnanceur peut alors relâcher ou violer des contraintes pour disposer de plus de flexibilité, particulièrement lorsque des conflits entre buts apparaissent (Stoop & Wiers, 1996). Même si les participants de notre première étude sur l'ordonnancement manufacturier n'avaient pas la possibilité de négocier, nous avons pu observer qu'ils avaient considéré cet aspect. En effet, les verbalisations de violation de contraintes étaient toutes justifiées chez les experts par l'impossibilité de négocier les contraintes sur les dates et les durées de maintenance, qui ont été prescrites par la tâche.

Dans un travail futur, il serait donc pertinent d'intégrer cette possibilité, pour les participants, de négocier les contraintes du problème. En confrontant volontairement des ordonnanceurs à des situations de conflits entre buts à atteindre, et donc entre contraintes à satisfaire, nous pourrions examiner plus en détails le rôle du relâchement et de la violation de contraintes dans l'activité d'ordonnancement. Dans l'étude sur la planification des travaux de maintenance ferroviaire, nous pourrions probablement avoir quelques éléments de réflexion pour concevoir de nouvelles études intégrant la possibilité pour l'ordonnanceur de négocier. En effet, la consigne que nous allons utiliser dans le contexte ferroviaire demandera de considérer de multiples objectifs qui pourraient générer des conflits. A titre d'illustration, voici les objectifs définis dans la consigne :

- Lissez la charge de travail des agents SEG⁴⁰ composant l'équipe que vous dirigez.
- Minimisez les retards de réalisation des interventions que vous avez à planifier.
- Pour les interventions nécessitant deux agents, évitez de faire travailler ensemble P. Martin et D. Petit car ces deux agents ne s'entendent pas.
- Minimisez les dépenses en carburant en minimisant les déplacements géographiques des agents SEG.
- Pour les interventions nécessitant plusieurs demi-journées, il est préférable que la planification de ces demi-journées soit consécutive.
- Maximisez la productivité.
- Favorisez la même composition d'équipe pour les interventions nécessitant plusieurs demi-journées.

De plus, dans les situations réelles, l'ordonnancement n'est pas seulement défini par l'affectation de ressources à des tâches puisque d'autres activités sont généralement réalisées par les ordonnanceurs. Parmi les activités qui influencent l'affectation des ressources, nous venons d'évoquer la négociation. Une autre activité souvent citée dans la littérature consiste à recueillir de l'information. Dans le contexte manufacturier, MacCarthy et Wilson (2001) rappellent que l'atelier de production est un système socio-technique constitué de machines, mais surtout d'opérateurs⁴¹ répartis dans différents services. En communiquant avec ces opérateurs, l'ordonnanceur collecte des informations qui peuvent influencer son ordonnancement et permettre d'anticiper l'apparition de problèmes. De notre point de vue, ces informations recueillies sont probablement traduites par l'ordonnanceur sous forme de contraintes qui doivent être intégrées dans le SRT externe. Dans notre approche expérimentale, nous n'avons pas considéré l'influence de ces réseaux d'informations.

De manière générale, l'approche expérimentale utilisée est à considérer comme complémentaire d'autres types d'approches telles que les études de terrain. En choisissant cette approche, nous avons eu conscience qu'elle pouvait souffrir de critiques liées à sa validité écologique et formulées par des auteurs qui ont privilégié d'étudier l'ordonnancement dans son contexte (par ex., Crawford, MacCarthy, Wilson, & Vernon, 1999 ; Jackson, Wilson, & MacCarthy, 2004 ; MacCarthy, Wilson, & Crawford, 2001). Dans le cadre limité d'une approche expérimentale, nous avons toutefois cherché à créer un maximum de contexte et à tendre vers une certaine validité écologique. Par exemple, nous avons fourni le maximum d'informations nécessaires à l'ordonnanceur pour la réalisation de sa tâche, et nous avons sollicité des experts qui avaient pour la plupart une expérience

⁴⁰ Agents de maintenance travaillant à la SNCF, et appartenant au service de signalisation électrique générale. Ces agents sont dirigés par un DPX SEG (dirigeant de proximité du service de signalisation électrique générale – chapitre 9).

⁴¹ Le terme d'opérateur peut désigner des ouvriers exécutant différentes tâches dans l'atelier, des techniciens de maintenance, des chefs d'équipe, mais aussi divers agents répartis à tous les niveaux organisationnels d'une entreprise.

importante de la gestion de production (planification et/ou ordonnancement) ou de la conception d'emploi du temps.

Au-delà des situations expérimentales que nous avons utilisées, il pourrait être intéressant de prolonger les travaux en recueillant des observables dans de le cadre de micromondes expérimentaux. Dans ce contexte, nous pourrions par exemple y intégrer la question des réseaux d'informations et de la négociation entre l'ordonnanceur et un certain nombre de collègues joués par des comparses (par ex., des collègues appartenant à un service clientèle, ou à un service maintenance, etc.). Le département Qualité, Logistique Industrielle et Organisation (QLIO) de l'Institut Universitaire de Technologie (IUT) de Nantes possède une plateforme expérimentale représentant un système de production (figure 34). Cette plateforme, utilisée notamment pour la formation des étudiants de l'IUT, pourrait être un bon support au développement d'un micromonde expérimental tel que nous l'avons décrit précédemment. Il faudrait alors déterminer précisément le rôle et les possibilités d'action offertes à chacun des comparses, pour se prévenir d'une quelconque variabilité liée à leurs comportements. Un protocole de recherche développé dans le cadre d'un tel micromonde nécessite d'être attentif à ce que chaque condition de recueil des observables soit strictement la même.



Figure 34 : Plateforme expérimentale de l'IUT de Nantes représentant un système de production. Cette plateforme pourrait être le support au développement de micromondes expérimentaux (photo extraite de Cardin, 2007).

2.2 L'ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE D'ORDONNANCEMENT

Dans nos expérimentations, l'évaluation de la performance d'ordonnancement n'a pas permis d'observer une supériorité liée à l'expertise, même si une tendance en ce sens s'est manifestée. De nouvelles études doivent donc approfondir cet aspect, car dans les situations réelles la performance est liée aux enjeux économiques d'une entreprise. De même, pour la conception d'un emploi du temps universitaire, les ordonnanceurs ont des objectifs à atteindre, par exemple satisfaire les enseignants (et peut-être même les étudiants) lorsqu'ils planifient leur temps de travail.

Même si certains auteurs considèrent que la question de l'évaluation de la performance en ordonnancement est difficile à aborder (Neely, 1999 ; MacCarthy & Wilson, 2001), il pourrait être intéressant de dépasser ce constat en adoptant une approche multicritères. Par exemple, Cegarra (2004) a proposé dans sa thèse d'utiliser trois groupes d'indicateurs pour évaluer la performance :

- Des indicateurs “comportementaux” : nombre de prises d'information, durée nécessaire pour ordonnancer ou pour réordonnancer, etc. Ces indicateurs permettraient de définir une performance comportementale.
- Des échelles d'évaluations subjectives (par ex., une échelle de type Likert) pour mesurer une performance subjective.
- Des indicateurs “industriels” mesurés à partir des résultats obtenus lorsque l'ordonnancement a été mis en œuvre dans l'atelier. Par exemple, la somme des retards des ordres de fabrication. Dans le contexte de la conception d'emploi du temps, il s'agirait moins d'indicateurs “industriels” que d'indicateurs liés par exemple à la satisfaction des enseignants ou des étudiants, quant au temps d'attente entre deux cours planifiés la même journée.

A ces trois groupes d'indicateurs proposés, on pourrait également ajouter l'évaluation de juges compétents dans le domaine.

Par ailleurs, dans une perspective ergonomique d'évaluation de l'efficacité, c'est-à-dire du rapport entre l'efficacité (donc la performance) et le coût mental, il pourrait être utile d'utiliser des outils de mesures de la charge cognitive (Cegarra & Chevalier, 2008). Cette évaluation de la charge mentale pourrait également nous permettre de valider un des résultats sur l'expertise qui a été observé dans cette thèse. En effet, dans les termes du modèle du contrôle cognitif proposé par Hoc et Amalberti (2007), l'expert est caractérisé par son habileté à externaliser ses représentations mentales dans l'environnement, car cela lui permettrait de réduire sa charge mentale. Dans cette thèse, nous avons mis en évidence que l'expert en ordonnancement s'appuie sur les objets du SRT externe pour gérer certaines des contraintes du problème. Dans la continuité des études déjà réalisées, il pourrait donc être pertinent de mesurer la charge mentale des experts ordonnanceurs.

3 PERSPECTIVES : DES QUESTIONS DE RECHERCHE APPARUES AU COURS DE LA THESE

Au cours de la réalisation de cette thèse, un certain nombre de réflexions ont émergé. Elles pourraient faire l'objet de pistes de travail : examiner les liens entre expertise et interfaces, prolonger les questions autour des SRTs et de la gestion des contraintes, évaluer l'intérêt de la méthode "ordonnancement de groupes" d'un point de vue psychologique, approfondir la question de la gestion des situations à risques, et valider nos travaux obtenus dans le contexte de l'ordonnancement en les appliquant à des situations plus générales de résolution de problème de conception.

3.1 EXAMINER LES LIENS ENTRE EXPERTISE ET INTERFACES

Nous avons observé que pour gérer les contraintes, les ordonnanceurs experts s'appuyaient notamment sur les objets du SRT externe. On peut alors se demander si l'utilisation de cette stratégie générale a été influencée par les possibilités d'usage de l'interface. Dans l'activité de conception d'emploi du temps en particulier, les experts ont mis en œuvre une stratégie de moindre compromission. En satisfaisant d'abord des contraintes par des objets abstraits, l'expert particularisait ensuite ces objets en introduisant progressivement d'autres contraintes dans le processus de résolution du problème d'ordonnancement.

Il conviendrait alors d'examiner plus précisément les liens entre les caractéristiques de l'expertise et les possibilités offertes par l'interface du SRT externe. En termes de gestion d'objets, il faudrait comparer l'activité d'ordonnancement des experts dans deux conditions expérimentales :

- Une condition dans laquelle l'interface expérimentale permet de travailler sur des objets abstraits (ou partiellement spécifiés).
- Une condition dans laquelle l'interface expérimentale oblige l'ordonnanceur à travailler avec des objets concrets (ou complètement spécifiés).

Par exemple, dans l'étude sur la conception d'emploi du temps universitaire, les participants devaient utiliser le logiciel Excel® pour représenter le résultat de leur ordonnancement. Nous avons fait le choix de ce logiciel car pour la tâche qui leur était demandée, son utilisation était simple, aussi bien pour les experts que pour les novices. En effet, à partir d'un tableau (emploi du temps) représentant en lignes les jours de la semaine et les numéros des groupes d'étudiants, et en colonnes les horaires de la journée (chapitre 2), les participants devaient saisir manuellement des informations dans les "cases" de l'emploi du temps (la salle, l'enseignant et le module). Dans notre étude, la saisie de ces informations était libre puisque, pour une "case donnée" à un "instant donné", l'ordonnanceur pouvait ne saisir que partiellement ces informations. Par exemple il pouvait renseigner seulement le module, puis spécifier ultérieurement la salle puis l'enseignant. Il avait donc la possibilité de travailler avec des objets partiellement spécifiés avant de spécifier complètement les objets de l'emploi du temps.

Dans une nouvelle étude, il pourrait donc être intéressant de comparer les deux conditions expérimentales définies précédemment. Dans la première condition, les ordonnanceurs auraient la possibilité de saisir partiellement des informations dans une "case" de l'emploi du temps (objet abstrait), avant de compléter ces informations (l'objet abstrait devient alors

concret). C'est cette condition que nous avons utilisée dans l'étude présentée au chapitre 6. Dans la deuxième condition expérimentale, les participants seraient contraints par l'interface expérimentale de saisir toutes les informations qui définissent un objet, pour qu'elles apparaissent visibles dans l'emploi du temps. En comparant avec la première condition, on pense que la deuxième condition expérimentale créerait plus de difficultés chez les experts, ce qui se manifesterait par une augmentation de la charge mentale. De plus, les contraintes d'utilisation de l'interface expérimentale conduiraient les experts à moins s'appuyer sur les objets pour résoudre le problème d'ordonnancement, et donc à gérer "mentalement" plus de contraintes. On observerait alors une proportion plus importante d'opérations de gestion de contraintes dans la première condition par rapport à la deuxième.

3.2 PROLONGER LES QUESTIONS AUTOUR DES SRTs ET DE LA GESTION DES CONTRAINTES

Comme nous l'avons rappelé dans le chapitre 2, les contraintes s'expriment souvent dans différents SRTs. Selon le SRT externe (ou point de vue) adopté, la visibilité de certaines représentations (et donc des contraintes) n'est pas la même. Par exemple, Goodstein (1983, cité par Hoc, 1987) a montré que le point de vue des représentations fonctionnelles et celui des représentations physiques n'étaient pas superposables (le point de vue des composantes physiques d'une installation ne permettait pas d'accéder à leurs fonctions) et qu'il était nécessaire de pouvoir passer de l'un à l'autre pour avoir une meilleure représentation du système. Dans le domaine de l'ordonnancement ferroviaire (nettoyage et réapprovisionnement en carburant des trains), van Wezel et Jorna (2009) ont proposé des interfaces graphiques permettant d'adopter soit un point de vue spatial (localisation géographique) soit un point de vue temporel. En s'inspirant des travaux de Goodstein, et de van Wezel et Jorna, on pourrait mener une étude dans laquelle deux conditions expérimentales seraient comparées, par exemple dans le cadre d'une tâche de conception d'emploi du temps universitaire :

- Une condition dans laquelle plusieurs points de vue sont accessibles à partir de l'interface informatique. Par exemple, le point de vue de l'emploi du temps des étudiants, celui de l'emploi du temps des enseignants et celui de l'emploi du temps des salles. Ces trois points de vue utiliseraient donc le même format de SRT externe, un emploi du temps, pour rendre visibles les contraintes de disponibilité. L'ordonnanceur pourrait alors passer d'un point de vue à l'autre, ce qui nous renseignerait notamment sur l'importance relative accordée à un point de vue par rapport aux autres.
- Une condition dans laquelle seul le point de vue de l'emploi du temps des étudiants est représenté sur l'interface. Les contraintes liées à la disponibilité des enseignants et des salles seraient alors fournies à partir d'un autre type de SRT externe, par exemple sous la forme d'une liste. On pourrait alors indiquer ces contraintes de manière différente dans cette liste, par exemple en termes de disponibilités pour les enseignants et en termes d'indisponibilités pour les salles.

La première condition expérimentale devrait alors faciliter la résolution du problème d'ordonnancement en rendant visibles plus de contraintes et en favorisant la détection de conflits entre contraintes. En mesurant la charge mentale dans les deux conditions expérimentales, on s'attendrait à une charge plus importante dans la deuxième condition qui propose seulement le point de vue de l'emploi du temps des étudiants sur l'interface.

De plus, selon le SRT (ou les SRTs) externe(s) choisi(s), l'apparition de contraintes antagonistes est plus ou moins facile à détecter. Puisque la gestion des contraintes s'appuie en partie sur les représentations externes, il conviendrait d'examiner les processus en jeu. Comment sont détectés les conflits entre contraintes ? Quelle est la contribution des représentations externes pour détecter ces conflits et pour les résoudre ensuite ? Quel est le rôle de l'expertise dans la détection de ces conflits ? Le travail d'analyse de l'activité de la planification des travaux de maintenance ferroviaire chez des experts et chez des novices cherchera en partie à répondre à ces questions de recherche. Grâce aux travaux de Lebahar (1983) dans le domaine de la conception architecturale, on sait déjà que l'architecte utilise le dessin comme un outil de simulation. En rendant visible sur un croquis certaines contraintes du problème, cela lui permet de mettre en évidence des conflits entre contraintes, ce qui facilite ensuite leur résolution.

Cette activité de simulation, mise en évidence par Lebahar, pourrait être examinée de manière plus approfondie, notamment à partir des protocoles de verbalisations. En effet, dans notre première étude sur l'ordonnancement manufacturier, nous avons observé quelques verbalisations que nous avons interprétées comme des simulations mentales. Cependant, comme ces activités n'étaient que faiblement apparues, nous n'avons pas approfondi leur examen. Notre étude dans le contexte ferroviaire pourrait être l'occasion d'approfondir cet aspect, en réintroduisant un prédicat de type "simulation mentale", qui pourrait aussi nous renseigner sur l'activité de détection et de résolution de conflits entre contraintes.

De ces situations de détection de conflits entre contraintes peuvent se poser des questions liées à leur résolution : observe-t-on des compromis dans la satisfaction de certaines contraintes ? Des satisfactions partielles de contraintes ? Des relâchements de contraintes ? Des pondérations de contraintes ? Dans ce contexte, des différences liées à l'expertise pourraient être observées. Par exemple, les experts procéderaient d'abord à une hiérarchisation des contraintes (gestion des contraintes dans une hiérarchie d'abstraction) pour résoudre les conflits alors que les novices s'enfermeraient dans des combinaisons de contraintes (propagations) pour trouver des solutions. Peut-être que le nombre de formulations de contraintes qui n'aboutissent pas immédiatement à une autre activité de gestion de contrainte (par ex., une propagation ou une satisfaction) est un indicateur de cette hiérarchisation. En effet, les experts pourraient formuler plusieurs contraintes sans les traiter immédiatement, ce qui leur permettrait de sélectionner la contrainte la plus pertinente à traiter à un instant "donné" dans le processus de résolution du problème d'ordonnancement.

Enfin, nous avons observé que pour résoudre le problème d'ordonnancement manufacturier, les experts procédaient à des violations de certaines contraintes prescrites par la tâche (les périodes de maintenance des machines). L'interprétation que nous avons proposée de cette activité est liée à l'impossibilité, dans cette étude, qu'avaient les participants de négocier ces contraintes. Pour réduire la complexité du problème, les experts, contrairement aux novices, ont mis en œuvre des violations de contraintes. Il pourrait être pertinent de valider ce résultat par exemple au travers d'un questionnaire ou d'un entretien avec des experts de différents domaines. Une des questions qui pourrait leur être posée serait de savoir s'il s'agit d'une pratique courante liée aux habitudes de travail (« Est-ce que vous avez supprimé les contraintes de maintenance car en situation réelle,

vous pourriez facilement la négocier ? »). De plus, il serait pertinent de mesurer le coût, en termes d'efficacité, d'une négociation en comparaison du coût d'intégration des contraintes de maintenance. Du point de vue de l'ordonnanceur, il pourrait être plus coûteux de réordonner en intégrant ces contraintes que de négocier avec le service de maintenance. Pour l'évaluation de ces coûts cognitifs, nous pourrions là encore utiliser les outils proposés par Cegarra et Chevalier (2008).

3.3 ÉVALUER L'INTERET DE LA METHODE "ORDONNANCEMENT DE GROUPES" D'UN POINT DE VUE PSYCHOLOGIQUE

Dans l'approche "ordonnement de groupes" proposée par la recherche opérationnelle, l'opérateur est considéré comme le "décideur final" car il réalise un ordonnancement intra-groupes. Dans une perspective psychologique, une telle répartition des fonctions entre l'opérateur et la machine pose la question de son intérêt pour l'ordonnanceur humain. En effet, du point de vue de l'opérateur, est-ce réellement plus simple d'ordonner à l'intérieur de groupes déjà définis ou préférerait-il ne pas être contraint par ces groupes prédéfinis ? Dans l'étude que nous avons menée, l'ordonnanceur ne pouvait pas remettre en cause les groupes proposés par la machine. Il pourrait alors être intéressant pour l'ordonnanceur d'avoir la possibilité de demander à la machine de recalculer les groupes lorsqu'ils ne lui paraissent pas adaptés à la situation réelle de l'atelier. De même, est-ce qu'il y aurait un intérêt pour l'ordonnanceur à participer très tôt à la définition des groupes d'opérations ? Enfin, on peut se demander si cette approche de la répartition des fonctions, telle qu'elle est définie actuellement par la recherche opérationnelle, ne pourrait pas conduire à une perte progressive de l'expertise des opérateurs, comme d'autres travaux ont pu le mettre en évidence (Bainbridge, 1983) ?

Pour évaluer l'intérêt de la méthode "ordonnement de groupes" du point de vue de l'ordonnanceur, on pourrait par exemple comparer différents modes de répartition des fonctions :

- Avant que l'ordonnement ne soit mis en œuvre, la machine propose à l'opérateur tous les groupes d'opérations pour lesquels il devra réaliser ensuite un ordonnancement intra-groupes. L'opérateur peut modifier ces groupes.
- Avant que l'ordonnement ne soit mis en œuvre, la machine ne propose que certains groupes d'opérations que l'opérateur peut modifier.
- L'ordonnement est mis en œuvre et la machine propose successivement les groupes d'opérations pour lesquels l'opérateur réalise un ordonnancement intra-groupes. L'opérateur peut demander à la machine de recalculer ces groupes.
- L'ordonnement est mis en œuvre et la machine propose successivement les groupes d'opérations. La machine recalcule automatiquement les groupes en temps réel.
- L'ordonnement est mis en œuvre et la machine propose successivement les groupes d'opérations. L'opérateur est contraint par les groupes proposés par la machine (mode de répartition utilisé dans cette thèse).

3.4 APPROFONDIR LA QUESTION DE LA GESTION DES SITUATIONS À RISQUES

Dans notre étude prolongeant le travail en recherche opérationnelle mené par Pinot (2008) autour de l'ordonnement de groupes, nous avons observé un rôle non négligeable du risque de panne sur l'amélioration de la performance d'ordonnement. Il pourrait être intéressant de poursuivre des travaux dans cette perspective. En répliquant ce genre d'expérience, on pourrait par exemple faire varier le nombre et le type d'aléas (par ex., retards de livraison de matériaux, absentéisme dans l'atelier, périodes de maintenance nécessitant l'arrêt de postes dans l'atelier, commandes urgentes à traiter, etc.) et observer leurs effets sur l'activité humaine d'ordonnement et de réordonnement. Toutefois, l'étude du réordonnement suite à l'apparition d'un aléa ne pourra pas être dissociée de celle de l'ordonnement. En effet, pour qu'une tâche de réordonnement soit intelligible du point de vue de l'ordonneur, il est important qu'il soit impliqué dans l'activité d'ordonnement qui la précède (McKay, 2001).

3.5 DES SITUATIONS D'ORDONNEMENT AUX SITUATIONS PLUS GÉNÉRALES DE CONCEPTION

Dans le chapitre 1, nous avons considéré le problème d'ordonnement comme un cas particulier de problème de conception. Pour étudier ce cas particulier, nous avons emprunté les cadres théoriques de la gestion de contraintes et des Systèmes de Représentation et de Traitement, qui ont été utilisés plus généralement dans les activités de conception. Les travaux de cette thèse ont permis d'apporter un éclairage supplémentaire en distinguant une activité de gestion de contraintes (structures abstraites), d'une activité de gestion d'objets (contraintes visibles sur le SRT externe de la solution). Cette distinction nous a alors permis de mettre en évidence des différences liées à l'expertise.

De futures recherches sur la résolution de problèmes de conception, voire sur la résolution de problème de manière générale, pourraient bénéficier de cette distinction faite entre gestion de contraintes et gestion d'objets. Cela permettrait par exemple pour prolonger les travaux sur la nature de l'expertise dans les activités de résolution de problème.

4 BIBLIOGRAPHIE

- Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. *Automatica*, 19, 775-779.
- Cardin, O. (2007). *Apport de la simulation en ligne dans l'aide à la décision pour le pilotage des systèmes de production. Application à un système flexible de production*. Thèse, Université de Nantes, France.
- Cegarra, J. (2004). *La gestion de la complexité dans la planification : le cas de l'ordonnement*. Thèse, Université Paris 8, France.
- Cegarra, J., & Chevalier, A. (2008). The use of Tholos software for combining measures of mental workload: towards theoretical and methodological improvements. *Behavior Research Methods*, 40, 988-1000.
- Crawford, S., MacCarthy, B.L., Wilson, J.R., & Vernon, C. (1999). Investigating the work of industrial schedulers through field study. *Cognition, Technology & Work*, 1, 63-77.

- Goodstein, L.P. (1983). An integrated display set for process operators. In G. Johanssen & J.E. Rijnsdorp (Eds.), *IFAC – Analysis, design, and evaluation of man-machine systems* (pp.63-70). Oxford: Pergamon.
- Higgins, P.G. (1996). Interaction in hybrid intelligent scheduling. *International Journal of Human Factors in Manufacturing*, 6, 185-203.
- Hoc, J.M. (1987). *Psychologie cognitive de la planification*. Grenoble: Presses Universitaires de Grenoble.
- Hoc, J.M., & Amalberti, R. (2007). Cognitive control dynamics for reaching a satisficing performance in complex dynamic situations. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1, 22-55.
- Jackson, S., Wilson, J.R., & MacCarthy, B.L. (2004). A new model of scheduling in manufacturing : tasks, roles, and monitoring. *Human Factors*, 46, 533-550.
- Lebahar, J.C. (1983). *Le dessin d'architecte*. Roquevaire, France: Editions Parenthèses.
- MacCarthy, B.L., & Wilson, J.R. (2001). The human contribution to planning, scheduling and control in manufacturing industry. In B.L. MacCarthy, & J.R. Wilson (Eds.), *Human performance in planning and scheduling* (pp. 3-14). London: Taylor & Francis.
- MacCarthy, B.L., Wilson, J.R., & Crawford, S. (2001). Human performance in industrial scheduling: a framework for understanding. *International Journal of Human Factors in Manufacturing*, 11, 63-77.
- McKay, K.N. (2001). Lessons from the factory floor. In B.L MacCarthy & J.R. Wilson (Eds.), *Human Performance in planning and scheduling* (pp. 45-64). London: Taylor & Francis.
- Neely, A. (1999). The performance measurement revolution: why now and what next? *International Journal of Operations and Production Management*, 19, 205-228.
- Pinot, G. (2008). *Coopération homme-machine pour l'ordonnancement sous incertitudes*. Thèse, Université de Nantes, France.
- Rasmussen, J. (1985). The role of hierarchical knowledge representation in decision-making and system management. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-15, 234-243.
- Rasmussen, J. (1986). *Information processing and human-machine interaction*. Amsterdam: Elsevier.
- Stoop, P.M., & Wiers, V.C.S. (1996). The complexity of scheduling in practice. *International Journal of Operations and Production Management*, 16, 37-53.
- van Wezel, W., & Jorna, R.J. (2009). Cognition, tasks, and planning: supporting the planning of shunting operations at Netherlands Railways. *Cognition, Technology & Work*, 11, 165-176.

BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE

– A –

- Akkerman, R., & van Donk, D.P. (2009). Analyzing scheduling in the food-processing industry. *Cognition, Technology & Work, 11*, 215-266.
- Amalberti, R. (1991). Introduction. In R. Amalberti, M. De Montmollin, & J. Theureau (Eds.), *Modèles en Analyse du Travail* (pp.17-23). Bruxelles : Mardaga.
- Amalberti, R. (1996). *La conduite de systèmes à risques*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Amalberti, R., & Hoc, J.M. (1998). Analyse des activités cognitives en situation dynamique : Pour quels buts ? Comment ? *Le Travail Humain, 61*, 209-234.
- Ammons, J.C., Govindaraj. T., & Mitchell, C.M. (1986). Human aided scheduling for FMS: a supervisory control paradigm for real-time control of flexible manufacturing systems. *Annals of Operations Research, 15*, 313-335.
- Anzai, Y., & Simon, H.A. (1979). The theory of learning by doing. *Psychological Review, 86*, 124-140.
- Artigues, C. (1997). *Ordonnancement en temps réel d'ateliers avec temps de préparation des ressources*. Thèse, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.
- Attardi, G., & Simi, M. (1995). A formalization of viewpoints. *Fundamenta Informaticae, 23*, 149-174.

– B –

- Baddeley, A.D. (1986). *Working memory*. Oxford: Oxford University Press.
- Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. *Automatica, 19*, 775-779.
- Baker, K.R. (1974). *Introduction to sequencing and scheduling*. New York: Wiley.
- Beishon, R.J. (1974). An analysis and simulation of an operator's behavior in controlling continuous baking ovens. In E. Edwards & F.P. Lees (Eds.), *The human operator in process control* (pp. 79-90). London: Taylor & Francis.
- Billaut, J.C. (1993). *Prise en compte des ressources multiples et des temps de préparation dans les problèmes d'ordonnancement en temps réel*. Thèse, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.
- Bisseret, A., Figeac-Letang, C., & Falzon, P. (1988). Modélisation de raisonnements opportunistes : l'activité des spécialistes de régulation des carrefours à feux. *Psychologie Française, 33*, 161-169.
- Blondel, F. (2007). *Gestion de la production* (5ème édition). Paris : Dunod.
- Bonnardel, N. (1992). *Le rôle de l'évaluation dans les activités de conception*. Thèse, Université de Provence, Aix-en-Provence, France.

- Boshuizen, H.P.A., & Schmidt, H.G. (1992). On the role of biomedical knowledge in clinical reasoning by experts, intermediates and novices. *Cognitive Science*, *16*, 153-184.
- Brainbridge, L. (1974). Analysis of verbal protocols from a process control task. In E., Edwards & F.P., Lees (Eds.), *The human operator in process control* (pp.146-158). London: Taylor & Francis.
- Brown, J. (1990). Drivers' margins of safety considered as a focus for research on errors. *Ergonomics*, *33*, 1307-1314.

- C -

- Cardin, O. (2007). *Apport de la simulation en ligne dans l'aide à la décision pour le pilotage des systèmes de production. Application à un système flexible de production*. Thèse, Université de Nantes, France.
- Castelfranchi, C. (1998). Modelling social action for agents. *Artificial Intelligence*, *103*, 157-182.
- Caverni, J.P. (1988). Psychologie de l'expertise : éléments d'introduction. *Psychologie Française*, *33*, 114-125.
- Cegarra, J. (2004). *La gestion de la complexité dans la planification : le cas de l'ordonnement*. Thèse, Université Paris 8, France.
- Cegarra, J. (2008). A cognitive typology of scheduling situations: a contribution to laboratory and field studies. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, *9*, 201-222.
- Cegarra, J., & Chevalier, A. (2008). The use of Tholos software for combining measures of mental workload: towards theoretical and methodological improvements. *Behavior Research Methods*, *40*, 988-1000.
- Cegarra, J., & Hoc, J.M. (2011). *Effet du niveau d'expérience des opérateurs et de la complexité du problème sur les stratégies d'élaboration de plans : une étude auprès de concepteurs d'horaires de trains*. Manuscrit soumis pour publication.
- Cegarra, J., & van Wezel, W. (2011). A comparison of task analysis methods for planning and scheduling. In J.C. Fransoo, T. Wäfler, & J. Wilson (Eds.), *Behavioral Operations in Planning and Scheduling* (pp. 323-338). Berlin: Springer-Verlag.
- Cellier, J.M., Eyrolle, H., & Mariné, C. (1997). Expertise in dynamic environments. *Ergonomics*, *40*, 28-50.
- Charness, N., & Tuffiash, M. (2008). The role of expertise research and human factors in capturing, explaining, and producing superior performance. *Human Factors*, *50*, 427-432.
- Chase, W.G., & Simon, H.A. (1973). Perception in chess. *Cognitive Psychology*, *4*, 55-81.
- Chevalier, A., & Bonnardel, N. (2003). Prise en compte et gestion de contraintes : une étude dans la résolution d'un problème créatif de conception. *Bulletin de Psychologie*, *56*, 33-48.
- Chevalier, A., & Cegarra, J. (2008). Une approche psychologique de la notion de contrainte en résolution de problèmes. *Le Travail Humain*, *71*, 173-198.

- Chi, M.T.H., Feltovich, P., & Glaser, R. (1981). Categorization and representations of physics problems by experts and novices. *Cognitive Science*, 5, 121–152.
- Chi, M., Glaser, R., & Farr, M. (1988). *The Nature of Expertise*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Clark, N. (1952). *The Gantt chart*. London: Pitman and sons.
- Crawford, S., & Wiers, V.C.S. (2001). From anecdotes to theory: a review of existing knowledge on human factors of planning and scheduling. In B.L. MacCarthy & J.R. Wilson (Eds.), *Human performance in planning and scheduling: fieldwork studies, methodologies and research issues* (pp. 15-43). London: Taylor & Francis.
- Crawford, S., MacCarthy, B.L., Wilson, J.R., & Vernon, C. (1999). Investigating the work of industrial schedulers through field study. *Cognition, Technology & Work*, 1, 63-77.

– D –

- Darses, F. (1991). The constraint satisfaction approach to design: A psychological investigation. *Acta Psychologica*, 78, 307-325.
- Darses, F. (1994). *Gestion de contraintes dans la résolution de problèmes de conception*. Thèse, Université de Paris 8, France.
- Darses, F. (1997). Contraintes & Gestion des contraintes. In M. de Montmollin (Ed.), *Vocabulaire de l'Ergonomie*, (pp. 99-106). Toulouse : Octarès (seconde édition revue et augmentée).
- Davenport & Beck (2000). *A survey of techniques with uncertainty*. Unpublished Manuscript. Available: <http://www.eil.utoronto.ca/EIL/profiles/chris/zip/uncertainty-survey.ps.zip>.
- de Groot, A.D. (1966). Perception and memory versus thought: some old ideas and recent findings. In: Kleinmuntz, M. (Ed.), *Problem Solving: Research, Method and Theory* (pp.19-50). New York: Wiley.
- Dessouky, M.I., Moray, N., & Kijowski, B. (1995). Taxonomy of scheduling systems as a basis for the study of strategic behavior. *Human factors*, 37, 443-472.
- Duncker, K. (1958). On problem-solving. *Psychological Monographs*, 5, n°270.

– E –

- Eastman, C. (1970). On the analysis of intuitive design processes. In G. Moore (Ed.), *Emerging methods in environmental design and planning* (Proceedings of First International Conference of the design methods group). (pp. 21-37). Cambridge, MA: MIT Press.
- Ericsson, K.A., & Charness, N. (1994). Expert performance: Its structure and acquisition. *American Psychologist*, 49, 725-747.
- Ericsson, K.A., & Simon, H.A. (1980). Verbal Reports as Data. *Psychological Review*, 87, 215-251.
- Ericsson, K.A., & Simon, H.A. (1993). Protocol analysis: Verbal reports as data (revised edition. Original version: 1984). Cambridge, MA: Bradfordbooks/MIT Press.

- Ericsson, K.A., & Smith, J. (Eds.). (1991). *Toward a general theory of expertise*. New York: Cambridge University Press.
- Ericsson, K.A., Charness, N., Hoffman, R., & Feltovich, P. (Eds.). (2006). *Cambridge handbook of expertise and expert performance*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Esquirol, P., & Lopez, P. (1999). *L'ordonnancement*. Paris : Economica.
- Esswein, C. (2003). *Un apport de flexibilité séquentielle pour l'ordonnancement robuste*. Thèse, Université François Rabelais, Tours, France.

– F –

- Farrington-Darby, T., & Wilson, J.R. (2006). The nature of expertise: a review. *Applied Ergonomics*, 37, 17-32.
- Feldman, A., & Pinedo, M. (2001). Lekin (version 2.4) computer software. Retrieved from: <http://www.stern.nyu.edu/om/software/lekin/>
- Fitts, P.M. (1951). *Human engineering for an effective air navigation and traffic control system*. Washington, DC: National Research Council.
- Fox, M.S. (1990). Constraint-guided scheduling - a short history of research at CMU. *Computers in Industry*, 14, 79-88.

– G –

- Gacias, B. (2010). *Une approche interdisciplinaire pour l'ordonnancement des transports*. Thèse, Université Toulouse III, France.
- Gacias, B., Cegarra, J., & Lopez, P. (2010). Work domain analysis and ecological interface for the vehicle routing problem. *11th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems Valenciennes*, France, August 31-September 3.
- Garrett, S.K., Caldwell, B.S., Harris, E.C., & Gonzalez, M.C. (2009). Six dimensions of expertise: a more comprehensive definition of cognitive expertise for team coordination. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 10, 93-105.
- Gero, J., & McNeil, T. (1998). An approach to the analysis of design protocols. *Design Studies*, 19, 1-61.
- Gibson, J.J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Mifflin.
- Gibson, R., & Laios, L. (1978). The presentation of Information to the Job-Shop Scheduler. *Human Factors*, 20, 725-732.
- Girin, J., & Grosjean, M. (Eds.) (1996). *La transgression des règles au travail*. Paris : L'Harmattan.
- Glaser, R., & Chi, M.T.H. (1988). Overview. In M.T.H. Chi, R. Glaser, & M.J. Farr (Eds.), *The Nature of Expertise* (pp.15-36). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Goel, V. (1995). *Sketches of thought*. Cambridge, MA: MIT Press.

- Goel, V., & Pirolli, P. (1992). The structure of design problem spaces. *Cognitive Science*, 16, 395-429.
- Goodstein, L.P. (1983). An integrated display set for process operators. In G. Johannsen & J.E. Rijnsdorp (Eds.), *IFAC – Analysis, design, and evaluation of man-machine systems* (pp.63-70). Oxford: Pergamon.
- Gruat-La-Forme, F.A., Botta-Genoulaz, V., & Campagne, J.P. (2009). The role of APS systems in Supply Chain Management: a theoretical and industrial analysis. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 5, 356-374.
- Guerin, C. (2009). *Analyse du travail des dirigeants de proximité chargés de la planification opérationnelle des travaux du domaine signalisation de la branche Infrastructure de la SNCF en vue de l'introduction d'un outil de Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur* [Rapport de stage]. IRCCyN, Nantes, France.
- Guerin, C., Hoc, J.M., & Mebarki, N. (2011). *The nature of expertise in industrial scheduling: strategic and tactical processes, constraint and object management*. (Manuscript submitted for publication).
- Guindon, R. (1990). Knowledge exploited by experts during software system design. *International Journal of Man-Machine Studies*, 33, 279-304.

– H –

- Hayes-Roth, B., & Hayes-Roth, F. (1979). A cognitive model of planning. *Cognitive Science*, 3, 275-310.
- Higgins, P.G. (1996). Interaction in hybrid intelligent scheduling. *International Journal of Human Factors in Manufacturing*, 6, 185-203.
- Higgins, P.G. (1999). *Job shop scheduling : hybrid intelligent human-computer paradigm*. Ph.D. Thesis, University of Melbourne, Australia.
- Higgins, P.G. (2001). Architecture and interface aspects of scheduling decision support. In B.L., MacCarthy, J.R. & Wilson (Eds), *Human performance in planning and scheduling* (pp. 245-279). London : Taylor & Francis.
- Hoc, J.M. (1977). Role of mental representation in learning a programming language. *International Journal of Man-Machine Studies*, 9, 87-105.
- Hoc, J.M. (1983). *L'analyse planifiée des données en psychologie*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Hoc, J.M. (1987). *Psychologie cognitive de la planification*. Grenoble: Presses Universitaires de Grenoble.
- Hoc, J.M. (1988). *Cognitive psychology of planning* (C. Greenbaum, Trad). London: Academic Press (Original work published in 1987).
- Hoc, J.M. (1996). *Supervision et contrôle de processus: la cognition en situation dynamique*. Grenoble, F: Presses Universitaires de Grenoble.
- Hoc, J.M. (2001a). Toward ecological validity of research in cognitive ergonomics. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 2, 278-288.

- Hoc, J.M. (2001b). Towards a cognitive approach to human-machine cooperation in dynamics situations. *International Journal of Human-Computer Studies*, 54, 509-540.
- Hoc, J.M. (2003). Coopération humaine et systèmes coopératifs. In G. Boy (Ed.), *Ingénierie cognitive. IHM et cognition* (pp. 139-187). Paris : Hermès.
- Hoc, J.M., & Amalberti, R. (1999). Analyse des activités cognitives en situation dynamique : d'un cadre théorique à une méthode. *Le Travail Humain*, 62, 97-129.
- Hoc, J.M., & Amalberti, R. (2005). Modelling NDM cognitive activities in dynamic situations: the role of a coding scheme. In H. Montgomery, B. Brehmer, & R. Lipshitz (Eds.), *How professionals make decisions* (pp. 319-334). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Hoc, J.M., & Amalberti, R. (2007). Cognitive control dynamics for reaching a satisficing performance in complex dynamic situations. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1, 22-55.
- Hoc, J.M., & Chauvin, C. (2011). Cooperative implications of the allocation of functions to humans and machines. (Manuscript submitted for publication).
- Hoc, J.M., & Leplat, J. (1983). Evaluation of different modalities of verbalization in a sorting task. *International Journal of Man-Machine Studies*, 18, 283-306.
- Hoc, J.M., Guerin, C., & Mebarki, N. (sous presse). The nature of expertise in scheduling: the case of timetabling. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*.
- Hoc, J.M., Mebarki, N., & Cegarra, J. (2004). L'assistance à l'opérateur humain pour l'ordonnancement dans les ateliers manufacturiers. *Le Travail Humain*, 67, 181-208.
- Hoffman, R.R. (Ed.). (1992). *The psychology of expertise*. New York: Springer Verlag.
- Hooker, J.N. (2006). Operations research methods in constraint programming. In F. Rossi, P. van Beck, & T. Walsh (Eds.), *Handbook of constraint programming* (pp. 527-570). Amsterdam: Elsevier.
- Hutchins, E. (1995). *Cognition in the wild*. Cambridge, MA: MIT Press.

– J –

- Jackson, S., Wilson, J.R., & MacCarthy, B.L. (2004). A new model of scheduling in manufacturing : tasks, roles, and monitoring. *Human Factors*, 46, 533-550.
- Jambu, M. (1991). *Exploratory and Multivariate Data Analysis*. Orlando, FL: Academic Press.
- Janssen, P., Jégou, P., Nougier, B., & Vilarem, M.-C. (1989). *Problèmes de conception : une approche basée sur la satisfaction de contraintes*. Communication présentée aux « 9emes Journées internationales : Les systèmes experts et leurs applications ». Avignon, France, Mai-Juin.
- Jorna, R.J. (2006). Cognition, planning, and domains: an empirical study into the planning processes of planners. In W. van Wezel, R.J. Jorna, & A.M. Meystel (Eds.), *Planning in intelligent systems* (pp. 101-135). Hoboken, NJ: Wiley.

– K –

- Kiewiet, D.J., Jorna, R.J., & van Wezel, W. (2005). Planners and their cognitive maps: An analysis of domain representations using multi dimensional scaling. *Applied Ergonomics*, 36, 695-708.
- Kolodner, J.L., & Wills, L.M. (1996). Powers of observation in creative design. *Design Studies*, 17, 385-416.

– L –

- Larkin, J., & Reif, F. (1979). Understanding and teaching problem solving in physics. *European Journal of Science Education*, 1, 191-203.
- Lebahar, J.C. (1983). *Le dessin d'architecte*. Roquevaire, France: Editions Parenthèses.
- Lebahar, J.C. (1997). La simulation, instrument de représentation et de régulation dans la conception de produit. In P. Béguin & A. Weill-Fassina (Eds.), *La simulation en ergonomie : connaître, agir et interagir* (pp. 77-96). Toulouse : Octarès Editions.
- Lecoutre, B., & Poitevineau, J. (2005). Le logiciel « LePAC » [PAC Software : English version available]. *La Revue de Modulad*, 33 (whole volume). Retrieved [22.12.10] from: <http://www.univ-rouen.fr/LMRS/Persopage/Lecoutre/PAC.htm>
- Leplat, J. (1991). Compétence et Ergonomie. In R. Amalberti, M. De Montmollin, & J. Theureau (Eds.), *Modèles en Analyse du Travail* (pp.263-278). Bruxelles : Mardaga.
- Leplat, J., & Hoc, J.M. (1981). Subsequent verbalization in the study of cognitive processes. *Ergonomics*, 24, 743-755.
- Leplat, J., & Hoc, J.M. (1983). Tâche et activité dans l'analyse psychologique des situations. *Cahiers de Psychologie Cognitive*, 3, 49-63.
- Le Ny, J.F. (1985). Comment (se) représenter les représentations. *Psychologie française*, 30, 231-238.

– M –

- MacCarthy, B.L., & Liu, J. (1993). Addressing the gap in scheduling research: a review of optimization and heuristic methods in production scheduling. *International Journal of Production Research*, 31, 59-79.
- MacCarthy, B.L., & Wilson, J.R. (2001). The human contribution to planning, scheduling and control in manufacturing industry. In B.L. MacCarthy, & J.R. Wilson (Eds.), *Human performance in planning and scheduling* (pp. 3-14). London: Taylor & Francis.
- MacCarthy, B.L., Wilson, J.R., & Crawford, S. (2001). Human performance in industrial scheduling: a framework for understanding. *International Journal of Human Factors in Manufacturing*, 11, 63-77.
- Mathy, F., & Feldman, J. (2012). What's magic about magic numbers? Chunking and data compression in short-term Memory. *Cognition*, 122, 346-362.

- McKay, K.N. (2001). Lessons from the factory floor. In B.L MacCarthy & J.R. Wilson (Eds.), *Human Performance in planning and scheduling* (pp. 45-64). London: Taylor & Francis.
- McKay, K.N., & Wiers, V.C.S. (1999). Unifying the theory and practice of production scheduling. *Journal of Manufacturing Systems*, 18, 241-255.
- McKay, K.N., & Wiers, V.C.S. (2003). Integrated decision support for planning, scheduling, and dispatching tasks in a focused factory. *Computers in Industry*, 50, 5-14.
- McKay, K.N., Buzacott, J.A., & Safayeni, F.R. (1989). The scheduler's knowledge of uncertainty: the missing link. In J. Browne (Ed.), *Knowledge Based Production Management System* (pp.171-189). Amsterdam: North-Holland.
- McKay, K.N., Pinedo, M., & Webster, S. (2002). Practice-focused research issues for scheduling systems. *Production and Operations Management*, 11, 249-258.
- McKay, K.N., Safayeni, F.R., & Buzacott, J.A. (1988). Job-shop scheduling theory: what is relevant? *Interfaces*, 18, 84-90.
- McKay, K.N., Safayeni, F.R., & Buzacott, J.A. (1995). 'Common Sense' realities of planning and scheduling in printed circuit board production. *International Journal of Production Research*, 33, 1587-1603.
- McKay, K.N., Buzacott, J.A., Charness, N., & Safayeni, F.R. (1992). The scheduler's predictive expertise: an interdisciplinary perspective. In G.I. Doukidis & R.J. Paul (Eds.), *Artificial Intelligence in Operational Research* (pp. 139-150). London: MacMillan Press.
- Meseguer, P. (1989). Constraint satisfaction problem: an overview. *AICOM*, 2, 3-17.
- Mietus, D. (1994). *Understanding planning for effective decision support. A cognitive task analysis of nurse scheduling*. Doctoral Dissertation, University of Groningen, The Netherlands.
- Moray, N., Dessouky, M.I., Kijowski, B.A., & Adapathya, R. (1991). Strategic behavior, workload, and performance in task scheduling. *Human Factors*, 33, 607-629.

– N –

- Nakamura, N., & Salvendy, G. (1988). An experimental study of human decision-making in computer-based scheduling of flexible manufacturing system. *International Journal of Production Research*, 26, 567-583.
- Nakamura, N., & Salvendy, G. (1994). Human planner and scheduler. In G. Salvendy & W. Karwowski (Eds.), *Design of work and development of personnel in advanced manufacturing* (pp.331-354). New York: Wiley.
- Neely, A. (1999). The performance measurement revolution: why now and what next? *International Journal of Operations and Production Management*, 19, 205-228.
- Newell, A., & Simon, H.A. (1972). *Human Problem Solving*. Englewoods Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Nisbett, R.E., & Wilson, TD. (1977). Telling more than we can know: verbal reports on mental processes. *Psychological Review*, 84, 231-259.

– P –

- Parasuraman, R., & Riley, V. (1997). Humans and automation: use, misuse, disuse, abuse. *Human Factors*, 39, 230-253.
- Patel, V.L., & Groen, G.J. (1986). Knowledge based solution strategies in medical reasoning. *Cognitive Science*, 10, 91–116.
- Pinedo, M. (1994). *Scheduling: Theory, Algorithms and Systems*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Pinot, G. (2008). *Coopération homme-machine pour l'ordonnancement sous incertitudes*. Thèse, Université de Nantes, France.

– R –

- Rasmussen, J. (1985). The role of hierarchical knowledge representation in decision-making and system management. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-15, 234-243.
- Rasmussen, J. (1986). *Information processing and human-machine interaction*. Amsterdam: Elsevier.
- Rasmussen, J. (1997). Merging paradigms: decision making, management, and cognitive control. In R. Flin, E. Salas, M.E. Strub, & L. Marting (Eds). *Decision Making under Stress: Emerging Paradigms and Applications* (pp. 67-85). England: Ashgate.
- Rasmussen, J., & Jensen, A. (1974). Mental procedures in real-life tasks: a case study of electronic troubleshooting. *Ergonomics*, 17, 293-307.
- Reitman, W. (1964). Heuristic decision procedures, open constraints, and the structure of ill-defined problems. In M.W. Shelley & G.L. Bryan (Eds.), *Human judgments and optimality*. New York: Wiley.
- Richard, J.F. (1999). Comportements, buts et représentations. *Psychologie Française*, 44, 75-90.
- Richard, J.F. (2004). *Les activités mentales. De l'interprétation de l'information à l'action*. Paris: Armand Colin.
- Richard, J.F., Pointreud, S., & Tijus, C. (1993). Problem-solving restructuring: elimination of implicit constraints. *Cognitive Science*, 17, 497-529.
- Roth, E.M., Bennett, K.B., & Woods, D.D. (1988). Human interaction with an “intelligent” machine. In G. Mancini, D.D. Woods, & E. Hollnagel (Eds.) *Cognitive Engineering in Complex Dynamic Worlds* (pp. 23-69). London, UK: Academic Press.
- Rouanet, H. (1996). Bayesian methods for assessing importance of effects. *Psychological Bulletin*, 119, 149-158.

– S –

- Sakphisal, A., & Higgins, P.G. (2010). Studying the existing service process of three hospital outpatient departments. *International Journal of Health Management and Information, 1*, 111-130.
- Sanderson, P.M. (1989). The human planning and scheduling role in advanced manufacturing systems: An emerging human factors domain. *Human Factors, 31*, 635-666.
- Sanderson, P.M. (1991). Towards the model human scheduler. *International Journal of Human Factors in Manufacturing, 1*, 195-219.
- Sanderson, P., Scott, J., Johnson, T., Mainzer, J., Watanabe, L., & James, J. (1994). MacSHAPA and the enterprise of exploratory sequential data analysis (ESDA). *International Journal of Human-Computer Studies, 41*, 633-681.
- Scaife, M., & Rogers, Y. (1996). External cognition: how do graphical representations work? *International Journal of Human-Computer Studies, 45*, 185-213.
- Shanteau, J. (1992). The psychology of experts: an alternative view. In G. Wright & F. Bolger (Eds.), *Expertise and Decision Support* (pp.11–23). New York: Plenum Press.
- Sheridan, T.B. (1992). *Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control*. Cambridge MA: MIT Press.
- Shiffrin, R., & Schneider, W. (1977). Controlled and automatic human information processing: perceptual learning, automatic attending and a general theory. *Psychological Review, 84*, 127–190.
- Simon, H.A. (1973). The structure of ill structured problems. *Artificial Intelligence, 4*, 181-201.
- Simon, H.A., & Barenfeld, M. (1969). Information-processing analysis of perceptual processes in problem-solving. *Psychological Review, 76*, 473-483.
- Simon, H.A., & Lea, G. (1974). Problem solving and rule induction: a unified view. In L.W. Gregg (Ed.), *Knowledge and cognition* (pp. 105-128). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Smith, H.T., & Crabtree, R.G. (1975). Interactive planning: a study of computer aiding in the execution of a simulated scheduling task. *International Journal of Man-Machine Studies, 7*, 213-231.
- Smith, E.R., & Miller, F.D. (1978). Limits on perception of cognitive processes: a reply to Nisbett and Wilson. *Psychological Review, 85*, 355-362.
- Soloway, E., Adelson, B., & Ehrlich, K. (1988). Knowledge and processes in the comprehension of computer programs. In M. Chi, R. Glaser, & M. Farr (Eds.), *The nature of expertise* (pp. 129-152). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Statistica (version 6) computer software. Retrieved from: <http://www.statsoft.com/french/welcome.html>
- Stefik, M. (1981a). Planning with constraints (MOLGEN: Part1). *Artificial Intelligence, 16*, 111-140.

- Stefik, M. (1981b). Planning with constraints. MOLGEN: part 2. *Artificial Intelligence*, 16, 141-170.
- Stoop, P.M., & Wiers, V.C.S. (1996). The complexity of scheduling in practice. *International Journal of Operations and Production Management*, 16, 37-53.
- Sutherland, I.E. (1963). *Sketchpad, a man-machine graphical communication system*. Ph.D. Dissertation, MIT, Cambridge, MA.

– T –

- Taatgen, N.A. (1999). *Learning without limits: from problem solving towards a unified theory of learning*. Doctoral Dissertation, University of Groningen, The Netherlands.
- Tabe, T., & Salvendy, G. (1988). Toward a hybrid intelligent system for scheduling and rescheduling of FMS. *International Journal of Compute Integrated Manufacturing*, 1, 154-164.
- Tabe, T., Yamamuro, S., & Salvendy, G. (1990). Knowledge elicitation in scheduling FMS: towards a hybrid intelligent system. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 5, 17-27.
- Theureau, J. (1992). *Le cours d'action : analyse sémiologique. Essai d'une anthropologie cognitive située*. Berne : Peter Lang.
- Thomas, V. (1980). *Aide à la décision pour l'ordonnancement d'atelier en temps réel*. Thèse, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.
- Thomas, J.C., & Carroll, J.M. (1979). The psychological study of design. *Design Studies*, 1, 5-11.
- Trentesaux, D., Moray, N., Tahon, C. (1998). Integration of the human operator into responsive discrete production management systems. *European Journal of Operational Research*, 109, 342-361.

– U –

- Ullman, D., Dietterich, T., & Stauffer, L. (1988). A model of the mechanical design process based on empirical data. *AI EDAM*, 2, 33-52.
- Usher, J.M., & Kaber, D.B. (2000). Establishing information requirements for supervisory controllers in a flexible manufacturing system using GTA. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 10, 431-452.

– V –

- van Wezel, W., & Jorna, R.J. (2006). Introduction. In W. van Wezel, R.J. Jorna, & A.M. Meystel (Eds.), *Planning in intelligent systems* (pp. 1-22). Hoboken, NJ: Wiley.
- van Wezel, W., & Jorna, R.J. (2009). Cognition, tasks, and planning: supporting the planning of shunting operations at Netherlands Railways. *Cognition, Technology & Work*, 11, 165-176.

- van Wezel, W., Cegarra, J., & Hoc, J.M. (2011). Allocating functions to human and algorithm in Scheduling. In J.C. Fransoo, T. Wäfler, & J. Wilson (Eds.), *Behavioral Operations in Planning and Scheduling* (pp. 339-370). Berlin: Springer-Verlag.
- van Wezel, W., Jorna, R.J., & Mietus, D.M. (1996). Scheduling in a generic perspective: knowledge-based decision support by domain analysis. *International Journal of Expert Systems: research and applications*, 3, 357-381.
- Vernon, C. (2001). Lingerer amongst the lingerie: an observation-based study into support for scheduling at a garment manufacturer. In B.L. MacCarthy & J.R. Wilson (Eds.), *Human performance in planning and scheduling* (pp. 135-163). London: Taylor & Francis.
- Vicente, K. (1999). *Cognitive work analysis: towards safe, productive, and healthy computer-based work*. NJ : Lawrence Erlbaum Associates.
- Vicente, K.J., & Rasmussen, J. (1990). The ecology of human-machine systems II: mediating direct perception in complex work domains. *Ecological Psychology*, 2, 207-249.
- Visser, W. (2006). *The cognitive artifacts of designing*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Visser, W. (2009). La conception : de la résolution de problèmes à la construction de représentations. *Le Travail Humain*, 72, 61-78.

– W –

- Webster, S. (2001a). A case study of scheduling practice at a machine tool manufacturer. In B.L. MacCarthy & J.R. Wilson (Eds.), *Human performance in planning and scheduling* (pp. 67-81). London: Taylor & Francis.
- Webster, S. (2001b). A Field Test of a Prototype Scheduling System. In B.L. MacCarthy & J.R. Wilson (Eds.), *Human performance in planning and scheduling* (pp. 231-243). London: Taylor & Francis.
- Wiers, V.C.S. (1996). A quantitative field study of the decision behaviour of four shop floor schedulers. *Production Planning and Control*, 7, 383–392.
- Wiers, V.C.S. (1997a). *Human-computer interaction in production scheduling: analysis and design of decision support systems for production scheduling tasks*. Doctoral dissertation, Technische Universiteit Eindhoven, The Netherlands.
- Wiers, V.C.S. (1997b). Decision support systems for production scheduling tasks – part I of a case study: analysis and task redesign. *Production, Planning & Control*, 8, 711-721.
- Wiers, V.C.S., & van der Schaaf, T.W. (1996). A framework for decision support in production scheduling tasks. *Production Planning & Control*, 25, 533-544.
- Wiener, E., Kanki, B., & Helmreich, R. (Eds.). (1993). *Cockpit Resource Management*. New York: Academic. Press.
- Wilson, R.A., & Keil, F.C. (2001). *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Wilson, J.R., & Rutherford, A. (1989). Mental models: theory and application in human factors. *Human Factors*, 31, 617-634.

Woods, D.D. (1988). Coping with complexity: the psychology of human behavior in complex systems. In L.P. Goodstein, H.B. Andersen, & S.E. Olsen (Eds.), *Tasks, Errors and Mental Models* (pp. 128-148). London: Taylor and Francis.

– Z –

Zhang, Z. (1997). The nature of external representations in problem solving. *Cognitive Science*, 21, 179-217.

Zhang, J., & Norman, D.A. (1994). Representations in distributed cognitive tasks. *Cognitive Science*, 18, 87-122.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Modèle du contrôle cognitif proposé par Hoc & Amalberti (2007). Deux dimensions orthogonales sont distinguées : en ordonnée, le niveau d'abstraction des données (symboliques contre subsymboliques), et en abscisse, l'origine des données (internes contre externes).	37
Figure 2 : Deux dimensions orthogonales dans l'abstraction selon Rasmussen (1985, 1986) : la hiérarchie de décomposition et la hiérarchie d'abstraction. Des parcours de résolution de problèmes peuvent être représentés à l'intérieur du croisement des deux dimensions.	38
Figure 3 : Le problème de la tour d'Hanoï. La tâche est de déplacer des disques de la tige A vers la tige C en respectant des règles.	43
Figure 4 : Représentation d'un emploi du temps universitaire. En lignes sont indiqués les jours de la semaine et les numéros de groupe. Les créneaux horaires sont en colonnes. Chaque "case" de l'emploi du temps correspond à un objet.	48
Figure 5 : L'objet qui satisfait de manière visible la contrainte "un Cours Magistral doit être planifié pour les 3 groupes d'étudiants" peut être abstrait (partiellement défini) ou concret (entièrement défini).	49
Figure 6 : Exemple de diagramme de <i>Gantt</i> basé sur les tâches (3 tâches).	49
Figure 7 : Exemple de diagramme de <i>Gantt</i> basé sur les machines. 3 ordres de fabrication (ou 3 tâches) sont traités par 2 machines.	50
Figure 8 : Exemple d'un objet sur le diagramme de <i>Gantt</i> (un segment). L'objet permet de rendre visible la satisfaction de la contrainte liée à la durée de traitement de l'opération sur la machine n°1. En revanche, la contrainte concernant la date de livraison n'est pas exprimée directement dans le diagramme de <i>Gantt</i>	50
Figure 9 : Extrait d'une représentation graphique de séquences de tâches réalisées par un ordonnanceur (d'après Crawford, MacCarthy, Wilson, & Vernon, 1999).	75
Figure 10 : Diagramme de décision permettant de représenter les réponses recueillies au cours du questionnaire rétrospectif de décisions (traduit et adapté de Crawford, MacCarthy, Wilson, & Vernon, 1999).	76
Figure 11 : Représentation des espaces problèmes duaux permettant de décrire le niveau tactique dans l'activité d'ordonnancement. Les flèches autour des deux espaces problème représentent des opérations. L'origine des flèches correspond au type d'entité qui joue le rôle de donnée pour l'opération.	81
Figure 12 : Example of Gantt chart: time in abscissa; machines in ordinate; grey rectangles represent three jobs processed by the two machines.	107
Figure 13 : A timetable during the design process. We can observe a concrete object (fully specified) and an abstract object (partly specified).	110
Figure 14 : Constraints management model: dual spaces and set of operations.	112
Figure 15 : Relations between spaces for novices (on the left) and experts (on the right). The arrows' thickness represents a ratio of operations (predicates).	117
Figure 16 : Example of a <i>Gantt</i> chart of 6 Manufacturing Orders (MO) of bicycles on LEKIN®. The due date constraint is not directly expressed in the <i>Gantt</i> chart whereas operation durations are constraints expressed in the solution (objects).	136
Figure 17 : Operations within and between Constraints Space and Objects Space (tactical level of control), after Hoc et al. (in press).	142
Figure 18 : Relations between spaces for novices (on the left) and experts (on the right) for the scheduling stage. The arrows' represents a ratio of operations (predicates).	147
Figure 19 : Relations between spaces for novices (on the left) and experts (on the right) for the rescheduling stage. The arrows' represents a ratio of operations (predicates).	148

- Figure 20** : Vue de la simulation de la chaîne de production utilisée dans l'expérience. Chaque palette circulait sur des rails avant de subir une opération sur l'un des 5 postes. La tâche du participant était d'ordonnancer le poste 2..... 161
- Figure 21** : Outil d'assistance à l'ordonnancement proposant un groupe de palettes, et permettant de consulter les valeurs d'indicateurs pour chaque palette du groupe. Tous les indicateurs ne pouvaient être consultés simultanément. Dans cet exemple, la tâche du participant était de choisir une palette parmi les quatre proposées..... 161
- Figure 22** : Vue localisée autour de la zone du poste 2. A partir de la vue localisée sur cette zone, le participant pouvait donc visualiser des palettes circulant dans cette zone de la chaîne de production. En sélectionnant l'indicateur "Vue complète de l'atelier", il pouvait alors visualiser l'ensemble de la chaîne et donc la localisation de toutes les palettes (figure 21). 164
- Figure 23** : Dans la tâche proposée aux participants, on indiquait que l'atelier était une chaîne d'assemblage d'arbres pour des boîtes de vitesses..... 162
- Figure 24** : Proportion moyenne de solutions bonnes selon la richesse des informations (2 ou 6 indicateurs) et le contrôle mutuel (avec ou sans CM) dans la situation avec risque faible et dans la situation avec risque fort. Les "moustaches" représentent les erreurs types. 170
- Figure 25** : Durée moyenne de prise de décision (secondes) selon la richesse des informations (2 ou 6 indicateurs) et le contrôle mutuel (avec ou sans CM). Les "moustaches" représentent les erreurs types. 170
- Figure 26** : Nombre moyen de valeurs de prises d'information selon la richesse des informations (2 ou 6 indicateurs) et le contrôle mutuel (avec ou sans CM). Les "moustaches" représentent les erreurs types. 171
- Figure 27** : Proportion moyenne des indicateurs consultés dans la condition avec 2 indicateurs et dans la condition avec 6 indicateurs. On rappelle les 6 indicateurs : marge libre séquentielle (Marge), vue complète de l'atelier (Vue), qualité dans le meilleur des cas (Qual-bc), qualité dans le pire des cas (Qual-wc), durée opératoire (Durée), rang dans la gamme et rang actuel (Rang). Les "moustaches" représentent les erreurs types..... 171
- Figure 28** : Effet de la proposition de la machine (condition contrôle mutuel) sur la performance moyenne locale d'ordonnancement (qualité des prises de décision mesurée par une proportion) lorsque l'opérateur propose une solution bonne (SB) - maintien SB ou dégradation SB - ou une solution mauvaise (SM) - amélioration SM ou maintien SM. Les "moustaches" représentent les erreurs types. 172
- Figure 29** : Évolution de l'avis de prise de décision (proportion moyenne) en présence d'une proposition de la machine (condition avec contrôle mutuel). Les "moustaches" représentent les erreurs types..... 174
- Figure 30** : Retard algébrique maximum (Lmax en minutes) moyen selon la richesse des informations (2 ou 6 indicateurs) et le contrôle mutuel (avec ou sans CM) dans la situation avec risque faible et dans la situation avec risque fort. Les "moustaches" représentent les erreurs types 175
- Figure 31** : Durée totale moyenne de mise en œuvre de l'ordonnancement (*Makespan* ou Cmax en minutes) selon la richesse des informations (2 ou 6 indicateurs) et le contrôle mutuel (avec ou sans CM) dans la situation avec risque faible et dans la situation avec risque fort. Les "moustaches" représentent les erreurs types. 176
- Figure 32** : Exemple de SRT externe utilisé par un DPX SEG. En lignes apparaît le nom des agents SEG et en colonnes les jours de la semaine. Les cases du planning représentent l'affectation d'un agent à une tâche ou une indisponibilité (repos, congé, visite médicale, etc.). Il n'existe pas d'homogénéité entre DPX SEG quant à l'utilisation des intitulés et des codes couleurs. 186
- Figure 33** : Interface du logiciel expérimental d'ordonnancement avec le planning des agents SEG (en haut), la liste des opérations à ordonnancer (en bas à gauche), la demande de ressources et l'affichage d'un plan de charge (en bas à droite), et les boutons d'interaction entre le planning des agents SEG et la liste des opérations à ordonnancer (au milieu). 192

Figure 34 : Plateforme expérimentale de l'IUT de Nantes représentant un système de production. Cette plateforme pourrait être le support au développement de micromondes expérimentaux (photo extraite de Cardin, 2007)..... 209

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Dans les deux situations étudiées (conception d'emploi du temps et ordonnancement manufacturier), des points communs et des différences sont apparues dans l'utilisation de certains prédicats du schème de codage.....	93
Table 2 : Excerpt of a coded protocol. The structure of the predicate (the arguments) is specified in italics before the coding (see section 5.4).	111
Table 3 : Results of the inferential analysis (mean percentages on the basis of 359 coded units for novices and 396 for experts, on average). OS: Objects Space.	115
Table 4 : Summary of the Results.....	117
Table 5 : Information about the six experts of the study.	139
Table 6 : Manufacturing order and constraints of the scheduling stage.	140
Table 7 : Information about periods and duration of maintenance for rescheduling stage.	141
Table 8 : Comparison of novices and experts on level of control (first axis) used for scheduling and rescheduling (a positive value means a high level of control and a negative value means a low level of control).....	145
Table 9 : Percentage of all strategic operations and tactical operations during scheduling and rescheduling stage. (\bar{N} is the mean frequency).	145
Table 10 : Proportion of types of goal formulated during scheduling stage (\bar{N} is the mean frequency). On average, novices formulated 4.2 goals and experts formulated 4.7 goals.....	146
Table 11 : Summary of results (percentage). All differences between experts (E) and novices (N) are significant and notable.	150
Tableau 12 : Indicateurs présents dans chaque modalité du facteur I_2 (richesse des informations).....	165
Tableau 13 : Nombre de décisions à prendre en fonction du croisement des modalités du facteur I_2 (richesse des informations) et du facteur R_2 (risque de panne).....	166
Tableau 14 : Différences des proportions moyennes d'indicateurs consultés dans la condition avec 6 indicateurs : Marge (marge libre séquentielle), Vue (vue complète de l'atelier), Qual-bc (qualité dans le meilleur des cas), Qual-wc (qualité dans le pire des cas), Durée (durée opératoire), Rang (rang dans la gamme et rang actuel).	172
Tableau 15 : Relance d'analyse après la proposition de la machine. Ont été distinguées les conditions expérimentales concernées par la relance, le nombre de prises de décision (PD), le nombre de prises d'information (PI), les indicateurs consultés, et l'évolution de la qualité de la première solution de l'opérateur (bonne – SB, ou mauvaise – SM).....	174
Tableau 16 : Résumé des principaux résultats de l'expérience. Le L_{max} (ou <i>Maximum Lateness</i>) est le retard algébrique maximum. Le C_{max} (ou <i>Makespan</i>) est la durée totale de mise en œuvre de l'ordonnancement.	177

RESUME

GESTION DE CONTRAINTES ET EXPERTISE DANS LES STRATEGIES D'ORDONNANCEMENT

Encore très peu de travaux de psychologie se sont penchés sur l'activité d'ordonnancement, par exemple dans la planification des tâches, de l'occupation des personnels et des machines dans des ateliers. Jusqu'alors, les travaux existants dans la littérature ont cherché à décrire les procédures mises en œuvre par les ordonnanceurs. En adoptant le point de vue complémentaire des représentations manipulées, cette thèse a examiné les processus psychologiques impliqués dans cette activité, en termes de gestion de contraintes. Deux situations d'ordonnancement ont été étudiées : la conception d'emploi du temps et l'ordonnancement manufacturier. En comparant l'activité de novices à celle d'experts, nous avons observé que la stratégie experte est de s'appuyer sur les contraintes visibles dans le Système de Représentation et de Traitement externe de la solution au problème d'ordonnancement (emploi du temps ou diagramme de *Gantt*). Ces études nous ont également permis de confirmer la capacité d'abstraction des ordonnanceurs experts. De plus, en choisissant deux cas particuliers d'ordonnancement, nous avons aussi pu comparer leurs similarités et leurs différences. Par ailleurs, à partir d'un travail mené antérieurement à l'IRCCyN dans le domaine de la recherche opérationnelle, nous avons évalué un outil d'assistance à l'ordonnancement. Ce travail pluridisciplinaire nous a permis d'examiner l'effet d'une des modalités de coopération homme-machine (le contrôle mutuel de la machine) sur l'activité de l'ordonnanceur, mais aussi la question de la gestion des risques de panne par les ordonnanceurs.

Mots clefs : Planification, Ordonnancement, Gestion de Contraintes, Contrôle Cognitif, Systèmes de Représentation et de Traitement.

ABSTRACT

CONSTRAINTS MANAGEMENT AND EXPERTISE IN HUMAN SCHEDULING STRATEGIES

Only a few research works in psychology are devoted to scheduling, for example about planning tasks, workers and machines occupation in the shop. In the literature, schedulers are mainly described from the procedural viewpoint. For describing scheduling activity, we adopted the complementary representational viewpoints in terms of constraints management. Two scheduling situations have been studied: timetabling and industrial scheduling. By comparing novices and experts, we observed that the latter used constraints visible on the timetable or on the *Gantt* chart, to solve the scheduling problem. Moreover, experts used a higher level of abstraction than novices in the control of processing. Finally, we highlighted the similarities and differences between industrial scheduling and timetabling. In addition, we conducted a multidisciplinary study from a previous work in the field of operational research by evaluating a scheduling tool. We investigated the effect of the mutual control modality on human scheduling decisions, and the management of breakdowns risks in a shop by schedulers.

Keywords: Planning, Scheduling, Constraints Management, Cognitive Control, Representation and Processing Systems.