

LABORATOIRE



INFORMATIQUE, SIGNAUX ET SYSTÈMES
DE SOPHIA ANTIPOLIS
UMR 6070

MODÉLISATION ET OPTIMISATION DES PROCESSUS DE PRODUCTION

Yves Callejas, Jean-Louis Cavarero, Martine Collard

Projet EXECO

Rapport de recherche
ISRN I3S/RR-2004-28-FR

Octobre 2004

RÉSUMÉ :

L'optimisation des processus de production d'une entreprise est une tâche complexe. L'enjeu est double : il s'agit d'améliorer la productivité et la qualité. La démarche qualité présentée dans cet article est composée de quatre étapes : une étape de modélisation préalable (qui permet de décrire le processus à optimiser de manière très rigoureuse), une étape d'optimisation conceptuelle (qui s'appuie sur des outils d'évaluation et de simulation) pour améliorer la structure du processus (le rendre plus cohérent, le normaliser), une étape d'optimisation opérationnelle qui a pour objectif d'améliorer le fonctionnement du processus (le rendre plus performant) en affectant au mieux les ressources disponibles et enfin une optimisation multi-processus. L'optimisation conceptuelle correspond en fait à une optimisation statique (indépendante des ressources) alors que l'optimisation opérationnelle est une optimisation dynamique. La démarche présentée est le résultat de travaux de recherche effectués depuis trois ans dans les Caisses d'Allocation Familiales.

MOTS CLÉS :

modélisation de processus, approche conceptuelle, optimisation

ABSTRACT:

KEY WORDS :

process modelling, conceptual approach, optimization

MODELISATION ET OPTIMISATION DES PROCESSUS DE PRODUCTION

Yves Callejas, Jean Louis Cavarero, Martine Collard, *Université de Nice-Sophia Antipolis, Laboratoire I3S, 2000, route des lucioles, 06903 Sophia Antipolis cedex, France*

Résumé : L'optimisation des processus de production d'une entreprise est une tâche complexe. L'enjeu est double: il s'agit d'améliorer la productivité et la qualité. La démarche qualité présentée dans cet article est composée de quatre étapes: une étape de modélisation préalable (qui permet de décrire le processus à optimiser de manière très rigoureuse), une étape d'optimisation conceptuelle (qui s'appuie sur des outils d'évaluation et de simulation) pour améliorer la structure du processus (le rendre plus cohérent, le normaliser), une étape d'optimisation opérationnelle qui a pour objectif d'améliorer le fonctionnement du processus (le rendre plus performant) en affectant au mieux les ressources disponibles et enfin une optimisation multi-processus. L'optimisation conceptuelle correspond en fait à une optimisation statique (indépendante des ressources) alors que l'optimisation opérationnelle est une optimisation dynamique. La démarche présentée est le résultat de travaux de recherche effectués depuis trois ans dans les Caisses d'Allocation Familiales (CAF).

MOTS CLES: Processus de production, qualité, modélisation, évaluation, simulation, optimisation, programmation linéaire et non linéaire, diagrammes d'activités, affectation de ressources.

I. INTRODUCTION

L'optimisation des processus de production est l'un des problèmes majeurs de toute entreprise. L'objectif recherché est double: il s'agit d'améliorer la **qualité des processus** et d'améliorer leur **productivité** en augmentant le volume des flux traités et/ou en diminuant les ressources nécessaires. La ré-ingénierie des processus de production est étudiée depuis quelques années [7] et la plupart des outils de ré-ingénierie reposent sur des techniques graphiques informelles. Des travaux récents ont utilisé des techniques du domaine de l'intelligence artificielle (IA) pour la gestion des processus [4, 8] par exemple pour la définition d'ontologies, la planification et les systèmes multi-agents. Dans le cas de la planification, la stratégie la plus courante consiste à atteindre l'objectif plutôt que de rechercher la meilleure solution. Cependant, les travaux de [5, 9] recherchent un optimum en fonction de critères prédéfinis et [2] propose une technique visant à améliorer l'exécution du processus.

D'autres travaux [1, 3, 6] ont recours à des techniques d'apprentissage. L'approche présentée dans cet article est basée sur une modélisation préalable et comporte quatre grandes étapes: la **modélisation** qui permet la représentation des processus à optimiser à l'aide d'un modèle ce qui induit une optimisation plus rigoureuse et plus cohérente, l'**optimisation « conceptuelle »** qui ne tient pas compte des ressources (c'est une optimisation structurelle et statique), l'**optimisation « opérationnelle »** qui consiste à optimiser le fonctionnement du processus en tenant compte des ressources, **c'est-à-dire en les affectant au mieux dans le temps** (c'est une optimisation des performances, donc dynamique) et l'**optimisation multi-processus** qui permet d'optimiser (opérationnellement) plusieurs processus simultanément.

II. LA MODELISATION

Les quatre concepts de base retenus sont: **activité, flux, ressource et compétence.**

- LES ACTIVITES : Une activité est une tâche (ou opération) d'un processus. Une activité peut être: obligatoire ou optionnelle, et désactivable ou non. Une activité obligatoire est une activité qui doit être utilisée systématiquement, elle est indispensable au bon fonctionnement du processus. Une activité optionnelle est une activité qui peut ne pas être utilisée (selon les options retenues). Une activité désactivable est une activité qui, lors de l'exécution du processus peut ne pas être utilisée en raison d'une indisponibilité des ressources qui traitent ce processus.

- LES FLUX : Un flux est un ensemble d'éléments homogènes circulant dans le processus et traités par les activités.

- LES RESSOURCES et LES COMPETENCES : Les notions de ressource et de compétence sont inter-dépendantes: une ressource représente un groupe de personnes ayant le même ensemble de compétences. Une ressource est donc caractérisée par une ou plusieurs compétences; une même compétence est associée à une ou à plusieurs ressources. Par hypothèse, toute activité est mono-compétence. Dans un processus, on appelle couloir (ou swim lane), l'ensemble des activités nécessitant la même compétence.

Le modèle retenu s'inspire directement des diagrammes d'activités UML. Les diagrammes de

processus doivent vérifier un certain nombre de contraintes (contraintes qui découlent des normes imposées par le modèle). Ainsi, à titre d'exemple: tous les flux E/S d'une activité optionnelle sont optionnels, une activité obligatoire possède au moins un flux obligatoire (en trait plein) en entrée et en sortie, les fourches sont seulement du type 1-n ou n-n et les jonctions sont seulement du type n-1 ou n-n (pas de n-m), etc. Pour créer ces diagrammes d'activités, le logiciel DESCRIBE a été retenu. A titre d'exemple, est présenté ci-après (Fig. 1), un diagramme de processus d'une CAF.

III. L'OPTIMISATION CONCEPTUELLE

La modélisation permet de **représenter** le processus à optimiser pour **l'évaluer** afin de **l'optimiser** en connaissance de cause, c'est à dire selon des axes précis qui tiennent compte de sa structure et de ses défauts.

La phase d'évaluation permet de recueillir toutes les informations qui seront utiles pour améliorer la structure du processus. Ces informations sont contenues dans les **indicateurs** et dans le **graphe d'objectifs**. Certaines d'entre elles sont fournies

par la simulation. Les indicateurs permettent d'évaluer un processus. Ils sont de deux types : les indicateurs modèles et les indicateurs processus.

- Les **indicateurs modèles** correspondent aux indicateurs qui permettent d'évaluer la cohérence d'un diagramme de processus. Ils sont indispensables car ils permettent de contrôler que le diagramme construit satisfait les contraintes de base du modèle (et que l'optimisation ne débouche pas sur un diagramme trop complexe, non valide ou mal formé). **Exemples d'indicateurs modèles**: nombre maximum de flux entrants dans une activité, nombre d'activités optionnelles / nombre d'activités, nombre d'activités désactivables / nombre d'activités, nombre de circuits, nombre cyclomatique (nombre d'arcs – nombre de nœuds + 2), densité (nombre d'arcs / nombre maximum d'arcs possibles), etc.

- Les **indicateurs processus** permettent d'évaluer les performances et les dysfonctionnements des activités d'un processus. Leur connaissance et leur évaluation sont utiles pour déterminer les **priorités d'optimisation**.

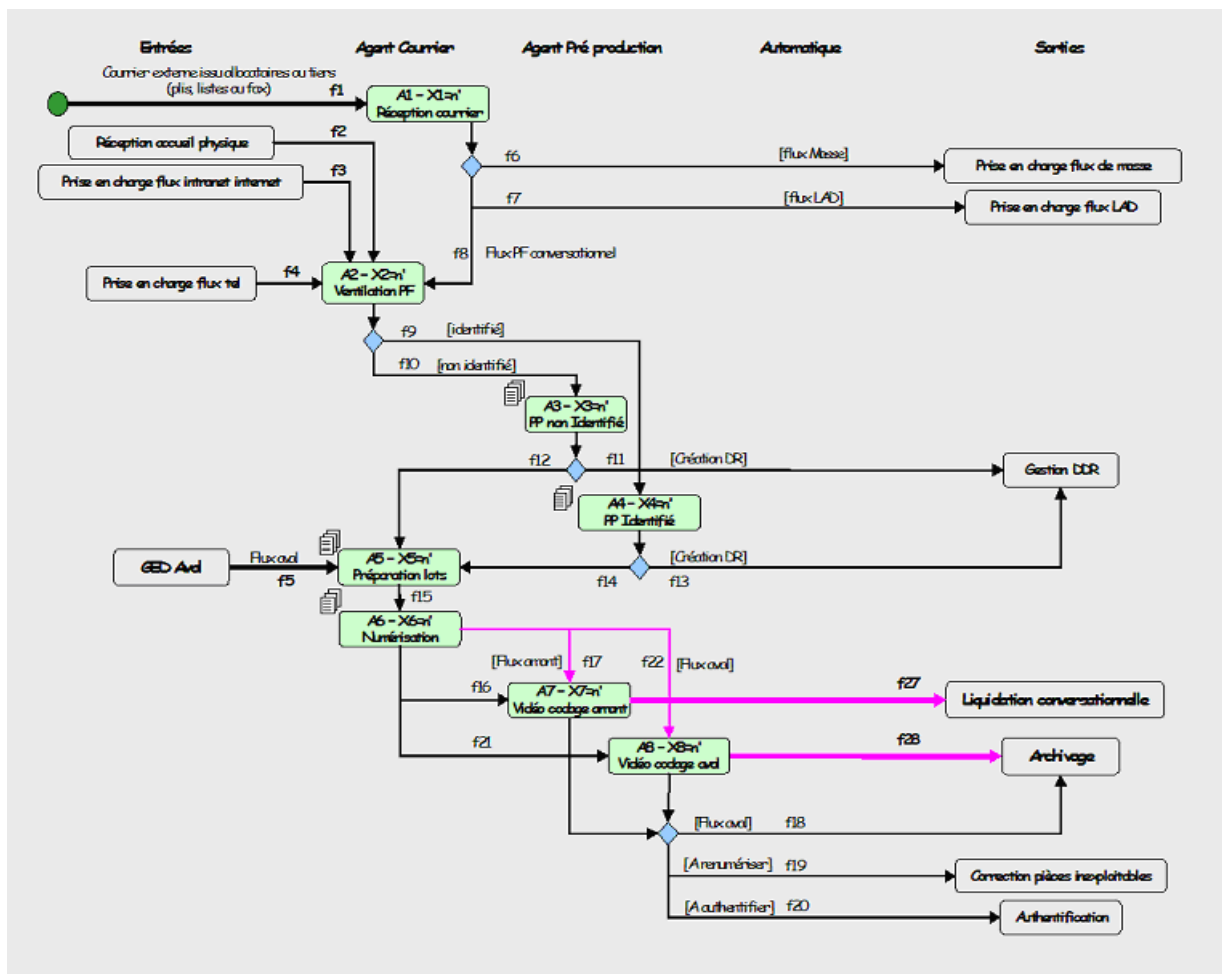


FIG. 1 EXEMPLE DE DIAGRAMME DE PROCESSUS

NOEUDS DU GRAPHE	INDICATEURS	FORMAT	OBTENTION
AUGMENTER LA LISIBILITE DES DOCUMENTS	I1 : INDICE DE SATISFACTION PAR DOCUMENT	VECTEUR	OBSERVATION
DIMINUER LES TAUX DE REJET	I2 : % DE REJET PAR ACTIVITE	VECTEUR	SIMULATION
DEMATERIALISER	I3 : % DEMATERIALISATION	NB	OBSERVATION

FIG. 2 EXEMPLES D'INDICATEURS PROCESSUS

Voici, à titre d'exemple (Fig. 2), 3 indicateurs processus possibles d'un processus CAF. Il est nécessaire de hiérarchiser les objectifs d'optimisation et d'identifier précisément ceux qui se comportent comme des moyens vis à vis des autres. Pour ce faire, nous proposons de construire un "**graphe d'objectifs hiérarchisé**" (GOH). Si le graphe est construit correctement (et complet) toutes les **feuilles du graphe** seront les actions à effectuer pour optimiser le processus. Concrètement le graphe est construit en associant (si possible) à chaque nœud (objectif) des indicateurs, dont les valeurs seront fournies par les phases d'évaluation / simulation (dans l'exemple I1, I2 et I3). Les arcs de ce graphe sont valués (en pourcentage) pour fournir le poids de la satisfaction d'un objectif vis à vis d'un autre (de niveau supérieur) afin de guider l'optimisation. A titre d'exemple, est présenté ci-après (Fig. 3), un graphe d'objectifs.

La **simulation** est une phase qui permet d'étudier le fonctionnement et le comportement du processus afin de trouver une partie des améliorations possibles (ajouts ou suppressions d'activités et/ou de flux, détection de cycles indésirables, détection de points de congestion, etc). Elle nécessite, bien évidemment, l'utilisation d'un outil (le logiciel SIMPROCESS a été retenu). La simulation permet aussi de connaître certaines valeurs d'indicateurs, comme par exemple le taux de rejet d'une activité.

L'analyse des informations fournies par l'évaluation, la simulation et le graphe permet l'optimisation conceptuelle du processus. Il s'agit de construire le meilleur processus possible (respect des normes, des indicateurs, des objectifs). C'est une étape difficile qui nécessite la prise en compte simultanée d'un grand nombre d'informations et un grand savoir faire.

L'analyse des informations fournies par l'évaluation, la simulation et le graphe permet l'optimisation conceptuelle du processus. Il s'agit de construire le meilleur processus possible (respect des normes, des indicateurs, des objectifs). C'est une étape difficile qui nécessite la prise en compte simultanée d'un grand nombre d'informations et un grand savoir faire.

Ainsi par exemple, la connaissance de certains indicateurs modèles impliquera la création ou la suppression d'activités et/ou de flux, la connaissance de certains indicateurs processus

engendrera la création de nouveaux chemins dans le diagramme (validation ou suppression d'activités optionnelles) ou la conception de nouveaux documents, la connaissance du graphe d'objectifs permettra d'identifier les parties du processus qui doivent être optimisées en priorité, etc.

L'optimisation conceptuelle est donc totalement guidée par le graphe d'objectifs: les poids permettent de trouver les priorités d'optimisation et les valeurs d'indicateurs (sur les noeuds) permettent de connaître les marges d'amélioration: il faut bien entendu s'intéresser prioritairement aux branches du graphe qui possèdent un poids élevé et des valeurs d'indicateurs facilement améliorables. Dans l'exemple étudié (Fig. 3), on peut ainsi décider de donner la priorité à l'objectif O12 si les valeurs de I2 sont inquiétantes et si le poids de cet objectif ($p_{12} \cdot p_1$) vis-à-vis de l'objectif racine est fort. Dans ce cas, il faudra (d'après le graphe), effectuer les actions A2 et A3. Concrètement, l'optimisation conceptuelle d'un processus est réalisée par une série d'améliorations (définies dans les feuilles du graphe) effectuées sur son diagramme.

Exemples d'actions : ajout d'une nouvelle activité, automatisation partielle d'une activité, éclatement d'une activité (en 2 ou plusieurs), ajout d'un nouveau flux, ajout d'une nouvelle compétence, changement de l'activité destinatrice d'un flux.

I. L'OPTIMISATION OPERATIONNELLE

Cette phase consiste à affecter à chaque activité du processus, les ressources et les compétences, en optimisant cette affectation, dans le but de maximiser les flux traités (en tenant compte de différentes hypothèses de fonctionnement dégradé, absentéisme par exemple, ou en faisant des hypothèses sur les stocks non traités).

Cette seconde phase fait apparaître deux problèmes distincts :

Problème 1 : Optimisation des flux sortants (par une affectation optimisée des ressources et des compétences associées sur les activités) (**optimisation linéaire**).

Problème 2 : Répartition des ressources et des compétences (sur chaque activité) **dans le temps** (**optimisation non linéaire**).

Exemple : Soit un processus à optimiser (Fig. 4) composé de 8 activités et de 9 ressources. Soient f_p le nombre d'occurrences du flux p traitées sur la

période et w_{jk} le temps d'utilisation de la ressource R_j pour sa compétence C_k (par période).

Le problème 1 consiste à répartir les ressources et les compétences sur les activités (en fournissant les valeurs optimales des f_p et w_{jk}) (qui fait quoi ?). Le système d'équations à résoudre est indiqué ci-dessous; il exprime les conditions d'utilisation des compétences.

Compétence C1 : $T1*f3 + T3*f9 = w21 + w41 + w91$, Compétence C2 : $T2*f6 + T5*(f4+f5) + T7*f10 = w12 + w22 + w62 + w72 + w82$, Compétence C3 : $T6*f8 = w33 + w63$, Compétence C4 : $T4*f7 + T8*f11 = w44 + w54$.

La résolution du système d'équations doit également prendre en compte 2 types de contraintes :

Contraintes de disponibilité des ressources : pour chaque ressource, le temps total d'utilisation de la ressource sur chaque période ne doit pas dépasser le temps de disponibilité de cette ressource sur la période. Nous avons donc 9 contraintes de ce type, ainsi par exemple : Ressource R1 : $w12 \leq TR1$, Ressource R2 : $w21 + w22 \leq TR2$.

Contraintes d'écoulement des flux : Les flux entrants et sortants peuvent être multiples. Pour exprimer que le flux entrant $f2$ est d'environ 60% du flux total entrant ($f1+f2$), nous écrivons une contrainte sur le flux traité provenant de $f1$ et le flux traité provenant de $f2$, ainsi : $f2 \geq 1.4 * f1$ et $f2 \leq 1.6 * f1$.

Pour chaque activité, la somme des flux sortants doit être inférieure à la somme des flux entrants : $f11 \leq f9 + f10$, $f9 \leq f6$, $f6 \leq f3$, $f3 \leq f1$, $f10 \leq f7 + f8$, $f7 \leq f4$, $f8 \leq f5$, $f4 + f5 \leq f2$

Le logiciel fournit les valeurs des f_p et des w_{jk} qui optimisent les flux sortants (Cf. tableaux 6 et 7).

Le problème 2 consiste à fournir, en plus, une répartition **dans le temps** des ressources par activité (qui fait quoi et **quand** ?). Pour cela, nous découpons la période de référence en 10 créneaux horaires de même durée D.

La résolution du système d'équations doit prendre en compte 3 types de contraintes :

Contraintes d'exclusivité d'utilisation des compétences pour une ressource: Pour chaque ressource à compétences multiples, au plus une des compétences est utilisée pour chaque créneau horaire. Nous avons neuf ressources et dix créneaux. Nous avons donc 90 contraintes de ce type.

Contraintes d'utilisation des ressources dans les activités: Il s'agit de contraintes d'égalité. Pour chaque créneau horaire et pour chaque compétence, on doit avoir l'égalité entre les affectations de cette compétence aux activités et l'utilisation de cette compétence parmi les ressources. Dans l'exemple, il y a quatre compétences et dix créneaux soit 40 contraintes de ce type.

Contraintes d'évolution des flux après chaque créneau horaire: Après chaque créneau horaire, les flux évoluent en fonction des ressources affectées aux activités et des flux disponibles au créneau précédent.

Le logiciel fournit les valeurs qui optimisent la répartition des ressources et des compétences par créneau horaire et les flux associés (Fig. 8). Le logiciel PREMIUM SOLVER a été utilisé pour résoudre ce problème.

II. L'OPTIMISATION MULTI-PROCESSUS

L'optimisation multi-processus consiste à optimiser simultanément plusieurs processus. Cela ne concerne évidemment pas l'optimisation conceptuelle (qui est par définition propre à chaque processus) mais uniquement l'optimisation opérationnelle lorsque les ressources et les compétences sont **partagées** par plusieurs processus. Il faut dans ce cas définir :

1/ des priorités entre les différents processus et les objectifs associés.

2/ des contraintes sur les différentes ressources et compétences qui seront affectées aux processus et aux activités.

Pour le point 1, les priorités seront classées en ordre décroissant (exemple : processus P1, objectif obtenir en sortie 90% des flux entrants, processus P3, objectif obtenir en sortie 75% des flux entrants, etc). Pour le point 2, les contraintes seront également classées en ordre décroissant. Ces contraintes sont de 2 types : affecter une quantité maximum Q de la ressource R ou de la compétence C sur le processus P ou l'activité A (exemple affecter 20 unités max de R2 sur A7) ou affecter en priorité la ressource R ou la compétence C sur le processus P ou l'activité A (exemple : la compétence C4 est affectée en priorité sur P2). Les priorités et les contraintes étant définies, on peut alors lancer l'exécution du solveur (1 à N fois) en supprimant une à une les contraintes (à partir du bas de la hiérarchie) tant que les objectifs ne sont pas satisfaits.

L'optimisation multi-processus est donc une généralisation de l'optimisation opérationnelle, et pouvant impliquer plusieurs exécutions successives. Elle permet un pilotage global et complet de l'ensemble des processus de l'entreprise.

Le tableau de la Fig. 8 indique les nombres d'affectation de la compétence k associée à l'activité i sur le créneau t.

III. CONCLUSION

L'originalité de la démarche réside dans le fait qu'elle sépare distinctement les problèmes relatifs à la modélisation de ceux relatifs à l'optimisation et qu'elle propose **2 types d'optimisation**: la première conceptuelle (et logique) indépendante des ressources, la seconde

opérationnelle (et physique) basée sur l'affectation des ressources. L'avantage de cette double optimisation est **d'améliorer la qualité des processus** mais aussi de permettre une plus grande maîtrise de leur évolution: lors de l'apparition de nouveaux besoins on ne repart pas systématiquement du début. **L'optimisation conceptuelle** permet de construire le meilleur processus possible vis à vis des normes, des indicateurs et des priorités d'objectifs. **L'optimisation opérationnelle** a pour objectif d'optimiser le fonctionnement du processus, par la prise en compte des ressources et des compétences.

Cette démarche a été validée sur des processus administratifs. Elle s'applique également aux processus industriels à condition de prendre en compte, lors de l'optimisation opérationnelle (grâce à des outils spécifiques complémentaires), le problème des pannes et des entretiens de machines (problème qui n'a pas été abordé ici). Parmi les perspectives de recherche les plus intéressantes, nous envisageons d'introduire des techniques de fouille de données dans la phase d'optimisation conceptuelle pour améliorer l'efficacité des règles d'optimisation.

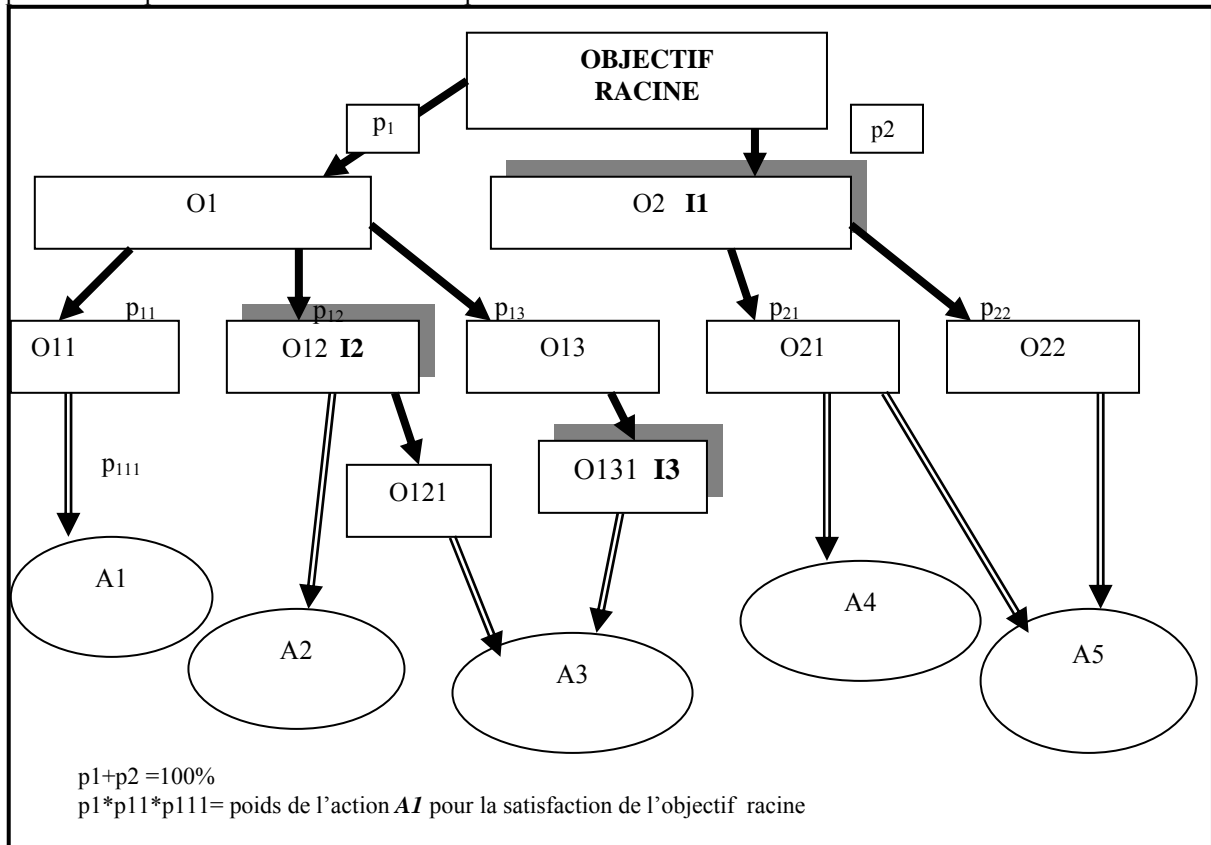


FIG. 3 GRAPHE D'OBJECTIFS

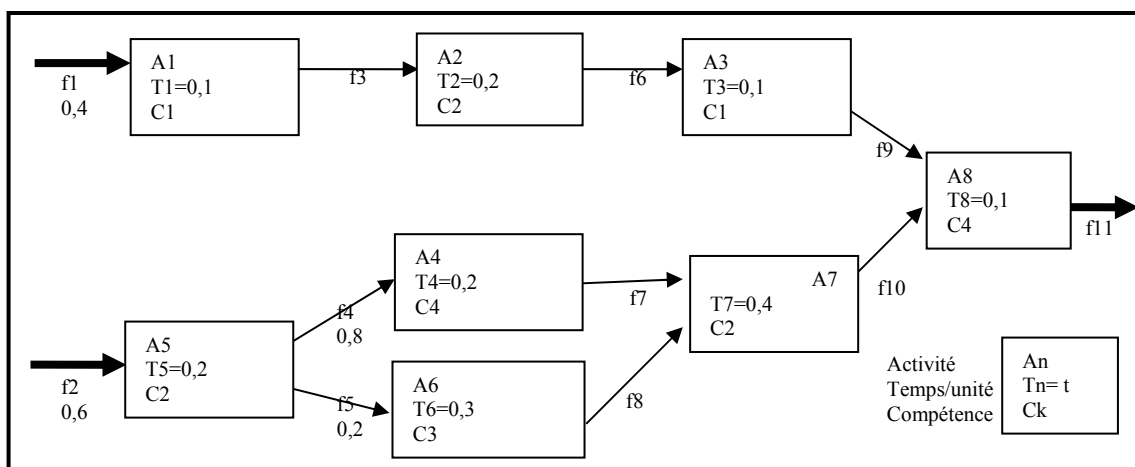


FIG. 4: DIAGRAMME DU PROCESSUS À OPTIMISER OPÉRATIONNELLEMENT

RESSOURCE	COMPETENCE	DISPONIBILITE/PERIODE
R1	C2	TR1=35
R2	C1, C2	TR2=35
R3	C3	TR3=35
R4	C1, C4	TR4=35
R5	C4	TR5=35
R6	C2, C3	TR6=35
R7	C2	TR7=35
R8	C2	TR8=17.5
R9	C1	TR9=17.5

FIG. 5 : TABLEAU DE CORRESPONDANCE RESSOURCES/COMPETENCES

RESSOURCE		$\sum_k w_{jk}$	TEMPS DISPONIBLE
R1	w12 : 28	28	7
R2	w21 : 10.5 w22 : 21	31.5	3.5
R3	w33 : 17.5	17.5	17.5
R4	w41 : 3.5 w44 : 31.5	35	0
R5	w54 : 21	21	14
R6	w62 : 28 w63 : 3.5	31.5	3.5
R7	w72 : 31.5	31.5	3.5
R8	w82 : 17.5	17.5	0
R9	w91 : 17.5	17.5	0

FIG. 6 : TABLEAU RÉSULTAT DES TEMPS D'UTILISATION DES COMPÉTENCES

Flux entrés f1	95
Flux entrés f2	176
Stocks	123
Total (entrés + stocks)	394
Flux sortis (f11)	280

FIG. 7 : BILAN DES FLUX

ACTIVITE	Cr1	Cr2	Cr3	Cr4	Cr5	Cr6	Cr7	Cr8	Cr9	Cr10	COMPETENCE
A1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	C1
A2	0	1	0	0	0	1	3	1	0	0	C2
A3	0	0	0	0	1	1	0	2	2	0	C1
A4	0	1	1	1	1	2	1	0	0	0	C4
A5	3	3	5	0	0	0	0	0	0	0	C2
A6	0	0	1	2	1	1	0	1	0	0	C3
A7	0	0	0	4	5	3	1	3	3	0	C2
A8	0	0	0	0	1	0	1	2	2	2	C4

FIG. 8: TABLEAU RÉSULTAT DE L'AFFECTION DES COMPÉTENCES AUX ACTIVITÉS PAR CRÉNEAU

REFERENCES

- [1] Ricardo Aler, Daniel Borrajo, and Pedro Isasi. Using genetic programming to learn and improve control knowledge. *Artificial Intelligence*, 141(1-2):29–56, October 2002.
- [2] Jose Luis Ambite and Craig A. Knoblock. Planning by rewriting. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 15:207–261, 2001.
- [3] Daniel Borrajo, Sira Vegas, and Manuela Veloso. Quality based learning for planning. In *Working notes of the IJCAI'01 Workshop on Planning with Resources*, pages 9–17, Seattle, WA (USA), August 2001. IJCAI Press.
- [4] Brian Drabble, Jana Koehler, and Ioannis Refanidis editors. *Proceedings of the AIPS-02 Workshop on Planning and Scheduling with Multiple Criteria*, Toulouse (France), April 2002.
- [5] Patrick Haslum and Hector Geffner. Admissible heuristics for optimal planning. In *Proceedings of the Fifth International Conference on AI Planning Systems (AIPS-2000)*, pages 70–82, 2000.
- [6] Masahiko Iwamoto. A planner with quality goal and its speedup learning for optimization problem. In K. Hammond, editor, *Proceedings of the Second International Conference on Artificial Intelligence Planning Systems (AIPS94)*, pages 281–286, Chicago, Illinois, June 1994.
- [7] Jonkers, H., P. Boekhoudt, M. Rougoor and E. Wierstra, (1999), Completion time and critical path analysis for the optimisation of business process models, in M.S. Obaidat, A. Nisanci and B. Sadoun (eds.), *Proc. of the 1999 Summer Computer, Simulation Conference*, Chicago, IL, USA, July 1999, pp. 222-229.
- [8] Alexander Nareyek, editor. *Working notes of the IJCAI'01 Workshop on Planning with Resources*, Seattle, WA (USA), August 2001. IJCAI Press.
- [9] Mike Williamson and Steve Hanks. Optimal planning with a goal-directed utility model. In K. Hammond, editor, *Proceedings of the Second International Conference on Artificial Intelligence Planning Systems (AIPS94)*, pages 176–181, Chicago, Illinois, 1994