



**HAL**  
open science

# outil d'aide à la décision pour la régulation en temps réel du trafic ferroviaire dans une usine sidérurgique

Clarisse Toupet

## ► To cite this version:

Clarisse Toupet. outil d'aide à la décision pour la régulation en temps réel du trafic ferroviaire dans une usine sidérurgique. Automatique / Robotique. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2004. Français. NNT : . tel-00170061

**HAL Id: tel-00170061**

**<https://theses.hal.science/tel-00170061>**

Submitted on 6 Sep 2007

**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.

**INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE**

*N° attribué par la bibliothèque*

\_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

**T H E S E**

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'INPG**

**Spécialité : « AUTOMATIQUE PRODUCTIVE »**

préparée au laboratoire d'Automatique de Grenoble  
dans le cadre de l'**Ecole Doctorale « Electronique, Electrotechnique, Automatique,  
Télécommunication, Signal »**

présentée et soutenue publiquement

par

Clarisse TOUPET

le 15 Novembre 2004

**Titre :**

**OUTIL D'AIDE A LA DECISION POUR LA REGULATION EN TEMPS  
REEL DU TRAFIC FERROVIAIRE DANS UNE USINE SIDERURGIQUE**

***Directeur de thèse :***

Mireille JACOMINO

**JURY**

M. Yannick FREIN  
M. Jean-Pierre CAMPAGNE  
M. André THOMAS  
M. Mireille JACOMINO  
M. Frédéric ASTOLFI  
M. Marie-Laure ESPINOUSE

Président  
Rapporteur  
Rapporteur  
Directeur de thèse  
Co-encadrant  
Examinateur

OUTIL D'AIDE A LA DECISION POUR LA REGULATION EN TEMPS REEL DU TRAFIC FERROVIAIRE DANS UNE USINE SIDERURGIQUE

**RESUME**

Nous présentons dans cette thèse, un outil d'aide à la décision pour la régulation du trafic ferroviaire dans une usine sidérurgique. La particularité de ce système est qu'il repose sur une utilisation en temps réel, et qu'il est soumis à des contraintes spécifiques liées au processus de fabrication de l'acier. Nous décrivons ses spécificités et son rapprochement avec le problème de tournées de véhicules avec fenêtres de temps. La méthode de résolution que nous avons mise en oeuvre repose sur la coopération d'une heuristique de construction parallèle des tournées avec une heuristique d'amélioration des tournées. Les applications aux cas réels que nous avons menées montrent une amélioration de la satisfaction client en terme de nombre de retards et de durée totale des retards. La mise en oeuvre dans un site industriel est également présentée dans ce mémoire.

**MOTS CLES**

Aide à la décision, Problème de Tournées de Véhicules, Ordonnancement

**ABSTRACT**

We introduce in this thesis, an implement of a decision support for the regularity of railway traffic in an iron and steel industry. The specificity of this system is that it is based on the use of real time application and that it is submitted to specific constrained bined to the process of manufacture of steel. We describe its specificity and its link with the vehicle routing problem with time windows. The solving procedure that we have carried out is based on the cooperation of a parallel tour construction algorithm with a heuristic of improvement tour. The application to actual cases that we have achieved indicate an improvement of the customer satisfaction in terms of number of delay and total duration of delays. Its implementation on an industrial site is also presented in this memory.

**WORDS KEY**

Decision Support, Vehicle routing problem, Scheduling

## Remerciements

*J'apprécie tout particulièrement cette dernière partie de la thèse ... celle des remerciements ... celle qui tourne la page à trois années enrichissantes, intenses, et inoubliables.*

*Ecrire une thèse est un investissement long et souvent difficile, mais qui me paraît avant tout, être une œuvre collective. Je n'aurai jamais pu réaliser ce travail sans le soutien d'un grand nombre de personnes dont la patience, la générosité, la bonne humeur et l'intérêt manifestés à l'égard de ma recherche m'ont permis de progresser dans cette phase délicate de « l'apprenti chercheur ».*

*En premier lieu, je tiens à remercier ma directrice de thèse, Madame Mireille JACOMINO, pour la confiance qu'elle m'a accordée en acceptant d'encadrer ce travail, pour ses multiples conseils et son attention permanente sur l'évolution de mes travaux. Merci aussi pour toutes les relectures, suggestions et commentaires, qui m'ont permis d'améliorer la qualité de ce mémoire. Enfin, j'ai été extrêmement sensible à ses qualités humaines d'écoute et d'encouragement qui ont joué un rôle important dans les périodes de crises « thésardiques », et dans les moments sensibles de ce projet.*

*Mes remerciements sont tout autant dédiés, à Monsieur Frédéric ASTOLFI, qui est à l'initiative de cette collaboration et de ce sujet de recherche. Je le remercie de m'avoir étroitement encadré dès les prémices de cette thèse et de m'avoir introduite dans le Monde de la Sidérurgie. Je lui suis très reconnaissante de m'avoir toujours soutenu et d'avoir conservé un regard critique, mais ô combien constructif sur notre travail, malgré son changement de fonctions au cours de la deuxième année. Je retiendrai de cette aventure, un enthousiasme extraordinaire et un foisonnement d'idées inégalable, qui ont très largement contribué à la qualité de ce travail. N'oublie pas de nous ramener lors de ta prochaine expédition dans les cavités souterraines de la dent de Crolles un peu de vent frais du Ch Nord.*

*Je souhaite exprimer toute ma gratitude envers les membres du jury qui ont bien voulu consacrer à ma thèse une partie de leur temps : Merci à Yannick FREIN d'avoir présidé ce jury, à Jean Pierre CAMPAGNE et André THOMAS d'avoir accepté la lourde tâche de référer cette thèse.*

*Je souhaite remercier plus particulièrement Mademoiselle Marie Laure ESPINOUSE, qui a toujours su trouver, avec un accueil des plus chaleureux, la disponibilité nécessaire à chaque sollicitation de son aide (et ô combien nombreuses!). Je la remercie aussi, pour son respect sans faille des délais serrés de relecture des documents que je lui ai adressés.*

*Je souhaite également exprimer ma gratitude à la société ARCELOR, en la personne de Monsieur Jean Luc AUTE, pour l'intérêt dont il a fait preuve envers ma recherche, les moyens qu'il a mis en œuvre pour me donner accès au terrain, ainsi que son accueil enthousiaste à chaque fois que je l'ai rencontré. Je n'oublierai pas nos présentations atypiques devant les auditeurs japonais TPM, et je lui suis très reconnaissante d'assurer maintenant la pérennité de notre travail, baptisé SOFFI, en mémoire de mon passage féminin au service Mouvement.*

## Remerciements

---

*Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance à l'ensemble des dispatchers, pour la très bonne ambiance que j'ai toujours trouvée à leur côté et pour leur implication dans l'évolution de ce projet.*

*Je souhaite également remercier Monsieur Jean Luc CAREYE, responsable du service Mouvement, et l'ensemble des personnes du projet flux Brames, qui ont soutenu SOFFI et qui nous ont donné l'opportunité de l'industrialiser.*

*Ces remerciements seraient incomplets, si je n'en adressais pas, à l'ensemble des techniciens du service des Etudes Industrielles. Merci à Franck CALBET pour toute l'amitié qu'il m'a offerte, le goût de la photographie (et ses multiples essais de couchers de soleil ...), les longues discussions sur Harry lors des pauses cafés, et le dictionnaire des expressions grenobloises qu'il a tenté d'écrire : tu t'en ai vu !! Merci à Christophe LOONÈS pour m'avoir appris les tableaux croisés dynamiques ... et toutes les astuces en tous genres liées à l'informatique, et félicitation pour le challenge que tu as réussi lors de ces trois ans : plus de 2700 victoires Free Cell ... Enfin, merci à Christian FIORELLI pour sa visite exemplaire de la cokerie, pour avoir communiqué sa passion des trains et ses blagues sur « Femmes » (je me demande toujours si ce sont des blagues d'ailleurs .... !!)*

*Je ne pourrai pas oublier les amis que j'ai rencontré à Dunkerque : Flap, Florence, Abdel, Boy's Band, Jean-Pierre, François, Gaëlle, et le petit dernier venu Aubin. J'ai découvert grâce à eux la plongée sous marine en mer du Nord sous un œil magique et je n'ai pu résister à cette passion ... J'ai trouvé auprès d'eux une amitié qui restera très longtemps gravé dans ma mémoire. Je n'oublierai jamais cette soirée homard et araignées de mer grillés au barbecue grâce à nos deux François hors pair, cette journée pêche et ses anémones comestibles ... mais surtout les carnavales, remplis de couleurs, de bonne humeur, ... et de harengs, et qui resteront des moments de fêtes inégalables. Promis, je reviens vous voir très bientôt ... j'vous dis quoi les tchoubiloutes !!!*

*J'adresse un grand merci à Caro, qui a partagé les bancs de la fac à mes côtés, pour son exceptionnelle amitié qui s'est trouvée renforcé grâce à la distance géographique qui s'est imposée entre nous.*

*Je finirai avec les personnes les plus proches de mon cœur ...*

*Je remercie énormément mes parents et mon petit frère pour l'amour et la tendresse qu'ils m'ont témoigné pendant toute cette période, l'éloignement nous a quelque part tous rapprochés !!*

*Une pensée particulière à Véro, qui a ouvert la voie du doctorat dans la famille, et qui a revécue quelques moments de cette thèse à mes côtés. Je lui adresse dans cette période difficile qu'elle traverse, beaucoup de bonheur et de merveilleux jours.*

*Enfin, j'adresse mille mercis à Palou qui a supporté, voire même subi, avec le plus de dextérité possible, toutes les phases heureuses et délicates de cette thèse.*

*Un grand merci pour tout et cette thèse leurs est dédiée.*

## *Table des matières*

---

<b>CHAPITRE 1</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>7</b>
1 - 1	PRESENTATION DE LA SOCIETE	9
1 - 2	PROBLEMATIQUE INDUSTRIELLE	21
1 - 3	LE SERVICE DES ETUDES INDUSTRIELLES	23
<b>CHAPITRE 2</b>	<b>ANALYSE DE L'EXISTANT</b>	<b>27</b>
2 - 1	LE SERVICE MOUVEMENT	29
2 - 2	DESCRIPTION DETAILLEE DE L'ACTIVITE FERROVIAIRE	29
2 - 3	PRESENTATION DES CONCEPTS	32
2 - 4	LE DISPATCHER	37
<b>CHAPITRE 3</b>	<b>GESTION DU TRANSPORT FERROVIAIRE ET TOURNEES DE VEHICULES</b>	<b>41</b>
3 - 1	CARACTERISTIQUES DU SYSTEME D'AIDE A LA DECISION	43
3 - 2	PRESENTATION DES RESEAUX DE TRANSPORT	44
3 - 3	POSITIONNEMENT BIBLIOGRAPHIQUE	45
3 - 4	CLASSIFICATION DES PROBLEMES DE TRANSPORT	45
3 - 5	GESTION DU TRANSPORT FERROVIAIRE	51
3 - 6	LE PROBLEME VRPTW	56
<b>CHAPITRE 4</b>	<b>METHODE DE RESOLUTION</b>	<b>59</b>
4 - 1	INTRODUCTION	61
4 - 2	RESOLUTION EN DEUX PHASES	61
4 - 3	CHOIX DE LA METHODE DE RESOLUTION	67
4 - 4	PROCEDURE DE CONSTRUCTION DES TOURNEES	68
4 - 5	PROCEDURE D'OPTIMISATION DES TOURNEES	80
4 - 6	REAJUSTEMENT PREVISION/REALISATION	87
<b>CHAPITRE 5</b>	<b>APPLICATION AUX CAS REELS</b>	<b>93</b>
5 - 1	METHODOLOGIE DE VALIDATION	95
5 - 2	RESULTATS NUMERIQUES	101
<b>CHAPITRE 6</b>	<b>MISE EN PRODUCTION</b>	<b>113</b>

---

## *Table des matières*

---

6 - 1 INTRODUCTION	115
6 - 2 DONNEES INDUSTRIELLES	116
6 - 3 ANALYSE DE LA BASE DE DONNEES	117
6 - 4 ANALYSE DES DYSFONCTIONNEMENTS	124
6 - 5 AMELIORATIONS INDUITES PAR LE CHANGEMENT DE SYSTEME	125
6 - 6 INDUSTRIALISATION	126
<b>CHAPITRE 7 CONCLUSION ET PERSPECTIVES</b>	<b>131</b>
<b>CHAPITRE 8 BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>134</b>
8 - 1 PROBLEMES DE ROUTAGE	134
8 - 2 VRP	135
8 - 3 VRPTW	136
8 - 4 GESTION DE PRODUCTION : ORDONNANCEMENT, TECHNIQUES D'OPTIMISATION	138
8 - 5 MANUELS SUPPORTS	139
8 - 6 RAPPORTS INTERNES ARCELOR	139
<b>CHAPITRE 9 ANNEXES</b>	<b>143</b>
9 - 1 NOMENCLATURE DES ATELIERS	145
9 - 2 NOMENCLATURES DES MANŒUVRES	146
9 - 3 NOMENCLATURE DES CODES POSTE AFFAIRE	150
9 - 4 MATRICE DES TEMPS DE HAUT LE PIED	152
9 - 5 EBF = DEMANDE INFORMATIQUE	153
9 - 6 EBF = PREVISION D'EXECUTION	153
9 - 7 EBF = REALISATIONS	154
9 - 8 CODES DE NON-RESPECT	155
9 - 9 ETAT DE L'ART VRPTW	155
9 - 10 EVALUATIONS DES PARAMETRES	165
9 - 11 EVALUATION DES CRITERES D'ARRET	167
9 - 12 EVALUATION DES PERFORMANCES	170
9 - 13 EVALUATIONS DES ANTICIPATIONS	172
9 - 14 FONCTIONNALITES DU SYSTEME D'INFORMATION	173
9 - 15 GLOSSAIRE	180

---

# CHAPITRE 1

## INTRODUCTION

<b>CHAPITRE 1</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>7</b>
1 - 1	PRESENTATION DE LA SOCIETE	9
1 - 1.1	LE GROUPE ARCELOR	9
1 - 1.2	LES PRODUITS ARCELOR	10
1 - 1.3	LE SITE DE DUNKERQUE	12
1 - 1.3.1	Le Processus de fabrication	13
1 - 1.3.2	Production	18
1 - 1.3.3	Transport des produits sidérurgiques	18
1 - 1.3.4	Contexte de production	20
1 - 2	PROBLEMATIQUE INDUSTRIELLE	21
1 - 3	LE SERVICE DES ETUDES INDUSTRIELLES	23
1 - 3.1	FONCTIONNEMENT GENERAL	23
1 - 3.2	MA MISSION AU SEIN DE CE SERVICE	24



L'ensemble de ce projet s'est déroulé au sein de la société ARCELOR, et plus particulièrement sur son site de production d'aciers plats au carbone implanté près de la ville de Dunkerque.

Cette usine couvre l'ensemble des processus de fabrication de l'acier où des matières premières venant par bateau du monde entier, sont transformées en tôles à chaud, puis enroulées sous forme de bobines\*. Elle dispose d'une infrastructure ferroviaire privée compte tenu de la dimension particulière des produits sidérurgiques et de leur possible transport à chaud.

Ce site se trouve dans un contexte d'augmentation sensible de la production où le service Mouvement devra gérer avec le même effectif en personnels et en équipements qu'à l'heure actuelle, des prestations ferroviaires qui seront plus nombreuses et avec de nouvelles orientations. Pour répondre à cette problématique industrielle, nous avons choisi de mettre en oeuvre un système d'aide à la décision pour la régulation du trafic ferroviaire en temps réel.

Les trois années de recherche se sont déroulées au sein du service des Etudes Industrielles où nous avons apporté une nouvelle approche de modélisation en faisant appel à la recherche opérationnelle.

Les termes spécifiques au domaine industriel de notre projet sont définis dans le glossaire qui fait l'objet de l'annexe 9 - 15 en fin de manuscrit. Les termes figurant dans ce glossaire sont repérés par un astérisque.

# CHAPITRE 1 - INTRODUCTION

## 1 - 1 Présentation de la société

### 1 - 1.1 Le groupe ARCELOR

La sidérurgie française sort exsangue de la seconde guerre mondiale, ses installations pillées ou détruites : l'heure est à la reconstruction immédiate (Cf. Figure 1).

Il se constitue en 1948, deux sociétés distinctes : d'un côté USINOR (Union Sidérurgique du NORd de la France), et de l'autre SOLLAC (SOciété Lorraine de LAMinage à Chaud). Cette dernière fabrique à l'époque 42 % de la production totale d'acier en France et 98 % du fer blanc.

En 1959, le gigantesque chantier de Dunkerque du groupe USINOR commence. L'usine est implantée sur 450 hectares dont 90 gagnés sur la mer, en bordure d'un nouveau bassin minéralier. De la concrétisation de Dunkerque, la sidérurgie française conquière de nouveaux territoires sur les littoraux du Nord et du Sud, et emploie à cette époque 173 000 personnes, le plus haut niveau d'effectifs jamais atteint.

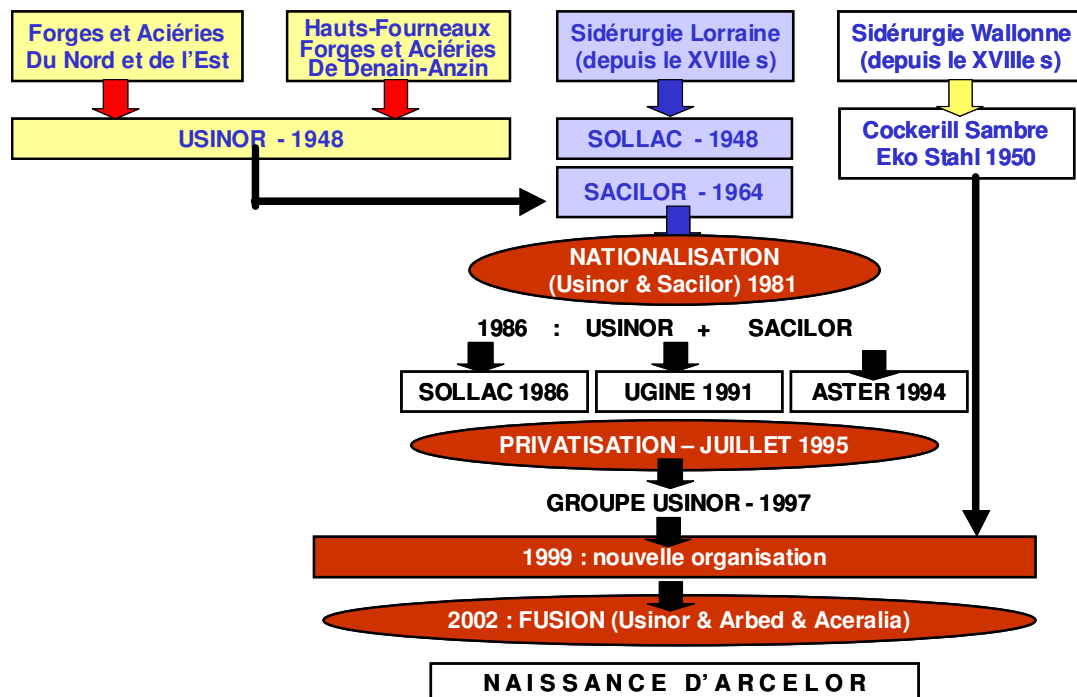


Figure 1 : Naissance de la société ARCELOR

Au milieu des années 60, USINOR absorbe la société Lorraine-Escault reconnue comme l'un des grands producteurs du secteur. De l'autre côté, la sidérurgie Lorraine constituée alors de trois sociétés, se concentre en une unique entreprise composée des filiales principales de SOLLAC et de SACILOR (Société des ACIéries et des laminoirs de LORraine).

Toutefois, la crise pointe au début des années 1970, et les premières restructurations sont annoncées. Les gouvernements successifs s'efforcent de réorganiser progressivement la sidérurgie. Elle perdra la moitié de son effectif dans le Nord et en Lorraine. SOLLAC Dunkerque compte 100 000 personnes en 1985 contre 3 700 en 2003.

Associée aux directives européennes, cette situation difficile provoquera en 1986, le regroupement français en un unique consortium : le groupe USINOR-SACILOR. Celui-ci connaît la privatisation en juillet 1995, et conservera le nom d'USINOR. Son avenir se dessine par cette nouvelle priorité : il faut penser qualité et non plus comme « à la grande époque de la sidérurgie » productivité.

La dernière date importante dans l'évolution de la sidérurgie française est l'année 2002 où se crée ARCELOR, née du rapprochement de trois groupes sidérurgiques européens ARBED pour le Luxembourg, ACERALIA pour l'Espagne, et USINOR pour la France. Le groupe s'affirme comme la référence mondiale dans l'industrie de l'acier. Son objectif est de répondre encore mieux aux besoins de ses clients devenus mondiaux, d'optimiser ses capacités industrielles, et de créer des aciers toujours plus innovants.

Employant 110 000 personnes dans plus de 60 pays, ARCELOR est le premier producteur sidérurgique mondiale avec en 2001, une production d'environ 44 millions de tonnes d'acier et un chiffre d'affaires de plus de 27 milliards d'euros. Néanmoins, la production d'acier est un secteur très morcelé, et ARCELOR représente seulement 5 % de la production mondiale.

## 1 - 1.2 Les produits ARCELOR

Le groupe ARCELOR développe ses activités en quatre secteurs (Cf. Figure 2). Il est le premier producteur mondial des aciers plats au carbone (50 % de son activité) et des aciers longs au carbone (15 %), l'un des leaders mondiaux pour la production d'aciers inoxydables (16 %), et parmi les premiers en Europe pour le secteur de la distribution – transformation - trading (19 %). Ce dernier secteur consiste à lier le monde de la production d'acier avec les clients industriels par la commercialisation des produits et le e-commerce.

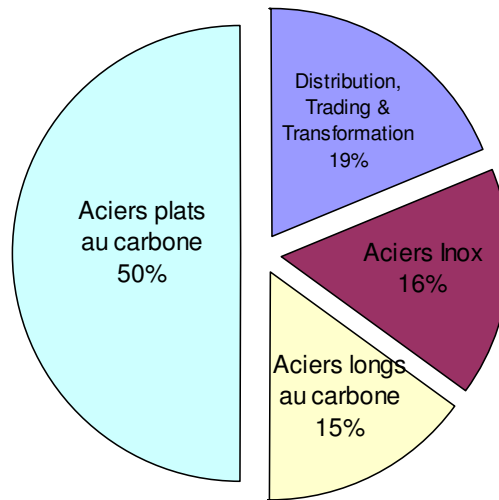


Figure 2 : Activités du groupe ARCELOR

Les aciers plats au carbone sont utilisés sur les marchés de l'automobile, ainsi que pour des applications industrielles telles que le bâtiment, la construction générale (Pont de Normandie), l'électroménager, et l'emballage (canettes pour boîtes boissons).

Huit unités de production sont intégrées en Europe et couvrent l'ensemble du processus de fabrication. Ce dispositif industriel est complété par des unités spécialisées (laminage à froid, lignes de revêtement, lignes de re-fendage) en Europe, aux Etats-Unis et au Brésil.

Le secteur des aciers plats au carbone est organisé en unités opérationnelles (UO) constituées d'une ou plusieurs sociétés qui couvrent une zone géographique ou une gamme de produits et de services. Il existe cinq unités opérationnelles dont une au Brésil et quatre en Europe : Nord, Wallonie, Centre et Sud.

Au sein de l'UO Centre, il existe deux sociétés réparties géographiquement : SOLLAC Atlantique qui regroupe les sites de Dunkerque, Mardyck, Desvres, Montataire, et SOLLAC Lorraine pour les sites de Florange, Mouzon et Dudelange.

## 1 - 1.3 Le site de Dunkerque

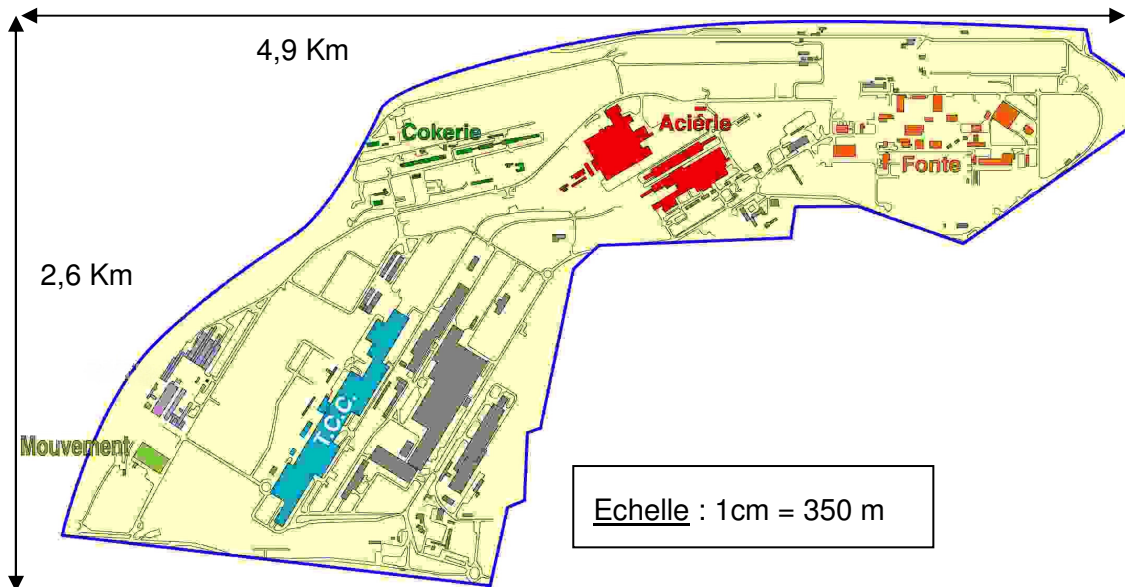


Figure 3 : Plan des installations sur le site de Dunkerque

L'usine de Dunkerque est le pilier de l'UO Centre et se situe au sein de la société SOLLAC Atlantique. Spécialisée dans la production d'aciers plats au carbone, elle emploie 3 700 personnes fin mars 2003. L'usine se situe géographiquement au bord de la mer du Nord sur 450 hectares dont 90 gagnés sur la mer (Cf. Figure 3). Le terrain fut renforcé pour être capable de supporter des charges très importantes et l'installation d'un vaste bassin maritime a permis au site de Dunkerque de devenir l'un des deux grands sites français de sidérurgie sur l'eau en produisant plus du quart de l'acier français, et à la ville de Dunkerque d'être propulsée troisième port de France.

L'usine couvre l'ensemble des processus de fabrication de l'acier où des matières premières venant par bateau du monde entier sont transformées en tôles à chaud, puis enroulées sous forme de bobines\*. Sa production est diversifiée, riche en qualités nobles, couvrant toute la gamme des aciers plats au carbone. Près de la moitié de la production de Dunkerque est destinée aux usines de SOLLAC Atlantique, et l'autre moitié alimente les usines du groupe ARCELOR. Un volume important de semi-produits (nommées brames\*) est livré à GTSI, tôlerie forte implantée sur le site de Dunkerque, spécialisée dans les plaques et tubes.

## 1 - 1.3.1 Le Processus de fabrication

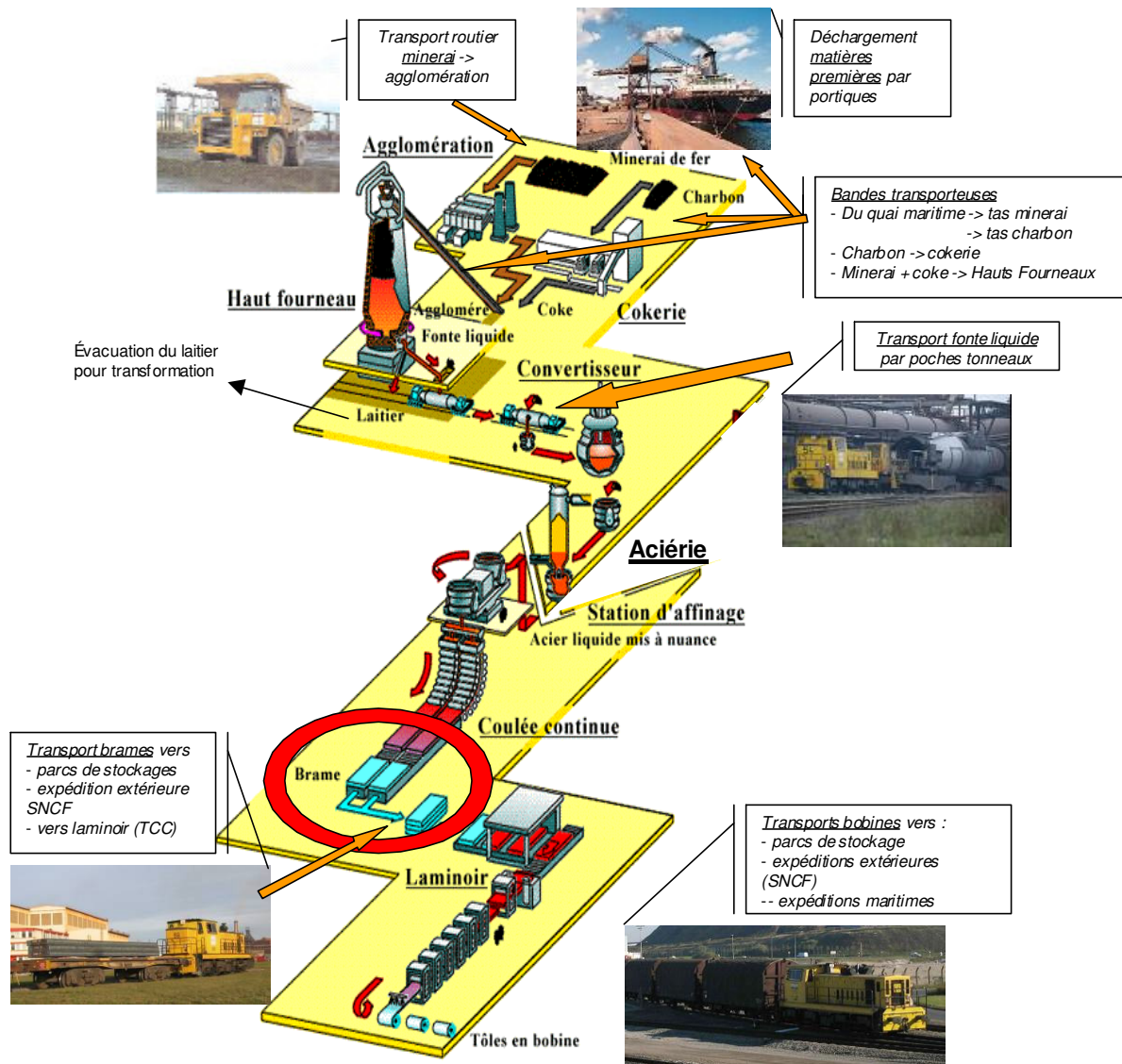


Figure 4 : Synoptique du processus de fabrication à Dunkerque

Le processus de fabrication des aciers plats au carbone passe par trois phases de transformation de la matière première (Cf. Figure 4) : fonte liquide (Agglomération + Cokerie + Haut fourneau) puis brames\* (Convertisseur + Acierie\* + Station d'affinage + Coulée Continue) et enfin bobines\* (Train Continu à Chaud\*).

Dans la première phase, une étape préliminaire de préparation des matières premières de type minerais se déroule au sein de l'unité Matagallo. La cellule des approvisionnements et de la logistique gère l'approvisionnement maritime de ces matières qui représente un volume de treize millions de tonnes par an (Cf. Figure 5).



Figure 5 : Approvisionnement des matières premières

Elles sont ensuite homogénéisées avec du minerai de fer qui est une roche composée d'oxydes de fer (fer et oxygène) et de divers autres minéraux. A partir de ce mélange, on cherche à obtenir un produit calibré riche en oxyde de fer et à forte résistance mécanique. Pour cela, il est préparé en « aggloméré » par un collage à chaud (1 200 °C) sur deux chaînes d'agglomération, afin de stabiliser ses teneurs et pour le rendre poreux afin d'augmenter sa surface de contact avec l'air chaud.

On exploite une seconde matière première nommée coke. Le coke est fabriqué par une distillation à l'abri de l'air à partir de charbon dit cokéfiant sous une cuisson à 1 000 °C pendant 18 à 24 heures. On cherche, ici, à obtenir un produit calibré résistant mécaniquement à l'écrasement et à l'abrasion.

Les installations de la cokerie peuvent traiter jusqu'à 110 000 Nm<sup>3</sup>/heure de gaz de production. Ce gaz épuré est stocké dans deux gazomètres, puis recyclé en partie pour le chauffage des fours à coke. Il est également utilisé au sein d'autres installations de l'usine, et distribué à une Centrale EDF.

Après cette phase de préparation des matières premières, on réalise une phase d'élaboration de l'acier. Les matières (coke et minerais homogénéisés) sont réparties en couches alternées dans un haut fourneau (Cf. Figure 6). Cette installation qui est un réacteur chimique à contre courant permet d'extraire le fer de son minerai à l'aide d'un combustible qui, ici, est le coke.

Le coke est chauffé par le vent chaud issu des cowpers de soufflage. Les gaz chauds réducteurs (2 150 °C) résultant de cette réaction montent vers le sommet du haut fourneau au travers des couches de matières. Ce contact gaz/solide, permet la fusion et la réduction des oxydes de fer en fer. Les impuretés forment un résidu appelé laitier.

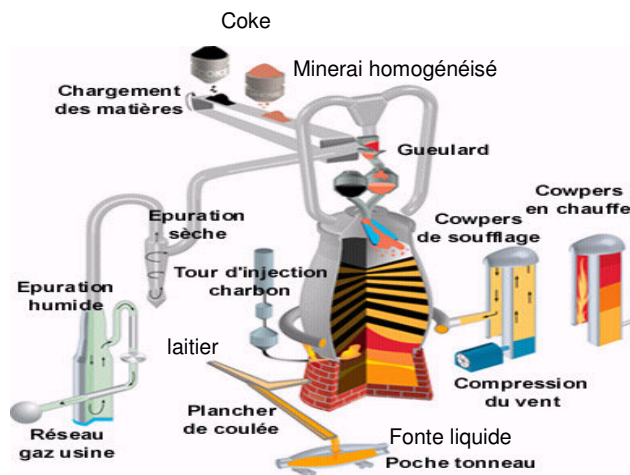


Figure 6 : Haut Fourneau

On n'obtient cependant pas du fer pur, mais de la fonte, mélange de liquide de fer (96 %) et de carbone (3 %), provenant du peu de coke qui n'a pas brûlé, et du laitier.

L'usine de Dunkerque comporte trois hauts fourneaux qui permettent d'atteindre une production annuelle de 5,6 MT de fonte liquide.

Celle ci est versée dans des wagons poches tonneaux d'une capacité moyenne de 450 tonnes, puis acheminée vers les Acières\*. Le laitier est conduit vers des

fosses où il est refroidi puis cassé en granulés. Il est utilisé en cimenterie ou comme matériau pour la construction routière.

La fonte doit être ensuite débarrassée de ses résidus et du carbone : cet affinage est réalisé dans un convertisseur à l'oxygène, par un soufflage d'oxygène pur et une addition de ferroalliages. On obtient du fer quasiment pur, ne contenant plus que quelques traces de carbone. Cet acier est dit « sauvage », car il n'a pas encore atteint sa forme achevée.

L'acier est considéré achevé, soit « mis à nuances », quand il est amené à sa composition chimique finale (définie en fonction des besoins du client) par un ajustement du taux de carbone, d'hydrogène, de gaz, et de diverses additions chimiques. Ces divers traitements sont appliqués au sein d'une zone dite, station d'affinage.

L'acier mis à nuances toujours en fusion, est ensuite coulé en continue dans un moule en cuivre refroidi. La matière se solidifie et forme une peau au contact des parois du moule. Le brin formé, descend, guidé par un ensemble de rouleaux et termine sa solidification (environ vingt minutes). Il est immédiatement coupé aux longueurs voulues, par des machines d'oxycoupage pilotées par des automates (Cf. Figure 7).





Figure 7 : D'acier liquide on obtient des brames\* ou des blooms ou des billettes

On obtient des semi-produits qui sont les ébauches des formes finales : des barres de section rectangulaire nommées brames\* ou, de section circulaire ou carrée nommées blooms ou billettes.

L'usine de Dunkerque possède quatre machines de coulées continues avec une production exclusivement de brames\*, s'élevant à 5.6 MT par an. L'une d'entre elles (CC n° 24) est située dans une première Aciérie dite secondaire, et les autres plus récentes dans une deuxième dite principale. Ces deux Aciéries se situent dans la même zone de production.

Au niveau dimensionnel, une brame\* (Cf. Figure 8) est caractérisée par une longueur moyenne de 10 m, une épaisseur de 250 mm, une largeur de 1 400 mm et un poids moyen de 23 tonnes.



Figure 8 : Illustration des brames

Une partie de ces brames est expédiée vers l'extérieur (1,5 MT) tandis que l'autre est transformée sous forme de bobines\* sur un Train Continu à Chaud (TCC\*) (Cf. Figure 9). La brame est réchauffée à la température imposée par la nuance et au format à laminer. Elle est alors décalaminée par des jets d'eau pour éliminer l'oxyde formé pendant le réchauffage. Un train dégrossisseur composé de cinq cages (R1 à R5) réduit progressivement l'épaisseur de la brame par un laminage entre des cylindres à axe horizontal tout en maintenant la

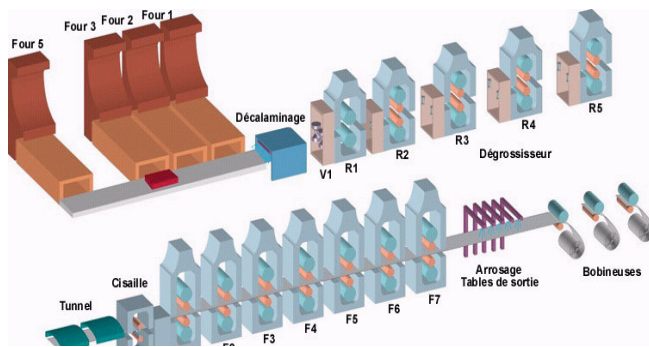


Figure 9 : Train Continu à Chaud

largeur du produit grâce à des cylindres à axe vertical. L'épaisseur d'ébauche à la sortie du dégrossisseur est de 30 à 50 mm.

Le produit passe ensuite sur un finisseur où chaque cage (F1 à F7) a une force maximale de 3 000 tonnes, et où la vitesse de sortie peut atteindre 1 000 m/min.

A la sortie de la dernière cage, les caractéristiques dimensionnelles du produit sont mesurées par des jauges en ligne : profil d'épaisseur, largeur, planéité.

A la suite de cette opération, les brames deviennent des « produits plats au carbone » sous la forme de plaques ou, de tôles minces enroulées sous forme de bobines\* (Cf. Figure 10). Les blooms et billettes deviennent des « produits longs au carbone » sous forme de fils, barres, rails et autres profilés.



Figure 10 : Illustration des bobines

La production de Dunkerque exclusivement de bobines s'élève actuellement à 4,1 MT par an.

### 1 - 1.3.2 Production

Les bobines de Dunkerque partent vers d'autres usines du groupe ARCELOR pour subir des traitements complémentaires : allongement, revêtement, etc.

Près de la moitié de la production est destinée aux usines de SOLLAC Atlantique, et particulièrement l'usine de Mardyck qui se situe à 1,2 km à vol d'oiseau de Dunkerque. Chez ces clients finaux, elles deviennent des boîtes boissons, des tôles pour l'automobile ou, des constructions métalliques (Cf. Figure 11).

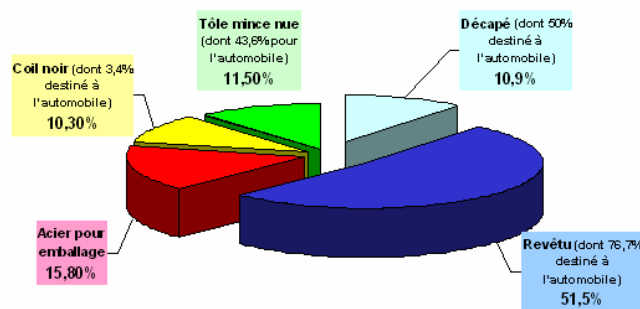


Figure 11 : Répartition du devenir de la production de bobines

### 1 - 1.3.3 Transport des produits sidérurgiques

L'usine de Dunkerque comporte des quais maritimes qui peuvent accueillir deux minéraliers de 120 000 tonnes. Le déchargement des matières premières s'effectue par quatre portiques. Les minerais et les charbons sont déposés directement sur des bandes transporteuses qui sont dirigées vers les parcs de stockage. Les transports, du charbon vers la cokerie, et du minerai aggloméré plus du coke vers les hauts fourneaux, se réalisent également par des bandes transporteuses.

Un service Mouvement prestataire de service au sein de l'usine de Dunkerque, réalise l'ensemble des transports ferroviaires et routiers. Il assure également la maintenance de tout le parc roulant et l'entretien des voies ferrées et des routes. L'ensemble du réseau ferroviaire est privé, et s'étend sur 450 hectares avec plus de 110 km de voies et 445 aiguillages. Il relie également l'usine de laminage à froid et de traitement de Mardyck.

Le transport des minerais vers les chaînes d'agglomération s'effectue au moyen de trois camions multi bennes. De plus, 280 bennes effectuent le transport des déchets (boues, goudrons, déblais, ferrailles) à l'intérieur de l'usine.

Ces activités relatives aux matières premières (minerai, charbon, minerai aggloméré, coke et déchets) sont sous-traitées au niveau de la gestion des ressources. Elles ne rentrent pas dans le cadre de notre étude.

La fonte liquide obtenue en sortie des hauts fourneaux est acheminée vers l'Aciérie\* principale au moyen de cinq locotracteurs\*, et vers l'Aciérie secondaire au moyen de trois locotracteurs et de deux chariots de transferts d'acier. Ces locotracteurs (cinq de 600 CV et trois de 300CV) sont dédiés à ce flux particulier qui est continu et constitué de matière liquide en fusion. Le transport s'effectue par 19 wagons poches tonneaux de 450 tonnes (Cf. Figure 12) qui subissent un cycle d'opérations fixe : remplissage, désulfuration, vidage dans des poches spécifiques de fonte, et décrassage.

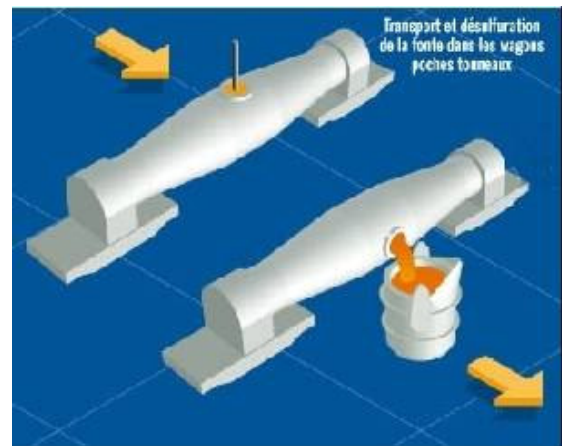


Figure 12 : Transport de la fonte liquide par wagons poche tonneaux

Le transport des semi-produits et des produits finis s'effectue également par voie ferroviaire, par dix locotracteurs\* radiocommandés de 600 CV, et au moyen de 650 types de wagons.

Les brames sont transportées par des rames\* constituées de trois à six wagons de charge maximale de cent tonnes. Les bobines sont acheminées vers l'usine de Mardyck par des wagons de type R1, et vers le quai maritime par des navettes rails. Enfin, les brames et les bobines destinées à l'expédition sont acheminées par des wagons accrédités à la circulation sur le réseau SNCF.

## 1 - 1.3.4 Contexte de production

L'usine de Dunkerque est spécialisée dans la fabrication des brames dites dégazées. Ce procédé permet l'élaboration de produits avec des nuances à taux faible en soufre et en hydrogène. Il permet également, le réglage thermique, et l'élaboration de nuances avec un taux de carbone très bas.

Ces brames au mode de fabrication très complexe sont à l'heure actuelle peu fabriquées au niveau mondial, et donc peu disponibles. Or, les demandes au sein du groupe ARCELOR sont nombreuses.

Deux solutions sont envisageables : soit augmenter la production de ce type de brames au niveau de l'usine de Dunkerque, soit les importer et supporter le peu de flexibilité en approvisionnements et le coût financier qui en découlent.

C'est la première solution qui est la plus avantageuse et qui a été retenue par la société ARCELOR. Il reste cependant, à évaluer si les installations de l'usine de Dunkerque peuvent supporter cette augmentation sensible de production.

Les principaux outils de production installés au moment de l'implantation en 1959 arrivent en fin de vie, et il est devenu nécessaire de rénover certaines de ces installations. Par exemple, la réfection d'un des hauts fourneaux en 2001 a permis d'augmenter sa rentabilité. On a actuellement, grâce aux trois hauts fourneaux, une production annuelle de 5.6 MT de fonte. La réfection d'un prochain haut fourneau en 2006, laisse présager une nouvelle amélioration avec un volume de fonte estimé à 6.5 MT par an. Cette augmentation de la quantité de fonte qui est ensuite additionnée de ferroalliages permet d'envisager une intensification de la production des brames. Par ailleurs, les outils situés en aval de l'Acierie (station d'affinage et coulées continues) ne sont pas saturés.

Il n'y a donc aucune installation industrielle bloquante pour supporter cet objectif de production.

La société vise pour l'année 2006, une production annuelle de l'Acierie de 6,7 MT de brames et une production annuelle du Train Continu à Chaud de 5.3 MT de bobines, contre des potentiels respectifs de 5.6 MT et 4.1 MT en 2003. Le volume annuel d'expéditions des brames vers l'extérieur reste sensiblement le même passant de 1,5 à 1,4 MT.

## 1 - 2 Problématique industrielle

Implantée sur 450 hectares, l'usine de Dunkerque du groupe ARCELOR dispose d'une infrastructure ferroviaire privée compte tenu de la dimension particulière des produits sidérurgiques, et de leur possible transport à chaud. Le réseau s'étend sur une centaine de kilomètres avec en moyenne la circulation de douze locotracteurs\*.

La régulation ferroviaire est réalisée en continue par plusieurs équipes de personnes nommées dispatchers\* qui assurent la fonction de prestataire de transport pour le flux de matière cadencé par les outils de production (Cf. Figure 13).

En effet, dans les premières phases de fabrication, le flux est poussé, conditionné par le processus de transformation continu des matières premières. Il est, ensuite, tiré par le Train Continu à Chaud\* où la cadence de laminage est conditionnée par les commandes extérieures.

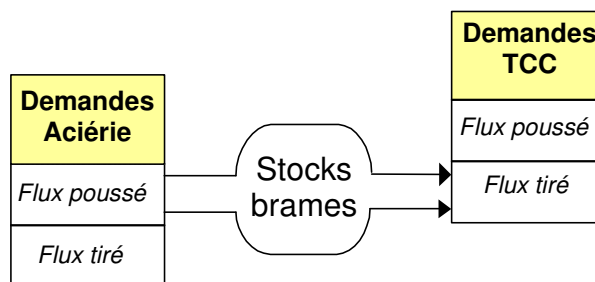


Figure 13 : Flux de matières entre les outils de production

Les zones de stockage et de production sont assimilées à des ateliers\*. Ces derniers émettent par voie informatique une demande de prestation ferroviaire, comme par exemple le besoin d'un locotracteur pour l'évacuation d'un convoi\* de rames\* chargées.

A ces ateliers\*, on associe à la fois, des niveaux d'urgence de réalisation liés au processus de fabrication, se modifiant au cours du temps, des contraintes horaires au plus tôt et au plus tard, et des ressources matérielles et humaines limitées.

Le dispatcher\* reçoit en temps réel toutes les demandes de prestations ferroviaires émises par les ateliers\* à travers une application informatique nommée SIMPLUS\*. Chaque demande consiste à évacuer ou à acheminer par un locotracteur, un nombre de wagons dans une plage horaire spécifiée par les ateliers. En fonction de la charge de travail des ponts roulants qui ont une activité parallèle de triage des brames\* ou d'évacuation d'outils,

les déchargements et chargements des wagons peuvent s'étendre de vingt minutes à plusieurs heures. Pour des raisons de sécurité, le locotracteur n'est pas autorisé à stationner accroché à ses wagons pendant la manipulation des produits. Les wagons sont donc laissés sur les voies ferrées et les locotracteurs sont redirigés par le dispatcher vers d'autres manœuvres\*.

Le dispatcher doit donc gérer l'attribution des locotracteurs pour la réalisation de toutes les demandes ferroviaires. Celle-ci devient difficile quand plusieurs demandes sont à traiter dans le même créneau horaire et/ou quand l'anticipation est de courte durée.

Par ailleurs, dans le futur contexte de production de l'usine de Dunkerque, le service Mouvement devra gérer avec le même effectif en personnels et en équipements qu'à l'heure actuelle, des demandes plus nombreuses et prendre en compte de nouvelles orientations de flux suite à la création de nouvelles zones de stockage.

L'approche retenue pour traiter cette problématique, est une méthode d'optimisation combinatoire pour concevoir un système d'aide à la décision au dispatcher. Il s'agit d'une offre d'aide au pilotage des flux ferroviaires, par une évaluation de la charge prévisionnelle des locotracteurs, et le calcul des heures de réalisation de chaque prestation. Cet outil peut également s'utiliser comme un outil de structuration d'informations et d'étude pour le service Mouvement.

Le développement de ce système permet de capitaliser le savoir-faire des dispatchers\* et de mieux appréhender l'organisation ferroviaire. L'objectif opérationnel attendu est une amélioration du critère de satisfaction client qui correspond à un nombre minimum de demandes ferroviaires non effectuées dans les plages horaires souhaitées par les ateliers\*.

Actuellement, les équipes de dispatchers sont réparties en trois zones géographiques. Les zones,

- Fonte, pour le transport de fonte liquide
- Nord, pour le transport des brames\*, et
- Sud, pour le transport des bobines\*

Le flux associé à la fonte liquide ne rentre pas dans le cadre de ce projet car les ressources de transports dédiées et soumises à un cycle d'opérations fixe, laissent peu de flexibilité.

Notre étude, est ainsi, ciblée uniquement sur le transfert des brames qui constitue une étape première essentielle à la bonne fluidité de production des bobines, et donc de leur transport.

De plus, la gestion ferroviaire au sein des secteurs géographiques Nord et Sud est réalisée à l'identique. Ainsi, toutes les analyses et les améliorations que nous mettons en avant sur le secteur Nord sont transposables sur le secteur Sud.

## 1 - 3 Le service des Etudes Industrielles

### 1 - 3.1 Fonctionnement général

Rattaché à la Direction Technique de la société, le service des Etudes Industrielles (EI) a pour mission l'évaluation et la prévision des performances des flux et des systèmes de production. Il doit valider au plus tôt et proposer des solutions techniques pour faciliter la prise de décision dans un contexte où les enjeux sont multiples : réduction des coûts et des risques, augmentation du volume de production, rentabilité d'investissements.

L'équipe est constituée de cinq personnes : HOLLEBEKE Philippe : statisticien, responsable du service, trois techniciens experts : CALBET Franck, FIORELLI Christian, LOONES Christophe, une secrétaire : DECLERCK Christiane. Le service était dirigé par ASTOLFI Frédéric au moment de mon intégration dans le service, parrain tout au long de ce projet.

Le service réalise des études ponctuelles pour des clients qui appartiennent à la société de SOLLAC Atlantique, et principalement à l'usine de Dunkerque. Les demandes sont de nature très diverses et varient en fonction des enjeux économiques. Les délais des missions sont fixés avec les clients et représentent une moyenne de quinze jours/hommes, soit environ deux mois d'étude. Elles traitent généralement du fonctionnement d'ateliers, d'études d'optimisation, et du traitement de base de données.

80 % des missions sont traitées par une approche en simulation dynamique qui permet de visualiser, de comprendre et de dimensionner les phénomènes. Les techniciens sont experts en modélisation dynamique et utilisent deux logiciels de simulation, qui sont Witness et Promodel.

Les Etudes Industrielles animent le club SEMIAS, qui est le club de Sensibilisation aux Etudes de Modélisation Industrielles Appliquées à la Sidérurgie où des intervenants de l'extérieur et/ou des usines du groupe ARCELOR interviennent sur des thèmes spécifiques. L'objectif de ces réunions est de partager les expériences, et de comprendre les techniques sur des cas sidérurgiques concrets. On peut citer les thèmes suivants : Spécial Créativité, Le



Traitement des Données, Spécial Langages et Modèles à Objets, Spécial Séries Temporelles.

## 1 - 3.2 Ma mission au sein de ce service

Dans le cadre du contrat d'accompagnement entre le Laboratoire d'Automatique de Grenoble et la société ARCELOR, nous avons travaillé par alternance d'une à deux semaines par mois. Une fréquence plus rapprochée au cours de la deuxième année, nous a permis d'avoir une meilleure vision de la conduite du projet et d'éviter les dérives. Des réunions trimestrielles entre JACOMINO Mireille (directrice de thèse), ASTOLFI Frédéric, HOLLEBEKE Philippe, et moi-même ont été organisées. Des rapports internes synthétisent l'ensemble de ces rencontres (Cf. § 8 - 6).

Les trois années de recherche passées dans ce service s'expriment à la fois par la réalisation d'études internes ponctuelles et par la conception et l'industrialisation d'un système d'aide à la décision pour la régulation du transport ferroviaire (Cf. § 8 - 6).

Les études ponctuelles s'inscrivent dans le cadre du projet flux brames qui traite de l'augmentation du volume de brames. Elles s'orientent à différents niveaux de la filière : gestion des stocks, évaluation de taux de charges des outils de manutention, planification. La difficulté principale est de prendre en compte toutes les contraintes qui sont mises en jeu.

Nous avons été amenés à réaliser les missions internes suivantes :

- évaluation du nombre d'engins nécessaire à l'exploitation du parc de stockage extérieur P3 où les brames venant de l'Acierie par campagne de production sont stockées pendant trois jours minimums avant expédition par la SNCF. Le délai de réalisation étant de courte durée, une simulation statique sous Excel nous a permis d'obtenir un abaque qui représente le nombre d'engins nécessaires en fonction du volume de production de l'Acierie et du tonnage d'expédition.
- dimensionnement du portique nécessaire à l'exploitation du parc extérieur T7, en nombre de brames par pincées. Une simulation statique sous Excel nous a permis d'obtenir la charge de trois portiques (1, 2 ou 3 brames/pincée) suivant la production de l'Acierie.
- faisabilité d'une solution 100 % ferroviaire dans le futur contexte de production. Cette étude nous a permis d'analyser dans sa globalité le transport ferroviaire de l'usine. Elle constitue le point de départ du sujet de notre problématique.

Notre présence au sein du service a permis de formuler certains modes d'étude, et d'apporter une nouvelle approche de modélisation en faisant appel à la recherche opérationnelle. Les points abordés sont les suivants :

- évacuation de la coulée continue CC n° 24 par un modèle réseau de Petri
- matrice optimale de la répartition des flux soumis à des requis logistiques et des règles de priorité sur les différentes zones de stockages
- étude de la corrélation entre flux et volume stocké

Nous avons également participé à l'animation du club SEMIAS lors des séances suivantes : Spécial Recherche Opérationnelle, Spécial Réseaux de Petri, et Spécial Logistique.

Ces trois années nous ont surtout permis de concevoir et d'industrialiser un système d'aide à la décision pour la gestion des flux ferroviaires. Cette mission au délai très long par rapport à celles traitées par le service, a permis une nouvelle fois la mise en œuvre de nouveaux outils d'optimisation qui sont détaillés dans ce document (Cf. Figure 14).

	2001				2002					2003					2004							
	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J
Apprentissage de la problématique industrielle	■	■	■	■	■	■																
Analyse de l'existant					■	■	■	■	■	■												
Modélisation grossière et détaillée									■	■	■	■	■	■	■							
Méthode de résolution																	■	■	■	■	■	■
Expérimentations																					■	■
Industrialisation																					■	■

Figure 14 : Déroulement du projet

Lors de la phase d'imprégnation du sujet, nous avons défini et analysé les caractéristiques principales associées au flux physique des brames. Tout d'abord, le pilotage du flux métal, en terme de visualisation prévisionnelle. Ensuite, le mode de stockage et plus particulièrement l'aménagement des parcs extérieurs. Enfin, le transport ferroviaire et les manutentions par engins sur roues.

Nous avons dégagé au cours de cette première période, un thème central sur la problématique du transport. Et plus particulièrement, l'étude d'un système d'aide à la décision.

Au cours d'une deuxième période, nous avons réalisé des premiers modèles très simplifiés de ce cadre d'étude. Les mois suivants, nous avons analysé la base de données informatique des demandes ferroviaires, et, ainsi, dégagé les caractéristiques principales

des flux. Nous avons formalisé le travail des dispatchers\*, et établi des nomenclatures de travail, concernant les manœuvres\* ferroviaires.

Lors d'une quatrième période, nous avons établi le modèle du problème ferroviaire de Dunkerque, et développé une heuristique de résolution. De là, nous avons expérimenté ce prototype, que nous avons ensuite amélioré, de manière à représenter au mieux l'activité ferroviaire, et les besoins opérationnels des dispatchers.

A l'heure actuelle, l'évaluation des performances de notre maquette montre une amélioration sensible du nombre de manœuvres\* effectuées avec un certain retard. Et, l'industrialisation du prototype est aujourd'hui en cours de réalisation. La mise en exploitation au sein des dispatchings\* des secteurs géographiques Nord et Sud, est effective depuis le 20/10/2004.

La suite de ce mémoire est entièrement consacrée à cette étude.

## CHAPITRE 2

# ANALYSE DE L'EXISTANT

<b>CHAPITRE 2</b>	<b>ANALYSE DE L'EXISTANT</b>	<b>27</b>
2 - 1	LE SERVICE MOUVEMENT	29
2 - 2	DESCRIPTION DETAILLÉE DE L'ACTIVITÉ FERROVIAIRE	29
2 - 3	PRESENTATION DES CONCEPTS	32
2 - 3.1	LES MANŒUVRES	32
2 - 3.1.1	Les codes affaire et codes poste affaire	32
2 - 3.1.2	Les durées	34
2 - 3.1.3	Contrainte d'urgence de réalisation	35
2 - 3.2	LA MAQUETTE INFORMATIQUE SIMPLUS	36
2 - 3.3	LA DEMANDE INFORMATIQUE DE PRESTATION : EBF	37
2 - 4	LE DISPATCHER	37
2 - 4.1	ROLE	37
2 - 4.2	GESTION INFORMATIQUE DES EBF	39

Le site de production de Dunkerque est divisé en plusieurs départements, comme le Train Continu à Chaud\*, qui sont des points centraux dans le processus de fabrication des produits. Chaque département est composé d'un ou plusieurs ateliers\* qui sont assimilés à des zones de stockage et de production : ils émettent par voie informatique des demandes de prestations ferroviaires nommées EBF\*, pour Expression en Besoin Fer. Une équipe de personnes nommées dispatchers assure en continu la régulation du trafic ferroviaire. Ils doivent attribuer à chaque demande EBF, un locotracteur\* pour la réalisation de la prestation. De plus, à ces demandes, sont associées des niveaux d'urgence de réalisation se modifiant au cours du temps, des contraintes horaires au plus tôt et au plus tard, et des ressources matérielles et humaines limitées.

## CHAPITRE 2 – ANALYSE DE L'EXISTANT

### 2 - 1 Le service Mouvement

Le service Mouvement contribue au bon déroulement du processus de production de l'usine par la mise à disposition de ressources de transport pour tous les produits entrants et/ou sortants de l'usine, ainsi que ceux en cours de transformation entre les unités d'exploitation. De plus, il assure un rôle central d'interlocuteur vis à vis de ses fournisseurs.

Son objectif majeur est l'amélioration de ses résultats globaux tout en supportant l'augmentation de production de l'usine de Dunkerque sans outil supplémentaire et avec le même effectif en personnel. Il se compose actuellement de 280 personnes dont 200 sont en feux continus c'est-à-dire postés et relayés toutes les huit heures.

### 2 - 2 Description détaillée de l'activité ferroviaire

L'activité ferroviaire est divisée en trois zones géographiques, le secteur Fonte, le secteur Sud, et le secteur Nord. L'ensemble du réseau est privé, et il s'étend sur 450 hectares avec plus de 110 Km de voies et 445 aiguillages.

Le secteur Fonte est supervisé par un régulateur de flux qui dispose de cinq locotracteurs\* et de 19 wagons poches tonneaux dédiés à l'Aciérie principale et de trois locotracteurs et de deux chariots de transferts d'acier dédiés à l'Aciérie secondaire. Ces flux spécifiques dans la gestion des ressources et des prestations, n'entrent pas dans le cadre de notre étude.

Le secteur Sud couvre au moyen de cinq locotracteurs, le transport des bobines\* c'est-à-dire l'évacuation du Train Continu à Chaud (TCC\*) et les expéditions maritimes et SNCF. De plus, il assure la réception de tous les produits venant de l'extérieur : maritime et SNCF. Quatre personnes supervisent cette zone : un régulateur de flux et un aiguilleur pour la gestion des ressources internes, un gestionnaire des frais de stationnement, et un aiguilleur pour les entrées et sorties de wagons SNCF sur le réseau interne de l'usine.

Le secteur Nord s'associe au transport des brames\* c'est-à-dire l'évacuation des Aciéries et l'alimentation du TCC au moyen de quatre locotracteurs et par un régulateur de flux. De plus, il assure l'acheminement de la matière carbure nécessaire à la désulfuration de la fonte liquide, ainsi que les matières de chaux et de castine.

Dans la répartition géographique, le secteur Sud représente la continuité de l'activité du secteur Nord. Ainsi, une bonne fluidité des prestations et donc des ressources sur la zone Nord participe au bon fonctionnement de la zone Sud. Les régulateurs de ces deux secteurs utilisent la même plate-forme de transfert d'informations et gèrent à l'identique leurs flux.

Notre étude inclut ces deux zones géographiques. Cependant, nous avons développés tous nos tests numériques sur le secteur Nord où la combinatoire des affectations des locotracteurs et des manœuvres\* est la plus difficile. Actuellement, l'évaluation des performances de l'activité ferroviaire s'effectue à travers un taux de satisfaction client. Le suivi de ce taux sur le secteur Nord contribue à celui centré au secteur Sud. Ainsi, nous illustrons dans ce document, uniquement des exemples appliqués au secteur Nord.

L'usine de Dunkerque est composée de plusieurs départements qui représentent des points centraux dans le processus de fabrication des produits, comme l'Aciérie\* (ACIER) ou le Train Continu à Chaud (TCC\*). Chaque département est divisé en un ou plusieurs ateliers\* qui sont les clients du service Mouvement (Cf. Figure 15).

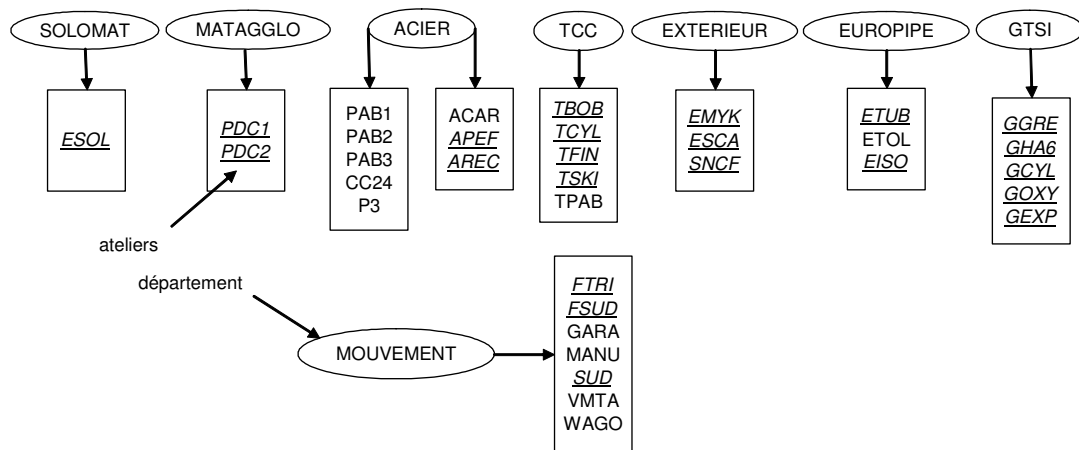


Figure 15 : Répartition des ateliers au sein des départements

Ces clients répartis par secteur géographique (italique et souligné pour le secteur Sud et normal pour le secteur Nord) représentent des zones particulières au sein d'un département : stockage (parc à brames Aciérie PAB1), traitement (hall de cisailage TSKI), échange avec l'extérieur (quai maritime ESCA).

On peut remarquer qu'il n'existe aucune règle sur le nombre et la répartition de ces ateliers\*. Certains départements comportent un atelier unique (SOLOMAT) ce qui peut provoquer des demandes ferroviaires simultanées mais de nature différente. Tandis que d'autres départements par évolution historique, comptent plusieurs ateliers pour chaque zone de production ou de stockage (GTSI). La liste complète des ateliers figure § 9 - 1.

On distingue au sein de ces clients, un atelier « virtuel » MOUVEMENT qui gère l'ensemble des prestations du service Mouvement en termes de ressources et de personnels. Par exemple, l'atelier VMTA représente le vestiaire des équipes du secteur Nord, et WAGO l'atelier de réparation des wagons.

Sur la Figure 16, nous avons réalisé sur le plan général de l'usine, un zoom sur le secteur Nord. Huit ateliers (TPAB, CC24, etc.) appartenant majoritairement au département de l'Acierie\* (ACIER), couvrent la zone géographique. Ils sont reliés par un réseau de voies ferrées équipées de passages à niveaux et d'aiguillages manuels.

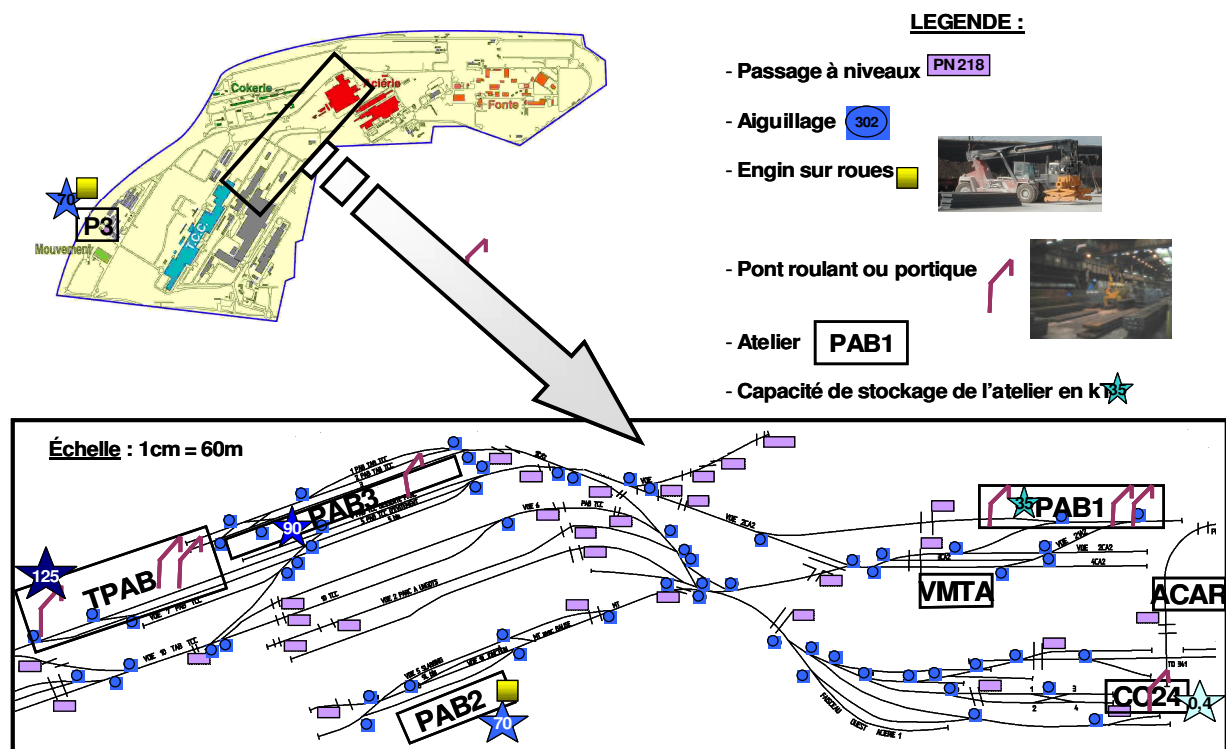


Figure 16 : Réseau ferroviaire secteur Nord

On peut noter que l'atelier P3 n'est pas situé dans la même zone géographique que les autres ateliers, il se situe à proximité des voies d'expéditions de la SNCF. Les brames



stockées sur ce parc extérieur sont destinées aux commandes extérieures. Il est schématisé dans le plan général de l'usine.

Chaque atelier possède un engin de manutention particulier (engin sur roues, pont ou portique) pour le chargement et le déchargement des wagons. Il a la responsabilité de ces opérations de manutention, et il doit respecter des règles spécifiques de sécurité.

Pour le transport des brames\*, la différence de longueur entre deux produits ne doit pas excéder 1.5 mètres. De plus, le poids maximum autorisé par wagon est de 105 tonnes, soit l'équivalent d'une pile de cinq brames d'une épaisseur de 247 mm ou de six brames d'une épaisseur de 207 mm. De plus, toutes les brames doivent être positionnées du côté de leur marquage (numéro de la brame) pour permettre la lecture par caméra de l'identité de chaque produit lors de l'entrée du wagon dans un atelier (Cf. Figure 17).

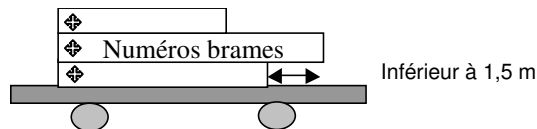


Figure 17 : Règles de sécurité du transport de brames par wagon

Le service Mouvement responsable du transport des wagons peut refuser l'acheminement d'un convoi\* si celui-ci ne respecte pas ces règles de sécurité. Le cas échéant, la prestation n'est pas réalisée dans le délai souhaité par l'atelier, et ce retard se répercute sur la gestion des ressources.

## 2 - 3 Présentation des concepts

### 2 - 3.1 Les manœuvres

#### 2 - 3.1.1 Les codes affaire et codes poste affaire

Les ateliers\* assimilés à des zones de stockage et de production sont les émetteurs par voie informatique de toutes les demandes de prestations ferroviaires.

Ces demandes sont caractérisées à la fois par un identifiant numérique qui représente la manœuvre\* et par des dates de début au plus tôt et de début au plus tard qui définissent la plage de réalisation souhaitée par l'atelier. Les manœuvres représentent des déplacements orientés, entre deux ateliers pour l'évacuation ou l'acheminement de wagons chargés ou

vides, par un locotracteur\*. Elles ne nécessitent qu'un seul locotracteur pour leurs exécutions.

Ces manœuvres sont au nombre de 258 types différents, et sont identifiées par deux numéros :

- un code affaire\* qui spécifie le type de produit transporté (brames\*) ainsi que les deux ateliers entre lesquels a lieu le déplacement. Il existe 102 codes particuliers.
- un code poste affaire\* qui définit l'orientation du déplacement entre les ateliers. Il existe 23 codes distincts.

La nomenclature des 258 manœuvres résume l'ensemble des concepts qui caractérisent une prestation : les codes affaire et codes poste affaire de la manœuvre, les ateliers d'origine et de destination du déplacement, la durée moyenne de réalisation de la prestation, le retard permis qui définit l'urgence de réalisation de la manœuvre, la manœuvre de précedence à respecter, et le libellé descriptif de la demande. Les notions de retard permis et de précedence sont définis dans les § 2 - 3.1.3, et 3 - 5.3.

Manœuvre		Atelier origine	Atelier destination	Durée moyenne	Retard Permis	Precedence	Libellé
Code affaire	Code poste affaire						
703	1	PAB3	ESCA	45	15	XXX-XXX	Réception de brames du quai de l'Escaut
	33	ESCA	PAB3	19	15	703-01	
704	1	PAB1	GHA6	20	120	XXX-XXX	Transport de brames du TEB vers AFOU (v21 Ac2)
705	1	PAB1	GGRE	28	120	XXX-XXX	Acheminement de brames du PAB1 vers Tracogep
	33	GGRE	PAB1	23	120	705-01	
706	1	PAB1	PAB1	30	60	XXX-XXX	Attente manœuvre à la demande du PAB1
	33	PAB1	PAB1	50	60	XXX-XXX	
707	1	PAB2	PAB2	45	120	XXX-XXX	Attente manœuvre à la demande du PAB2
	33	PAB2	PAB2	70	120	XXX-XXX	
708	1	PAB2	PAB2	35	120	XXX-XXX	Manœuvre interne au PAB2
	33	PAB2	PAB2	23	120	XXX-XXX	
709	1	PAB1	PAB1	30	60	XXX-XXX	Manœuvre interne au PAB1
	33	PAB1	PAB1	10	60	XXX-XXX	
710	1	PAB1	PAB3	20	60	XXX-XXX	Acheminement de brames du PAB1 vers le PAB3
	33	PAB3	PAB1	21	120	710-01	
	99	PAB3	PAB1	31	120	710-01	

Figure 18 : Nomenclature des manœuvres

Par exemple Figure 18, la manœuvre de code affaire\* 703 et de code poste affaire\* 33, consiste à réceptionner des brames\* au quai maritime (ESCA) et à destination du parc à brames extérieur PAB3. Par convention, les manœuvres seront notées selon un seul identifiant numérique composé du code affaire et du code poste affaire. Par exemple, nous parlerons de la manœuvre 703-33. Sa durée moyenne de transport est de 19 minutes, avec un retard permis de 15 minutes, et une contrainte de précedence avec la manœuvre 703-01. La nomenclature des manœuvres est consultable au § 9 - 2.

Compte tenu de la répartition géographique des ateliers, chaque manœuvre est dédiée à l'un des secteurs du service Mouvement (Nord ou Sud). Le service correspondant réalise la prestation de transport.

On dénombre au sein du secteur Nord 88 manœuvres distinctes. Elles représentent tous les déplacements possibles dans ce secteur, mais nous verrons que certaines d'entre elles ont une occurrence plus élevée que les autres.

On dénombre également 70 manœuvres liées à la gestion interne du service Mouvement. Il existe seulement deux codes affaire : 20 pour le secteur Nord et 21 pour le secteur Sud, et 35 codes poste affaire spécifique (Cf. § 9 - 3.1). On peut citer le code poste affaire\* 01, qui représente la préparation du locotracteur ou, le code 02, qui immobilise les équipes lors de la pause casse-croûte.

Dans la nomenclature générale des 23 codes poste affaire (Cf. § 9 - 3.2), quatre d'entre eux ont une occurrence forte. Il s'agit des codes 01, 03, 10 et 33 qui spécifient respectivement l'expédition de wagons chargés, la réception de wagons chargés venant de l'extérieur, la mise à disposition de wagons déchargés, et la fourniture de wagons vides. On peut noter que l'attente (codes poste affaire 23, 27, 38 et 99) est considérée comme une manœuvre. Lorsque le locotracteur arrive à un atelier et que le convoi\* à acheminer n'est pas prêt, le régulateur du flux associe à la demande un code de poste affaire d'attente.

Les autres codes poste affaire de la nomenclature, qui ont une occurrence faible, spécifient les erreurs de gestion des ressources.

Nous avons à travers ce système de codification un langage commun entre ateliers et prestataires pour toute demandes ferroviaires. Celles-ci sont informatisées et permettent de suivre les activités de transport par voies ferrées.

### **2 - 3.1.2 Les durées**

Chaque manœuvre est caractérisée par une durée moyenne de réalisation qui comprend plusieurs temps successifs relatifs,

- à l'accrochage du locotracteur avec les wagons
- au contrôle du bon chargement des produits
- au contrôle du bon attelage des wagons entre eux et avec le locotracteur
- au déplacement entre les deux ateliers

- au positionnement sur la voie ferrée de destination
- au décrochage des wagons avec le locotracteur

Pour enchaîner deux manœuvres, le locotracteur doit parcourir un certain trajet à vide sans wagons caractérisé par une durée appelée « temps de haut le pied\* ». Ces durées correspondent au temps de déplacement entre l'atelier de destination de la manœuvre courante et l'atelier d'origine de la manœuvre suivante.

La construction de la matrice des temps de haut le pied\* est symétrique et de dimension égale au carré du nombre d'ateliers (34\*34). Cependant, la configuration du réseau ferroviaire ne permet pas de respecter la contrainte d'inégalité triangulaire. Elle est présentée au § 9 - 4.

### **2 - 3.1.3 Contrainte d'urgence de réalisation**

Il n'existe aucune règle particulière qui définit les urgences de réalisation des manœuvres entre elles. Si toutes les demandes peuvent être réalisées dans les plages horaires souhaitées par les ateliers, aucune règle ne privilégie une manœuvre par rapport à une autre. Cependant, si plusieurs manœuvres sont à réaliser dans le même créneau horaire, et donc exécutées avec un certain retard par rapport à la demande de l'atelier, on va privilégier celles qui ont une influence forte sur la cadence des outils de production au détriment de celles qui assurent la gestion interne des parcs de stockage.

On peut mentionner le caractère urgent de toutes les manœuvres liées à la Coulée Continue n° 24 de l'Acierie secondaire. En effet, cette zone de production continue des brames ne dispose que d'un faible stock équivalent à deux piles de brames au sol. Tout retard dans l'acheminement des ressources de transport sur ce flux peut entraîner un ralentissement voire un arrêt de la production.

De même, toutes les manœuvres conditionnées par les services extérieurs ont des contraintes temporelles de réalisation plus strictes, notamment la SNCF et le quai maritime d'Escaut.

Nous allons tenir compte de ces contraintes d'urgence de réalisation dans notre système en affectant à chaque manœuvre une durée représentant son retard admissible : elle sera par exemple, nulle pour celles liées à la Coulée Continue n° 24.

## 2 - 3.2 La maquette Informatique SIMPLUS

Dans les années 80, plusieurs applications informatiques ont été mises en place sur le site de Dunkerque, pour l'amélioration des performances économiques, et particulièrement pour la réduction des stocks, des délais, et des pannes. Cependant, ces applications n'avaient aucun lien entre elles et les interprétations étaient divergentes suivant les clients ou les fournisseurs. Elles ont pour la plupart été regroupées en 1990, au sein d'une application unique nommée SIMPLUS\* qui est le Système d'Information Mouvement pour son Process et la Logistique des flux du Site. Ce système informatique est toujours en exploitation à l'heure actuelle, mais il n'a jamais été réactualisé.

SIMPLUS\* se compose de cinq catégories d'applications :

- paramètres : ajout, modification, suppression
- gestion de l'exploitation ferroviaire
- gestion des départs de trains avec la SNCF
- statistiques à long terme
- suivi administratif

Mis en place au sein des infrastructures du Mouvement et au niveau de la plupart des ateliers, ce système s'alimente en temps réel par le transfert d'informations entre ces différents acteurs. Les ateliers émettent des demandes de transport ; les régulateurs du flux consultent ces demandes et notifient leurs prévisions de réalisations ; le service administratif consulte la base de données sauvegardées pour établir ses facturations et le suivi des diverses activités.

Au niveau de la gestion de l'exploitation fer, on peut consulter un ensemble de champs :

- les Expressions Besoin Fer (EBF\*) qui répertorient toutes les demandes de prestations ferroviaires
- les Mouvements FEr (MFE) qui spécifient l'ensemble des manœuvres en cours de réalisation
- les Réalisations Fer (RFE) qui sauvegardent toutes les EBF réalisées

On dispose également au sein de cette application, d'un ensemble de nomenclatures qui répertorie la codification des wagons, des locotracteurs, des départements et des ateliers.

Pour chaque atelier, on identifie son secteur géographique de rattachement, son département, l'identification et la position des voies ferrées. Pour chaque type de wagon, on énumère son code d'identification, son poids maximum admissible, et ses spécifications de chargement : bobines à axe vertical, trémies pour produit corrosif, etc.

## 2 - 3.3 La demande informatique de prestation : EBF

Les demandes de prestations ferroviaires, nommées EBF\* pour Expression en Besoin Fer, sont émises par les ateliers par voie informatique à travers l'application SIMPLUS\*. Elles consistent à évacuer ou à acheminer, par un locotracteur, un nombre de wagons dans une plage horaire spécifiée par l'atelier. Par convention, c'est l'atelier fournissant le produit qui émet la demande de transport.

Ces Expressions en Besoin Fer sont notifiées par plusieurs champs de saisies non obligatoires (Cf. § 9 - 5). On retrouve tous les concepts caractérisant une manœuvre : type, ateliers, date au plus tôt, date au plus tard, codes affaire et poste affaire. De plus, l'atelier spécifie la quantité et le type de wagons à transporter.

## 2 - 4 Le dispatcher

### 2 - 4.1 Rôle

Une équipe de personnes nommées dispatchers\* assure en continu la régulation du trafic ferroviaire par secteur géographique (Cf. Figure 19).

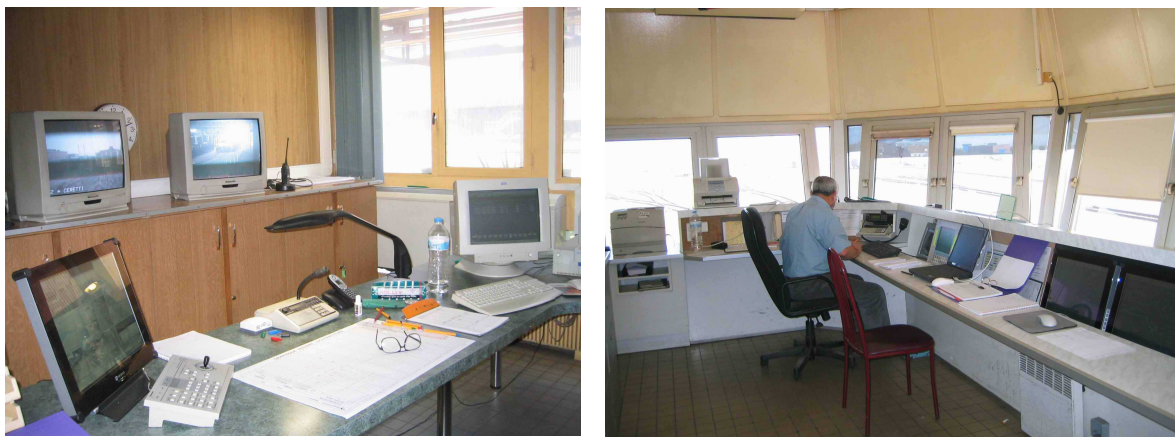


Figure 19 : Station de travail des dispatchers des secteurs Nord et Sud

Le dispatcher du secteur Nord assure la mise à disposition des ressources nécessaires et notamment des locotracteurs, pour la réalisation des demandes des ateliers, dans un contexte lié à la cadence des outils de production des Aciéries\* et du Train Continu à Chaud. Au niveau des Aciéries, le processus de fabrication des brames est un flux poussé conditionné par la phase de transformation continue des matières premières. Tandis qu'au niveau du Train Continu à Chaud, la cadence de laminage des brames est conditionnée par les commandes extérieures. On se trouve, ici, dans un contexte de flux tiré. De plus, le flux des brames entre les Aciéries et le TCC\* n'est pas toujours direct. Une partie des brames peut être stockée sur des parcs de stockages intermédiaires.

Le dispatcher du secteur Nord doit donc gérer ses ressources de manière à satisfaire au mieux ses deux clients principaux qui sont les Aciéries et le Train Continu à Chaud.

Il reçoit en temps réel toutes les demandes de prestations ferroviaires (EBF\*) émises par les ateliers à travers l'application SIMPLUS\*. Chaque demande consiste à évacuer ou à acheminer, par un locotracteur, un nombre de wagons dans une plage horaire spécifiée par les ateliers. En fonction de la charge de travail, des engins de manutention des ateliers qui ont une activité parallèle, de triage des brames ou, d'évacuation d'outils, les déchargements et les chargements de wagons peuvent s'étendre de vingt minutes à plusieurs heures. Pour des raisons de sécurité, le locotracteur n'est pas autorisé à stationner accroché à ses wagons pendant la manipulation des produits. Les wagons sont donc laissés sur les voies ferrées et les locotracteurs sont redirigés par le dispatcher vers d'autres manœuvres.

Le dispatcher doit donc gérer l'attribution des locotracteurs pour la réalisation de toutes les demandes EBF. De plus, on associe à ces demandes des niveaux d'urgence de réalisation se modifiant au cours du temps, des contraintes horaires au plus tôt et au plus tard, et des ressources matérielles et humaines limitées.

Au niveau du secteur Nord, le dispatcher effectue à l'aide de trois locotracteurs une réalisation moyenne de 25 demandes EBF par poste. Il dispose également d'un dispositif de neuf caméras implantées chez ses principaux ateliers qui lui permet d'avoir une vision générale de l'avancement des chargements et des déchargements de ses ressources. Cette information visuelle lui permet d'anticiper certaines manœuvres avant même la réception d'une demande EBF.

Le personnel opérationnel est réparti en cinq équipes travaillant par trois postes de huit heures. A chaque poste de travail, on compte un dispatcher, et dans chaque

locotracteur : un conducteur (CLO) qui gère la radio commande de la machine, et un accrocheur qui veille au bon attelage et au bon chargement des wagons. Cet équipage effectue à chaque prise de poste, environ une demi-heure de préparation du locotracteur et en fin de poste une demi-heure pour le transfert des informations avec l'équipe de relève. Ils ont également une pause casse-croûte de vingt minutes fixée à une heure donnée par le dispatcher qui varie en fonction de la charge de travail.

Le dispatcher est en liaison radio avec le CLO qui lui indique l'avancement des réalisations de chaque prestation ferroviaire : début de manœuvre, attente, fin de manœuvre, etc. Toutes les demandes EBF à réaliser dans les créneaux horaires réservés aux prises et aux fins de poste seront toujours différées et effectuées avec du retard. Cette information est connue de tous, ateliers et dispatchers.

## 2 - 4.2 Gestion informatique des EBF

A la réception d'une demande, le dispatcher évalue un créneau prévisionnel de réalisation compte tenu des informations qu'il est à même de prendre en compte : prévision de réalisation de la dernière demande, durée moyenne de réalisation, ressources matérielles disponibles, et temps de déplacement haut le pied\* entre deux manœuvres. Cette prévision représente l'engagement du service Mouvement. Elle est envoyée par voie informatique à l'atelier émetteur de la demande qui peut alors planifier ses plans de chargement des wagons en fonction de l'arrivée des ressources de transport (Cf. § 9 - 6).

Dès que les contraintes temporelles de délai de réalisation des manœuvres sont atteintes, le dispatcher informe le CLO des caractéristiques de la manœuvre qu'il doit réaliser : origine, destination, nombre de wagons à transporter.

Une fois la manœuvre terminée, il saisit dans l'application informatique, la plage horaire de réalisation de cette dernière (Cf. § 9 - 7). Si ces valeurs sont supérieures à la prévision qu'il avait estimée, la manœuvre est effectuée avec un certain retard par rapport à l'engagement du service Mouvement. Ce retard se répercute ensuite sur les prévisions des manœuvres suivantes.

De plus, si une manœuvre est effectuée avec un retard par rapport aux fenêtres de temps émises dans la demande par l'atelier, le dispatcher saisit un code de non-respect qui justifie cette plage de réalisation. Ces codes permettent de quantifier la part de responsabilité des ateliers ou du dispatcher pour le retard de la prestation (Cf. § 9 - 8). Par exemple, le code de



non-respect 05 concerne les EBF à réaliser pendant les fins de poste, le code 12 renseigne les retards engendrés suite à des attentes de fin de chargement, le code 06 stipule le retard des EBF dont l'urgence de réalisation est plus faible que d'autres manœuvres.

## CHAPITRE 3

# GESTION DU TRANSPORT FERROVIAIRE ET TOURNEES DE VEHICULES

<u>CHAPITRE 3</u>	<u>GESTION DU TRANSPORT FERROVIAIRE ET TOURNEES DE</u>	
<u>VEHICULES</u>		<u>41</u>
3 - 1	CARACTERISTIQUES DU SYSTEME D'AIDE A LA DECISION	43
3 - 2	PRESENTATION DES RESEAUX DE TRANSPORT	44
3 - 3	POSITIONNEMENT BIBLIOGRAPHIQUE	45
3 - 4	CLASSIFICATION DES PROBLEMES DE TRANSPORT	45
3 - 4.1	LE PROBLEME DU VOYAGEUR DE COMMERCE (PVC)	45
3 - 4.2	LE PROBLEME DE TOURNEES DE VEHICULES (PTV)	47
3 - 4.3	CARACTERISTIQUES DES TOURNEES DE VEHICULES	49
3 - 5	GESTION DU TRANSPORT FERROVIAIRE	51
3 - 5.1	ANALOGIE AVEC LE PROBLEME DE TOURNEES DE VEHICULE	51
3 - 5.2	TEMPS DE HAUT LE PIED	52
3 - 5.3	PRECEDENCES	52
3 - 5.4	DESCRIPTION FORMELLE	53
3 - 5.5	TAUX DE REPONSE ET RETARD	54
3 - 6	LE PROBLEME VRPTW	56
3 - 6.1	INTRODUCTION	56
3 - 6.2	ANALOGIE AVEC NOTRE SYSTEME DE TRANSPORT	56
3 - 6.3	FONCTIONS OBJECTIFS	58

Nous avons choisi de traiter notre problématique de transport industrielle par une méthode de recherche opérationnelle pour concevoir un système d'aide à la décision pour le dispatcher. Nous avons retenu une modélisation sous la forme d'un problème de tournées de véhicules avec fenêtres de temps qui permet de prendre en compte l'affectation de plusieurs locotracteurs pour la réalisation de demandes EBF contraintes par des fenêtres de temps. De plus, notre problème est soumis à un ensemble de contraintes supplémentaires comme des précédences entre manœuvres, des déplacements de locotracteurs sans wagon entre deux ateliers, et des distances asymétriques qui relient deux EBF successives compte tenu de la modélisation où une EBF représente en elle-même un déplacement entre deux ateliers.

Notre système possède deux critères à minimiser. Tout d'abord, nous cherchons à avoir un nombre minimum de demandes non effectuées avec un certain retard par rapport aux fenêtres de temps émises par les ateliers. Puis, dans le cas où ce premier critère serait identique pour deux solutions, nous cherchons à minimiser la durée cumulée des retards.

## **CHAPITRE 3 – GESTION DU TRANSPORT FERROVAIRE ET TOURNEES DE VEHICULES**

### **3 - 1 Caractéristiques du système d'aide à la décision**

Nous avons choisi de traiter notre problématique industrielle de transport par une méthode de recherche opérationnelle pour concevoir un système d'aide à la décision pour le dispatcher. Ce système va assister le dispatcher en lui proposant une affectation et un ordonnancement des demandes EBF sur les locotracteurs, avec le calcul des dates de réalisation de chaque prestation.

Nous avons retenu une modélisation sous la forme d'un Problème de Tournées de Véhicule (PTV\*) en assimilant un sommet à une manoeuvre, et un arc au trajet à vide parcouru par un locotracteur (un véhicule) pour enchaîner deux EBF. Cette représentation non naturelle des manoeuvres dans notre environnement de travail, permet de considérer autant les déplacements des locotracteurs avec wagons que ceux sans wagons (nommés déplacements haut le pied\*).

Dans un premier temps, nous avons traité une approche en deux phases : tout d'abord un problème d'affectation qui associe un locotracteur à une EBF, puis un problème d'ordonnancement qui détermine sur un locotracteur identifié, la date de réalisation de chaque EBF.

A partir de ce premier modèle, nous avons intégré de nouvelles contraintes opérationnelles telles que les plages horaires de réalisation des manoeuvres. Ces modifications nous ont amené à traiter un Problème de Tournées de Véhicules qui est une généralisation du PVC\* à plusieurs locotracteurs. Nous avons analysé plus particulièrement une extension de ce problème général : le Problème de Tournées de Véhicules avec fenêtre de temps. Il permet la construction d'un ensemble de tournées de locotracteurs pour la réalisation d'un ensemble de demandes ferroviaires soumises à des plages horaires de réalisation, et à des déplacements haut le pied\* entre deux ateliers.

Cependant, dans notre système, nous ne disposons pas de l'ensemble des manœuvres à réaliser. En effet, l'occurrence des demandes liée à la cadence des outils de production, est non prévisible et aléatoire. Chaque demande EBF est considérée comme une donnée d'entrée du système, à laquelle nous devons répondre en temps réel.

Pour cela, nous proposons un système d'aide à la décision qui construit une solution courante à partir de valeurs prédictives telles que les durées de réalisation, et les temps de haut le pied. Cette solution courante qui est de faible taille, est ensuite réajustée par des valeurs réalisées à de nouveaux instants décisionnels de calcul.

Notre système de transport ne consiste donc pas à construire un modèle général de VRPTW\*. Notre objectif, ici, est double. Nous voulons tout d'abord avoir une approche rigoureuse du système de manière à proposer des solutions même dans le futur contexte de production. Et, nous voulons disposer d'un système de suivi des manœuvres EBF afin de calculer des indicateurs de performance, comme le taux de satisfaction client.

## 3 - 2 Présentation des réseaux de transport

Le développement de nouvelles technologies et de l'informatique au cours des dix dernières années, a permis d'enrichir et d'améliorer les méthodes d'optimisation. Et par conséquent la gestion et la planification des réseaux de transport, sont un des éléments fondamentaux de la chaîne logistique. On estime en effet que les coûts de transport représentent plus de 45 % des coûts globaux de la logistique au sein d'une entreprise [Toth et Vigo 2002].

On peut mentionner de manière non exhaustive :

- dans l'industrie des Télécommunications, la détermination de la structure la plus économique du réseau permettant de satisfaire une demande de trafic prévisionnelle donnée. Il existe de nombreuses variantes de ce problème suivant que l'on adopte le point de vue des grands opérateurs de télécommunications, des réseaux d'entreprises ou, des réseaux d'abonnés privés
- dans l'industrie des transports, [Savelsbergh et Solomon 1998] l'optimisation des itinéraires et des tournées de véhicules. C'est dans ce domaine que se rencontrent de multiples variantes du fameux Problème dit du Voyageur de Commerce que nous allons étudier par la suite. Nous verrons que ce modèle va

nous permettre d'optimiser le déplacement d'un locotracteur pour la réalisation d'un ensemble d'EBF

## 3 - 3 Positionnement bibliographique

Etant donné la diversité des problèmes rencontrés, plusieurs caractéristiques sont considérées pour représenter un système de transport particulier. La première spécification venant à l'esprit, est le mode de transport utilisé. Ainsi, [Cordeau et al. 2001] s'intéressent au transport ferroviaire, tandis que [Savelsbergh et Solomon 1998] étudie les transports routiers, et [Andreatta et Brunetta 1998] le domaine aérien.

Une autre approche consiste à classer les problèmes selon trois niveaux :

- un niveau stratégique qui conçoit le réseau de transport et localise des installations
- un niveau tactique qui alloue des ressources existantes à moyen terme
- un niveau opérationnel qui manage des ressources au jour le jour dans un environnement dynamique

Bien que chaque décision dépende des décisions prises aux autres niveaux, les problèmes sont généralement découpés par niveaux. Notre problème d'affectation des locotraceurs pour la réalisation d'un ensemble d'EBF se situe à un niveau opérationnel dans le domaine des transports ferroviaires.

## 3 - 4 Classification des problèmes de transport

### 3 - 4.1 Le Problème du Voyageur de Commerce (PVC)

Le Problème du Voyageur de Commerce (PVC ou TSP pour Traveling Salesman Problem) s'énonce ainsi : un représentant de commerce doit vendre sa marchandise dans un certain nombre de villes. Il doit planifier sa tournée de manière à passer par toutes les villes en voyageant sur une distance totale minimale.

De nombreuses applications s'expriment directement sous forme d'un PVC, comme par exemple, les sujets d'optimisation de parcours et de séquençement (passage de trains sur une voie, service postal). Cependant, les problématiques industrielles de transport sont

souvent plus complexes que celles du Problème classique du Voyageur de Commerce. Mais, elles comportent la plupart du temps, des sous problèmes du type PVC. Notre système illustre parfaitement cette caractéristique. L'étude du Problème du Voyageur de Commerce est donc un préalable à la résolution des systèmes de transport particulier.

Le Problème du Voyageur de Commerce peut être envisagé avec des contraintes supplémentaires [Laburte 1998]. Les plus courantes viennent du domaine du transport considéré et sont liées soit à des contraintes temporelles, soit à des contraintes de capacité, soit les deux. La fonction objectif du PVC représente habituellement une distance géographique, mais elle peut aussi représenter un temps de trajet.

Si l'on particularise une ville comme ville de départ (un dépôt), et un début de tournée au temps zéro, on peut associer une heure de visite à chaque ville. Dans cette description temporelle du problème, on peut considérer alors deux types de contraintes supplémentaires.

On peut tout d'abord faire dépendre le temps de trajet entre deux endroits de l'heure à laquelle le trajet sera effectué. Cette formulation permet de rendre compte des situations d'embouteillages autour des grandes villes.

On peut ensuite contraindre les dates de visite en associant à chaque ville une fenêtre de temps pendant laquelle la tournée doit être réalisée. Ce problème nommé TSPTW (TSPTW pour Traveling Salesman Problem With Time Window) connaît de nombreuses variantes suivant ce que l'on cherche à optimiser : une date de fin, une distance géographique ou une somme des temps d'attente. Ce modèle illustre bien notre problématique où les locotracteurs doivent réaliser un ensemble de demandes ferroviaires soumises à une plage horaire de réalisation.

Par ailleurs, si l'on considère que le voyageur de commerce est un transporteur qui peut à chaque visite récolter et déposer de la marchandise (PDP pour Pickup and Delivery Problems) on est amené à considérer deux contraintes supplémentaires. D'une part des contraintes de précédences, qui peuvent interdire des trajets qui commenceraient par procéder à des livraisons avant de faire le moindre enlèvement. Et d'autre part, des contraintes de capacité vérifiant que l'on est capable physiquement de transporter toutes les marchandises.

Dans notre système, on retrouve la contrainte de précédence entre deux manœuvres : celle qui consiste à acheminer des wagons vides dans un atelier doit être précédée de celle qui consiste à évacuer des wagons pleins.

### 3 - 4.2 Le Problème de Tournées de Véhicules (PTV)

Etudions une généralisation du Problème du Voyageur de Commerce au cas de plusieurs voyageurs (MTSP pour Multiple Traveling Salesman Problem) [Landrieu 2001], où le voyageur est assimilé à un véhicule. Il s'agit, alors, de proposer un ensemble de tournées de véhicules, qui couvre la visite d'un ensemble de villes. En d'autres termes, pour notre système de transport, nous cherchons à construire un ensemble de tournées de locotracteurs pour la réalisation d'un ensemble d'EBF.

Dans ce problème, on ne cherche plus un cycle, mais un ensemble de cycles qui couvre tous les sommets du graphe Hamiltonien. Ces cycles sont définis ainsi :

- on particularise un sommet (un dépôt) d'où commence et où termine toutes les tournées
- on borne les longueurs de chacune des tournées par une constante  $M$
- on borne le nombre de tournées par un entier  $K$

On cherche alors à construire un ensemble de tournées vérifiant ces trois conditions, et dont la longueur totale (la somme des longueurs des tournées) soit minimale.

Dans notre problématique de transport, nous ne considérons pas cette phase de dimensionnement car la flotte des locotracteurs est fixe. Le modèle général du Problème de Tournées de Véhicules ne sera donc pas utilisé sous cette forme classique.

Pour modéliser facilement les applications réelles, nous devons souvent introduire des contraintes supplémentaires. Par exemple :

- on peut considérer plusieurs dépôts d'où peuvent commencer les tournées (MDVRP pour Multi Depot Vehicle Routing Problem), comme par exemple, pour les sociétés qui possèdent plusieurs plates-formes de stockage gérées indépendamment les unes des autres et avec leur propre flotte de véhicules. Cette caractéristique permet de gérer l'utilisation sur horizon glissant de notre



système, où les dépôts initiaux représentent les manœuvres en cours de réalisation.

- on peut associer à chaque ville une quantité de marchandises, à livrer ou à enlever (VRPPD pour Vehicle Routing Problems with Pickup and Delivery) et imposer qu'à chaque instant, le stock de marchandises enlevées le long de la route ne dépasse pas la capacité du véhicule.

On peut même considérer l'agencement physique des marchandises dans la remorque, et imposer que celles à livrer soient accessibles.

Dans notre système, la demande EBF émise par un atelier consiste à affecter un locotracteur pour l'évacuation ou l'acheminement de wagons. Nous n'avons donc pas de notion de capacité ou de stock à considérer.

- si la livraison d'un client d'une ville peut être effectuée par plusieurs véhicules, on parle alors de SPVRP (SPVRP pour Split Deliveries Vehicle Routing Problems).

Dans notre système, nous considérons que toutes les demandes EBF sont réalisées par un locotracteur unique. Elles ne peuvent donc être interrompues au cours de leur exécution.

- si on rajoute une contrainte de précedence comme par exemple un ordre fixé à l'avance des visites, on parle de VRPB (VRPB pour Vehicle Routing with Backhauls).

Dans notre système, nous considérons la contrainte de précedence uniquement pour la gestion des wagons : une évacuation de wagons chargés ne pourra se réaliser que si des wagons vides auront été acheminés au préalable.

- dans le problème classique du VRP, les tournées sont établies généralement sur une période d'une journée. Si on étend cette période à  $M$  jours, on parle alors de PVRP (PVRP pour Period Vehicle Routing Problem).

Dans notre société, les équipes opérationnelles travaillent en continu et par tranche de huit heures. Le système d'aide à la décision sera utilisé selon cette cadence de travail, de plus, il est conditionné par l'arrivée continue et aléatoire des demandes ferroviaires. Nous allons donc construire un système de planification des manœuvres à horizon glissant.

- enfin, dès que le problème comporte un aspect temporel, toutes les extensions du Problème de Tournées de Véhicule classique sont possibles : VRP with Time Windows (VRPTW\*), VRP with Pick-up and Deliveries and Time Windows (VRPPDTW), Multiple Depot VRP with Time Windows (MDVRPTW), Periodic VRP

with Time Windows (PVRPTW), Split Delivery VRP with Time Windows (SDVRPTW).

Dans le cas du modèle VRPTW, on peut considérer la distance comme un temps de trajet entre les villes et associer une fenêtre de temps contraignant la date de visite des villes (VRPTW pour Vehicle Routing Problem with Time Windows).

Cette extension permet de prendre en compte l'affectation de plusieurs locotracteurs pour la réalisation de demandes EBF contraintes par des fenêtres de temps. C'est cette modélisation qui a été retenue pour représenter notre problème de transport particulier.

Un aspect supplémentaire et spécifique à notre problème est le temps de haut le pied. Ce temps correspond au déplacement du locotracteur entre l'atelier de destination de la manœuvre précédente et l'atelier d'origine de la manœuvre suivante. Ce temps est notifié sur les arcs du graphe Hamiltonien et permet la construction d'une matrice symétrique des temps de déplacements à vides.

### 3 - 4.3 Caractéristiques des Tournées de Véhicules

Dans la table suivante (Figure 20), nous proposons une classification des Problèmes de Tournées de Véhicules.

Caractéristiques	Options possibles
Taille du parc de véhicules	un seul véhicule
	plusieurs véhicules
Type du parc de véhicules	homogène (un seul type de véhicule)
	hétérogène (plusieurs type de véhicules)
Emplacement des véhicules	un seul dépôt
	plusieurs dépôts
Nature des demandes des nœuds	demandes déterministe
	demandes stochastiques
	satisfaction partielle de la demande
Emplacement des demandes	aux nœuds
	aux arcs
	aux arcs et/ou aux nœuds
Restriction de capacités sur les véhicules	imposé et identique pour toutes les tournées
	imposé et différentes pour toutes les tournées
	non imposées
Longueur maximale d'une tournée	imposée et identique pour toutes les tournées
	imposée et non identique pour les tournées
	non déterminée
Temps maximal d'une tournée	imposé et identique pour toutes les tournées
	imposé et non identique pour les tournées
	non déterminé
Type de service	un seul type
	plusieurs mais unique pour un type de véhicule
	plusieurs pour un même véhicule
Contraintes horaires de service	imposées et préfixées
	spécifiées par un intervalle à un nœud
	non spécifiées
Distance entre les noeuds	euclidienne
	non euclidienne
	la même quelque soit la direction (symétrique)
	différente (asymétrique)

Figure 20 : Classification du VRP et de ses contraintes

Si nous regardons les extensions possibles du VRP classique, nous identifions un certain nombre de contraintes qui répondent à notre problème de transport ferroviaire. Nous avons :

- plusieurs locotracteurs homogènes et identiques
- un emplacement des locotracteurs à plusieurs dépôts (ateliers) où dans son utilisation sur horizon glissant, les ateliers représentent les EBF en cours de réalisation
- des demandes EBF non déterministes émises par les ateliers
- aucune restriction de capacité sur les locotracteurs car seule la ressource véhicule est gérée puisque celle des wagons est traitée par une règle de précedence

- aucune restriction de longueur et de temps maximal, car la gestion des horaires de travail du personnel s'effectue sous forme d'une demande EBF particulière (demande fin de poste, pause casse croûte)
- un seul type de service à savoir la réalisation d'une EBF
- des dates de début au plus tôt et de début au plus tard de réalisation de demandes émises par les ateliers
- des distances asymétriques pour relier deux EBF successives compte tenu de la modélisation de notre modèle où une EBF représente en elle-même un déplacement entre deux ateliers

## 3 - 5 Gestion du transport ferroviaire

### 3 - 5.1 Analogie avec le Problème de Tournées de Véhicule

Notre système de transport peut se modéliser sous la forme d'un Problème de Tournées de Véhicules en assimilant une ville à une EBF, et un véhicule à un locotracteur. Il s'agit alors, de proposer un ensemble de tournées de véhicules, qui couvre la visite d'un ensemble de villes. En d'autres termes, nous cherchons à construire un ensemble de tournées de locotracteurs pour la réalisation d'un ensemble de demandes EBF.

Nous avons vu qu'une EBF représente un déplacement orienté de convois\* constitué d'un locotracteur et de wagons entre deux ateliers, pour l'évacuation ou l'acheminement de wagons chargés ou vides. Ainsi, dans la représentation graphique de notre système, nous passons d'une représentation naturelle sous forme d'un graphe Eulérien à un graphe Hamiltonien où les demandes EBF sont représentées sur les sommets.

De plus, chaque sommet représente en lui-même un déplacement (Cf. Figure 21) avec une durée de réalisation particulière.

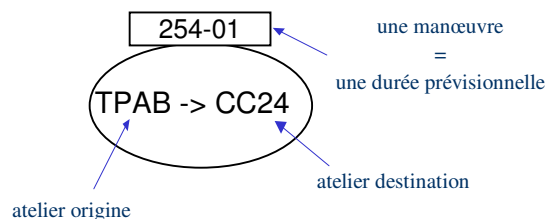


Figure 21 : Modélisation d'une manœuvre EBF

---

### 3 - 5.2 Temps de haut le pied

Pour enchaîner deux EBF, le locotracteur doit parcourir un certain trajet à vide (sans wagons), appelé parcours haut le pied. A ce parcours correspond un temps de trajet qui relie l'atelier de destination d'une manœuvre courante à l'atelier d'origine de la manœuvre suivante.

Toutefois, ce temps de haut le pied est différent suivant le sens de parcours entre deux manœuvres (Cf. Figure 22). Par exemple, la manœuvre 1 consiste à effectuer un déplacement depuis l'atelier A vers l'atelier B. La manœuvre 4, un déplacement de l'atelier C vers D. Si on enchaîne la manœuvre 1 suivie de la manœuvre 4, le temps de haut le pied  $C_{14} = 10$ , correspond au déplacement entre l'atelier B et l'atelier C. Par contre, enchaîner la manœuvre 4 suivie de la manœuvre 1, consiste à relier l'atelier D avec l'atelier A, soit un temps de haut le pied de  $C_{41} = 30$ .

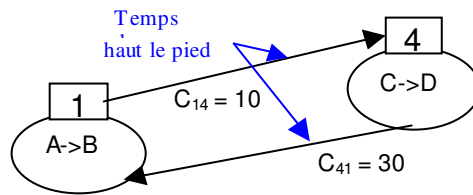


Figure 22 : Description des temps de haut le pied

La construction de la matrice des temps de haut le pied entre les différents ateliers est symétrique (le temps de parcours de A vers B ou de B vers A est identique), de dimension égale au carré du nombre d'ateliers soit  $34 \times 34$ . Cependant, les sommets de notre graphe étant des manœuvres et les arcs les parcours haut le pied entre deux manœuvres, nous avons à traiter, ici, un Problème de Tournées de Véhicules asymétrique. De plus, la configuration spécifique du réseau ferroviaire ne permet pas de respecter la contrainte d'inégalité triangulaire.

### 3 - 5.3 Précédences

Dans notre système, la précedence représente la gestion de la ressource des wagons. Chaque demande EBF émise par un atelier, consiste à évacuer ou à acheminer des wagons entre deux ateliers. Cependant, l'évacuation de wagons chargés, ne peut se réaliser que si des wagons vides ont été acheminés au préalable. Ces deux manœuvres sont codifiées par un code affaire\* identique mais par un code poste affaire\* différent.

La relation de précédence est ainsi exprimée dans la demande EBF. De plus, elle est indépendante de l'affectation des EBF sur les locotracteurs.

### 3 - 5.4 Description formelle

Considérons un ensemble de  $V$  ateliers où chaque atelier est émetteur d'une demande de prestation ferroviaire (EBF). Chaque demande représente un seul type de service à savoir un besoin en locotracteur pour l'évacuation ou l'acheminement d'un convoi\* de wagons d'un atelier vers un autre. De plus, elle n'est pas déterminée à l'avance car son occurrence est liée à la cadence des outils de production. Chaque déplacement du locotracteur pour la réalisation d'une EBF entre un atelier d'origine et un atelier de destination doit être effectué à l'intérieur d'une fenêtre temporelle spécifiée lors de la demande par l'atelier.

Nous pouvons construire un réseau représenté par un graphe orienté  $G = (V, A)$ .

L'ensemble des sommets  $V = \{v_1, \dots, v_n\}$  représente les EBF. Les liaisons ferroviaires reliant deux EBF sont symbolisées par les arcs  $(v_i, v_j) \in A$  auxquels sont associés les temps de haut le pied entre deux ateliers particuliers.

Chaque sommet  $v_i$  est caractérisé par :

- une durée moyenne de réalisation qui correspond à l'accrochage du locotracteur avec ses wagons, au contrôle du bon chargement des produits et au bon attelage des wagons entre eux et avec le locotracteur, au déplacement entre deux ateliers, au positionnement sur la voie ferrée de destination et au décrochage des wagons avec le locotracteur
- une fenêtre temporelle  $[a_i, b_i]$  déterminée et émise par l'atelier dans sa demande qui représente l'intervalle de temps pendant lequel la réalisation de l'EBF doit être effectuée. La variable  $a_i$  représente la date de début au plus tôt de réalisation et  $b_i$  la date de début au plus tard souhaitée par l'atelier  $v_i$

A chaque arc  $(v_i, v_j)$  est associé une durée qui correspond au temps moyen de déplacement haut le pied entre deux ateliers. Cette durée est différente suivant le sens de parcours de notre graphe compte tenu de la modélisation sous forme d'un PTV\* asymétrique.

L'ensemble des flux qui représente la charge de transport, est effectué par une flotte de  $K$  locotracteurs identiques  $\{1, \dots, K\}$ , sans restriction de capacité, interchangeables, et à vitesse unique de circulation.

Ces locotracteurs réalisent la charge de transport sous forme de deux types de déplacements :

- des déplacements sans wagon représentant les parcours haut le pied
- des déplacements avec wagons représentant la réalisation d'une EBF

L'objectif est de construire un ensemble de routes  $R = \{R_k, k=1, \dots, K\}$  que doit emprunter la flotte des locotracteurs. Chaque demande EBF est considérée comme une donnée d'entrée à laquelle on doit répondre en temps réel. Et, pour chaque locotracteur, la route est caractérisée par un ordonnancement sur un sous-ensemble de sommets du graphe  $R_i = (v_i, i=0, \dots, 2N)$ .  $R$  est construit de manière à satisfaire les contraintes suivantes :

- affectation : chaque tournée est réalisée par un locotracteur unique
- graphe Hamiltonien : chaque EBF est réalisée exactement une seule fois
- précédence : la mise en réalisation d'une EBF est conditionnée par la réalisation d'une EBF de précédence si elle existe
- fenêtres temporelles : la réalisation de chaque EBF doit être effectuée dans la fenêtre temporelle correspondante :
  - disponibilité : la date de début de réalisation d'une EBF est supérieure ou égale à  $a_i$
  - échéance : la date de fin de réalisation d'une EBF est inférieure ou égale à  $b_i$

### 3 - 5.5 Taux de réponse et retard

A chaque émission d'une demande EBF, l'atelier saisit une fenêtre de temps exprimée par une date au plus tôt et une date au plus tard de réalisation. Cette fenêtre représente la plage horaire durant laquelle il souhaite la réalisation de son EBF. Dans le cas où la manœuvre serait effectuée au-delà de la plage horaire émise par l'atelier, on considère que l'EBF est réalisée avec un certain retard.

Le suivi de ces retards permet d'évaluer les prestations ferroviaires et notamment le calcul du taux de satisfaction client. Celui-ci est lié à un type EBF qui est spécifié dans la demande par l'atelier.

Ces types sont au nombre quatre et symbolisent : des entrées de ressources (E), des manœuvres de constitution de train (M), des sorties de ressources (S) ou, des réservations d'unités pour des opérations de maintenance (R). On rappelle qu'une manœuvre représente

un déplacement orienté entre un atelier d'origine et un atelier de destination. Le type de manœuvre spécifie, ainsi, le besoin particulier de l'atelier.

Un atelier qui émet une demande d'évacuation de wagons (type S) souhaite que sa voie ferrée (atelier origine) soit libérée au plus tôt. L'heure d'arrivée des wagons à l'atelier de destination ne le préoccupe pas. La date de début de réalisation de la manœuvre trouve alors, ici, son importance.

On considère qu'une manœuvre de sortie de ressources (S) est en retard, si sa date de début de réalisation est supérieure à sa date de début au plus tard émise par l'atelier (Cf. Figure 23)

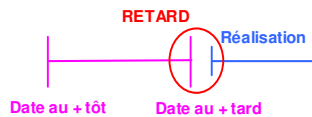


Figure 23 : Retard d'une manœuvre du type S

Tandis qu'un atelier qui émet une demande d'entrée de wagons (type E), ou de constitution ou de triage (M) ou, de réservation (R), souhaite que les wagons soient disponibles sur sa voie ferrée le plus tôt possible (atelier destination). La provenance des wagons (atelier origine) ne le préoccupe pas. Ici, c'est la date de fin de réalisation qui trouve son importance.

On considère qu'une entrée de ressources (E), une manœuvre de constitution ou de triage (M) ou une réservation de ressources (R), est en retard si sa date de fin de réalisation est supérieure à sa date au plus tard souhaitée par l'atelier (Cf. Figure 24)

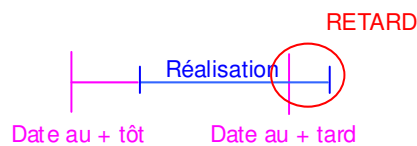


Figure 24 : Retard d'une manœuvre du type E, M ou R



## 3 - 6 Le problème VRPTW

### 3 - 6.1 Introduction

Le problème de tournées de véhicules avec fenêtres de temps est une généralisation du PTV\* pour lequel une contrainte temporelle est associée sur le service des clients. Chaque client dispose d'une fenêtre de temps à l'intérieur de laquelle il peut être desservi. Les dépôts initiaux disposent également d'une fenêtre de temps que l'on considère comme un Horizon de Service : son rôle est de fixer une plage horaire durant laquelle les véhicules peuvent réaliser leurs tournées.

Ce type de problème temporel permet de modéliser de nombreuses situations de la vie courante. On peut citer pour :

- le service postal, l'établissement de tournées pour les facteurs pour une distribution du courrier la plus efficace possible, mais aussi la réalisation de tournées pour le ramassage du courrier dans les boîtes aux lettres
- le service bancaire, la détermination de tournées pour les convoyeurs de fond pour la réalisation de la collecte des recettes des commerçants et des grandes surfaces
- le ramassage scolaire, l'établissement de parcours de bus pour amener les écoliers des points d'arrêt vers l'établissement scolaire
- la société ARCELOR, la détermination d'un ensemble de tournées de locotracteurs pour la réalisation d'un ensemble d'EBF soumises à des contraintes horaires de réalisation. Cette situation est le reflet de notre problématique de transport

### 3 - 6.2 Analogie avec notre système de transport

Notre système de transport peut se modéliser sous forme d'un Problème de Tournées de Véhicules avec fenêtres de temps (VRPTW\*) en considérant certaines analogies.

Si nous assimilons le locotracteur à un véhicule, la manœuvre à un client, les dates de début au plus tôt et de début au plus tard de réalisation aux fenêtres de temps, la durée d'une manœuvre au temps de service d'un client, et le temps de haut le pied au coût associé sur un arc, notre problème s'apparente au VRPTW.

Pour utiliser notre système sur un horizon glissant, il est nécessaire de disposer de plusieurs dépôts initiaux et d'un dépôt final unique. Les dépôts initiaux représentent les manœuvres en cours d'exécution, avec une borne inférieure de fenêtre de temps qui caractérise la durée restante de réalisation. Le dépôt final fictif peut être atteint à partir de tous les autres dépôts avec un temps de transport nul. En effet, les tournées que nous construisons ne sont jamais achevées.

Dans le tableau suivant (Figure 25) nous présentons les analogies réalisées avec les paramètres du modèle VRPTW.

Modèle VRPTW	Modèle de transport industriel
nombre total de véhicules	nombre total de locotracteurs
nombre total de clients	nombre total de manœuvres
client $i$ , où $i=1, 2, \dots, N$	manœuvre $i$ , où $i=1, 2, \dots, N$
le dépôt central initial	plusieurs dépôts initiaux
le dépôt central final	le dépôt final fictif
coût induit sur l'arête entre le sommet $i$ et $j$	coût induit sur les arcs
temps de parcours entre le sommet $i$ et $j$	temps de haut le pied associé à l'arc $(v_i, v_j)$
demande de ressource au sommet $i$	EBF associé au sommet $v_i$
capacité du véhicule $k$	pas de contrainte de capacité
borne inférieure de la fenêtre de temps du sommet $i$	date de début au plus tôt de réalisation de la manœuvre $i$
borne supérieure de la fenêtre de temps du sommet $i$	date de début au plus tard de réalisation de la manœuvre $i$

Figure 25 : Analogies avec le modèle VRPTW

A partir du modèle général, nous devons considérer plusieurs extensions pour modéliser notre système particulier.

Tout d'abord, la flotte des locotracteurs est homogène et chaque véhicule est utilisé au sein d'une seule tournée. Les clients étant assimilés à des manœuvres et les coûts sur les arcs représentant les temps de haut le pied, la notion de capacité associée aux véhicules n'existe pas. Nous avons vu, en effet, que la gestion des wagons est réalisée par une règle de précedence.

Une particularité supplémentaire est la présence de dates de début au plus tard et de dates butoirs. On autorise le dépassement de la date de début au plus tard de chaque manœuvre d'un retard maximal admissible qui est défini par une date butoir (Cf. Figure 26). Par exemple, les flux en sorties des outils de production ont une urgence de réalisation plus importante que les flux de manœuvres internes sur parcs de stockage. Plus une manœuvre sera urgente, plus son retard maximal admissible sera faible.

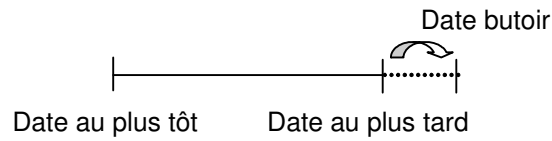


Figure 26 : Date butoir d'une EBF

Nous cherchons à définir un ensemble de tournées minimisant notre objectif principal d'optimisation, c'est-à-dire le nombre total de manœuvres en retard tout en respectant certaines contraintes : chaque manœuvre doit être réalisée exactement une seule fois et intégralement par un seul locotracteur, chaque tournée doit démarrer depuis un des dépôts initiaux pour prendre en compte l'horizon glissant, et terminer sa tournée à un dépôt final fictif.

### 3 - 6.3 Fonctions objectifs

Nous ne traitons pas, ici, la fonction objectif classique de minimisation de la fin de tournée, notée  $C_{\max}$ . Notre système possède deux critères à minimiser. Tout d'abord, nous cherchons à avoir un nombre minimum de demandes EBF effectuées avec un certain retard par rapport aux fenêtres de temps émises par les ateliers. Ce critère est noté conventionnellement  $\Sigma U$ . Puis, dans le cas où ce premier critère serait identique pour deux solutions, nous cherchons à minimiser la durée cumulée des retards. Ce dernier est noté  $\Sigma T$ .

Selon [T'Kindt et Billaut 2002], notre fonction de minimisation est du type Lex  $(\Sigma U, \Sigma T)$  où l'objectif est de minimiser le critère  $\Sigma U$  puis le critère  $\Sigma T$ .

# CHAPITRE 4

## METHODE DE RESOLUTION

<b>CHAPITRE 4</b>	<b>METHODE DE RESOLUTION</b>	<b>59</b>
4 - 1	INTRODUCTION	61
4 - 2	RESOLUTION EN DEUX PHASES	61
4 - 2.1	MODELE D’AFFECTATION	62
4 - 2.2	MODELE D’ORDONNANCEMENT	64
4 - 3	CHOIX DE LA METHODE DE RESOLUTION	67
4 - 4	PROCEDURE DE CONSTRUCTION DES TOURNEES	68
4 - 4.1	PRINCIPE GENERAL DE CONSTRUCTION	68
4 - 4.2	PARAMETRAGE DE LA PROCEDURE	70
4 - 4.2.1	Critères locaux	70
a	Coût de placement et coût d’affectation	71
□	Fin de tournée	71
□	Marge totale	72
b	Coût d’efficacité	72
4 - 4.2.2	Configuration des coûts	72
4 - 4.3	METHODOLOGIE DE CONSTRUCTION	74
4 - 4.4	EXEMPLE ILLUSTRATIF DE LA PROCEDURE DE CONSTRUCTION	75
4 - 5	PROCEDURE D’OPTIMISATION DES TOURNEES	80
4 - 5.1.1	Procédure d’échange 2 - opt	81
4 - 5.1.2	Procédure $\lambda$ -échange	83
4 - 5.1.3	Les stratégies de sélection d’une solution	83
4 - 5.1.4	Procédure d’optimisation	85
4 - 5.1.5	Exemple illustratif de la procédure d’optimisation	85
4 - 6	REAJUSTEMENT PREVISION/REALISATION	87
4 - 6.1	EXEMPLE DE REAJUSTEMENT DU PLANNING PREVISIONNEL	88
		<hr/>
		59

Dans une première approche du système, nous avons mis en œuvre une résolution en deux phases : tout d’abord, un problème d’affectation qui associe un locotracteur à une EBF, puis, un problème d’ordonnancement, qui détermine sur un locotracteur identifié, la date de réalisation de chaque EBF. Ces phases complémentaires ont donné de bons résultats sur des instances de faible taille. Or, l’arrivée aléatoire et au fil de l’eau des demandes EBF ne nous permet pas de quantifier la dimension maximale de notre système. De plus, le modèle d’ordonnancement s’appuie sur un modèle de PVC reconnu NP-Difficile dans la littérature.

Nous avons retenu une résolution coopérative qui combine une heuristique de construction parallèle des tournées qui fournit une solution réalisable, avec une heuristique d’amélioration des tournées qui repose sur l’échange de sommets entre les tournées. L’algorithme de résolution possède la particularité de considérer à la fois de nouvelles demandes EBF, de compléter des tournées déjà entamées, et de transformer des données prévisionnelles en données réalisées.

## CHAPITRE 4 – METHODE DE RESOLUTION

### 4 - 1 Introduction

Nous avons vu précédemment que le dispatcher traite en temps réel les demandes de manœuvres émises par les ateliers sous forme d'EBF. Ces requêtes qui représentent des déplacements de locotracteurs et de wagons sont à réaliser dans une plage horaire au plus tôt et au plus tard souhaitée par l'atelier. Nous avons proposé une modélisation de notre système sous forme d'un Problème de Tournées de Véhicules avec fenêtres de temps soumis à des contraintes particulières telles que précédences, type EBF, distances asymétriques.

A la réception de chaque Expression en Besoin Fer (EBF), le dispatcher évalue un créneau de réalisation de la manœuvre. Cette plage prévisionnelle est envoyée par voie informatique à l'atelier émetteur de l'EBF, qui peut alors planifier ses plans de chargements des wagons en fonction de l'arrivée des ressources de transport. Quand le dispatcher met en réalisation effective une manœuvre, ses dates réelles peuvent être différentes de la prévision qu'il avait estimée. Dans le cas où les valeurs réelles seraient supérieures à la prévision, la manœuvre est effectuée avec un certain retard, qui se répercute sur les prévisions des manœuvres suivantes.

Notre objectif, ici, n'est pas de diminuer le nombre de décisions réalisées par le dispatcher. Nous cherchons à lui proposer une affectation des EBF au sein des tournées des locotracteurs et à calculer les dates prévisionnelles de réalisation de chaque manœuvre.

### 4 - 2 Résolution en deux phases

Dans la première approche du système, nous avons choisi de résoudre le problème en deux phases : tout d'abord, un problème d'affectation qui associe un locotracteur à une EBF, puis, un problème d'ordonnancement, qui détermine sur un locotracteur identifié, la date de réalisation de chaque EBF. Nous ne considérons pas, ici, les fenêtres de temps et les règles de précédences associées aux manœuvres.

## 4 - 2.1 Modèle d'affectation

Nous considérons un ensemble de  $N$  EBF à réaliser par  $K$  locotracteurs. Chaque EBF  $i$  (avec  $i = 1, \dots, N$ ) a une durée de réalisation représentée par la variable  $p_i$ . On note  $x_{ik}$  la variable binaire égale à 1 quand la manœuvre  $i$  est affectée sur le locotracteur  $k$  (avec  $k = 1, \dots, K$ ). De plus, toutes les  $N$  EBF sont connues au départ.

Notre problème se modélise en un programme linéaire en nombres entiers de la façon suivante :

Min  $Z$

$$\sum_{k=1}^K x_{ik} = 1 \quad \forall i$$

$$\sum_{i=1}^N x_{ik} p_i \leq Z \quad \forall k$$

$$x_{ik} \in \{0, 1\}$$

La première contrainte indique que la réalisation de la manœuvre  $i$  par le locotracteur  $k$  ne peut s'effectuer qu'une seule fois. La deuxième indique que la durée totale d'exécution des manœuvres, sur chaque locotracteur doit être inférieure à une certaine quantité  $Z$ , que l'on cherche à minimiser.

Dans la littérature relative aux problèmes d'ordonnancement (Cf. § 8 - 4), le problème se ramène au cas de machines parallèles à vitesse identique. Ce type de problème est constitué de  $K$  machines identiques parallèles, qui doivent exécuter  $N$  tâches de durée  $p_i$  en une durée minimale notée conventionnellement  $C_{max}$ . Ce problème est noté dans la littérature  $P_N // C_{max}$ . Dans cette représentation, les machines symbolisent les locotracteurs, les tâches, les EBF, et  $Z$ , le  $C_{max}$ . La taille du problème est caractérisée par  $N + K$  contraintes et est définie par  $N * K$  variables où  $N$  varie suivant l'horizon de calcul.

### ❖ Exemple illustratif

On souhaite réaliser l'affectation de dix EBF ( $N = 1$  à 10) sur trois locotracteurs ( $K = 3$ ). Toutes les EBF sont distinctes, et dans le cas où plusieurs d'entre elles sont identiques (même code affaire\* et code poste affaire\*), nous leur attribuons un numéro différent (Cf. Figure 27).

EBF	Nb à réaliser	Atelier origine	Atelier destination	Durée	N° EBF
709-33	2	PAB1	PAB1	10	1,2
729-33	3	TPAB	PAB2	27	3,4,5
716-33	1	ESOL	PAB2	27	6
517-33	2	ESOL	CC24	27	7,8
516-09	1	CC24	WAGO	40	9
269-33	1	ESCA	TBOB	30	10

Figure 27 : EBF à affecter sur les 3 locotracteurs

Les équations en nombres entiers sont les suivantes :

- Pour les dix EBF :

$$X_{11} + X_{12} + X_{13} = 1$$

$$X_{21} + X_{22} + X_{23} = 1$$

$$X_{31} + X_{32} + X_{33} = 1$$

$$X_{41} + X_{42} + X_{43} = 1$$

$$X_{51} + X_{52} + X_{53} = 1$$

$$X_{61} + X_{62} + X_{63} = 1$$

$$X_{71} + X_{72} + X_{73} = 1$$

$$X_{81} + X_{82} + X_{83} = 1$$

$$X_{91} + X_{92} + X_{93} = 1$$

$$X_{10\ 1} + X_{10\ 2} + X_{10\ 3} = 1$$

- Pour les trois locotracteurs :

$$X_{11} p_1 + X_{21} p_2 + X_{31} p_3 + X_{41} p_4 + X_{51} p_5 + X_{61} p_6 + X_{71} p_7 + X_{81} p_8 + X_{91} p_9 + X_{10\ 1} p_{10} \leq Z$$

$$X_{12} p_1 + X_{22} p_2 + X_{32} p_3 + X_{42} p_4 + X_{52} p_5 + X_{62} p_6 + X_{72} p_7 + X_{82} p_8 + X_{92} p_9 + X_{10\ 2} p_{10} \leq Z$$

$$X_{13} p_1 + X_{23} p_2 + X_{33} p_3 + X_{43} p_4 + X_{53} p_5 + X_{63} p_6 + X_{73} p_7 + X_{83} p_8 + X_{93} p_9 + X_{10\ 3} p_{10} \leq Z$$

- Min Z

Nous utilisons un solveur pour la résolution de ce problème. Les dimensions du modèle sont faibles, c'est-à-dire 31 variables et 14 contraintes : la résolution nous permet d'obtenir une solution exacte en un temps de quatre secondes. Les résultats de l'affectation sont les suivants (Cf. Figure 28) :



Locotracteur	EBF affectées				Durée totale d'exécution
L1	5	7	10		84
L2	1	2	8	9	87
L3	3	4	6		81

Figure 28 : Résultats du modèle d'affectation

Le temps correspondant à une charge uniforme des locotracteurs, soit  $\sum_{i=1}^N p_i / 3 = 252 / 3 = 84$ , ne peut être obtenu seulement si on coupe les tâches, ce qui n'est pas possible dans notre problématique.

On peut noter que la valeur de  $Z$  représente uniquement les temps de transports des manœuvres sans tenir compte des temps de haut le pied nécessaires à l'enchaînement de deux EBF. Or, pour définir l'ordre de réalisation des EBF sur les locotracteurs, nous devons les considérer. Pour cela, nous allons chercher un ordonnancement des EBF qui minimise la durée totale de ces temps haut le pied sur les locotracteurs.

## 4 - 2.2 Modèle d'ordonnancement

Nous allons considérer, ici, l'analogie avec le classique Problème du Voyageur de Commerce. Nous pouvons alors, modéliser notre système en un programme linéaire.

On note par  $C_{ij}$  la matrice symétrique des temps de haut le pied. On introduit la variable binaire  $x_{ij}$  égale à 1 quand la manœuvre  $i$  est suivie de la manœuvre  $j$ . On définit également la variable  $O_i$  qui représente la position de la manœuvre  $i$  dans l'ordonnancement. Notre problème se modélise de la façon suivante :

$$\text{Min } \sum_{i,j} C_{ij} x_{ij}$$

$$\sum_{i=1}^{N+1} x_{ik} = 1, i \neq k$$

$$\sum_{j=1}^{N+1} x_{kj} = 1, j \neq k$$

$$O_j \geq O_k + x_{kj} - (N-2)(1-x_{kj}) + (N-3)x_{jk}, j > 1, j \neq k$$

$$O_k \leq N-1 - (N-2)x_{1k}, \forall k > 1$$

$$O_k \geq 1 + (N-2)x_{k1}, \forall k > 1$$

Les deux premières contraintes indiquent que la manœuvre  $i$  possède un seul successeur et un seul prédécesseur. La troisième contrainte permet de lier la position dans l'ordonnement d'une manœuvre par rapport à son successeur et son prédécesseur. Les deux dernières contraintes permettent de lier position et lien de la première et la dernière manœuvre. Nous cherchons à minimiser la durée totale des temps de haut le pied entre les NEBF.

❖ Exemple illustratif

Nous partons de l'ordonnement des EBF affectées sur le locotracteur L3 obtenu dans l'exemple illustratif du paragraphe 4 - 2.1.

Les manœuvres doivent respecter la matrice symétrique des temps de haut le pied suivante (Cf. Figure 29) :

	CC24	ESCA	ESOL	PAB1	PAB2	TBOB	TPAB	WAGO
CC24	0							
ESCA	45	0						
ESOL	15	40	0					
PAB1	10	30	10	0				
PAB2	10	30	10	15	0			
TBOB	15	20	5	15	15	0		
TPAB	15	35	15	15	15	20	0	
WAGO	25	30	5	25	25	5	25	0

Figure 29 : Matrice des temps de haut le pied

Le modèle du Problème du Voyageur de Commerce fixe la manœuvre de départ à la tâche n° 1. Pour relâcher cette contrainte nous avons créé une manœuvre fictive 0 de distance nulle avec toutes les autres EBF. Les équations en nombres entiers sont les suivantes :

- pour les manœuvres qui précèdent la manœuvre courante :

$$X_{21} + X_{31} + X_{41} = 1$$

$$X_{12} + X_{32} + X_{42} = 1$$

$$X_{13} + X_{23} + X_{43} = 1$$

$$X_{14} + X_{24} + X_{34} = 1$$

- pour les manœuvres qui succèdent la manœuvre courante :

$$X_{12} + X_{13} + X_{14} = 1$$

$$X_{21} + X_{23} + X_{24} = 1$$

$$X_{31} + X_{32} + X_{34} = 1$$

$$X_{41} + X_{42} + X_{43} = 1$$

- pour lier ordre et lien entre manœuvres :

$$O_3 \geq O_2 + 2 X_{23} - 1$$

$$O_4 \geq O_2 + 2 X_{24} - 1$$

$$O_2 \geq O_3 + 2 X_{32} - 1$$

$$O_4 \geq O_3 + 2 X_{34} - 1$$

$$O_2 \geq O_4 + 2 X_{42} - 1$$

$$O_3 \geq O_4 + 2 X_{43} - 1$$

- pour fixer l'ordre et le lien de la première et de la dernière manœuvre :

$$O_2 \leq 2 - X_{12}$$

$$O_3 \leq 2 - X_{13}$$

$$O_4 \leq 2 - X_{14}$$

$$O_2 \geq 1 + X_{21}$$

$$O_3 \geq 1 + X_{31}$$

$$O_4 \geq 1 + X_{41}$$

Nous considérons que tous les locotracteurs sont disponibles à l'instant zéro à l'atelier dénommé WAGO. La résolution de ce modèle par le solveur de programmation linéaire LINGO, nous permet d'obtenir les résultats suivants (Cf. Figure 30) :

Locotracteur	Ordonnancement des EBF				Valeur de la fonction de minimisation
L1	5	10	7		40
L2	8	1	2	9	25
	8	2	1	9	
L3	3	4	6		30
	3	6	4		
	4	3	6		
	4	6	3		

Figure 30 : Résultats du modèle d'ordonnancement

Cette première modélisation simplifiée repose sur un solveur de programmation linéaire que la société ne possède pas et dont on souhaite s'affranchir. Nous devons intégrer à cette

modélisation les aspects temporels, c'est à dire les fenêtres de temps et l'arrivée aléatoire des demandes EBF. Nous avons construit, ici, des algorithmes de construction progressive de solutions.

## 4 - 3 Choix de la méthode de résolution

De nombreuses méthodes de résolution sont présentées dans la littérature. L'annexe 9 - 9 en présente une synthèse.

Nous avons choisi de mettre en œuvre la combinaison d'une heuristique de construction parallèle des tournées qui fournit une solution réalisable, avec une heuristique d'amélioration des tournées qui repose sur l'échange de sommets entre les tournées.

La procédure de construction des tournées que nous utilisons, fait référence aux travaux de [Solomon 1987] et d'[Antes et Derigs 1995]. Elle permet d'obtenir une planification réalisable et prévisionnelle des EBF sur les locotracteurs, compte tenu des informations dont on dispose : l'état actuel des manœuvres en cours de réalisation, la matrice des temps moyens de haut le pied, et les caractéristiques des manœuvres.

L'algorithme de résolution que nous avons mis en œuvre est unique tout au long de la procédure de construction. Il construit un ensemble de tournées, en parallèle et en temps réel. Il possède également la particularité de considérer à la fois de nouvelles demandes EBF, de compléter des tournées déjà entamées et de transformer des données prévisionnelles en données réalisées. En effet, la solution courante proposée, s'appuie sur des données prévisionnelles mais, des instants décisionnels de calcul réajustent ces valeurs en données réalisées.

Cette heuristique de construction est basée sur un ensemble de coûts locaux que nous avons paramétré et qui définissent la qualité de la solution proposée. La méthode de résolution mise en œuvre, est donc, prédictive et réactive.

Dans le cas où la solution fournie contiendrait au moins un retard, nous utilisons une procédure d'amélioration des tournées qui s'appuie sur les travaux de [Thangiah et al. 1996] et de [Potvin et Rousseau 1995]. Cette heuristique vise à réduire notre critère principal d'optimisation, soit le nombre total d'EBF en retard, puis notre critère secondaire, la somme des durées des retards. Elle repose sur deux méthodes de recherche locale successives qui

permettent d'obtenir de bons résultats sur les critères d'optimisation. Tout d'abord, une procédure d'échange 2 – opt qui divise et échange des sous-ensembles de tournées, puis une méthode de descente qui utilise une insertion systématique et l'échange d'un sous-ensemble d'EBF entre les tournées.

## 4 - 4 Procédure de construction des tournées

### 4 - 4.1 Principe général de construction

Notre objectif, ici, est la construction d'un ensemble de tournées pour une flotte de locotracteurs, tout en minimisant notre critère principal d'optimisation, c'est-à-dire le nombre total d'EBF non effectuées dans les plages horaires souhaitées par les ateliers, et en respectant les contraintes temporelles suivantes. Chaque manœuvre est soumise à deux bornes supérieures de fenêtres de temps : une date de début au plus tard définie par les ateliers dans la demande EBF, et une date butoir définie dans les caractéristiques de chaque manœuvre qui correspond au retard maximal admissible (Cf. Figure 26). Cette date butoir nous permet de qualifier l'urgence de réalisation des EBF : une manœuvre de triage de wagons sur un parc de stockage a un retard maximal admissible plus élevé qu'une manœuvre d'évacuation d'outil de production par laquelle l'urgence de réalisation est beaucoup plus importante car elle a un impact fort sur la cadence de production.

Nous utilisons un algorithme de construction de tournées qui est un algorithme de liste. Cet algorithme contient trois phases de classement des manœuvres, à exécuter à partir de trois critères différents, qui seront décrits dans la partie 4 - 4.2.2. Il est appliqué suivant la nécessité, sur trois jeux successifs de données d'entrée, qui sont : les fenêtres temporelles des manœuvres, les dates butoirs des manœuvres et une extension de ces dates butoirs, conformément au schéma de la Figure 31. La solution ainsi obtenue, avec cet algorithme de construction, peut être améliorée par des procédures d'échanges, décrites au paragraphe 4 - 5.

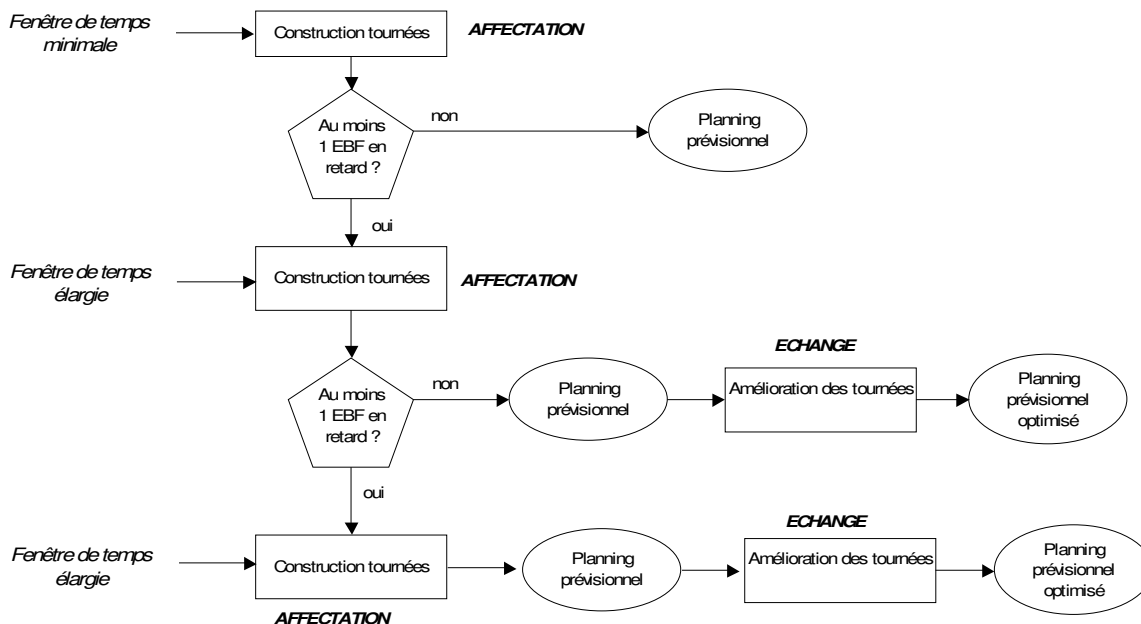


Figure 31 : Mises en œuvre de la procédure de construction des tournées

Dans une première phase, la procédure de construction des tournées est appliquée avec les fenêtres de temps initiales qui caractérisent la manœuvre et qui sont émises dans les demandes par les ateliers. Si la solution obtenue est sans retard, elle est conservée comme telle.

Si aucune solution ne peut être construite sans retard lors de cette première phase, on exécute une nouvelle fois cette procédure de construction (phase deux) à partir des dates butoirs des manœuvres. Le retard dit relatif correspond au retard mesuré par rapport à cette nouvelle fenêtre de temps.

Et, dans le cas où aucune solution ne serait réalisable sans retard après augmentation de ces fenêtres de temps, on augmente dans une troisième phase, la borne supérieure de la fenêtre d'un pourcentage lié au retard maximum admissible, jusqu'à l'obtention d'une solution réalisable. Ce pourcentage permet de conserver le degré d'urgence de réalisation entre les manœuvres.

A noter, si le retard maximal admissible est nul, c'est-à-dire que l'on n'autorise aucun retard sur la manœuvre, on augmente dans la troisième phase, la fenêtre de temps d'une minute supplémentaire à chaque itération. En effet, cette manœuvre « bloque » la procédure de construction si elle ne peut être ordonnancée sans retard. Pour fournir une solution

réalisable, on relâche alors cette contrainte de date butoir nulle. En effet, notre heuristique de construction qui est du type glouton, nous oblige à considérer toutes les demandes EBF selon le même critère.

## 4 - 4.2 Paramétrage de la procédure

Nous disposons d'une maquette [Legroux 2003] dans laquelle la procédure de construction des tournées est mise en œuvre d'après une généralisation des travaux d'[Antes et Derigs 1995]. Ces auteurs proposent une méthode de construction à base de liste d'EBF qui repose sur un ensemble de coûts locaux qui définissent la qualité de la solution fournie. Ces coûts paramétrables sont au nombre de trois et déterminent les étapes successives de la procédure. Nous les avons adapté à notre problématique industrielle de transport. Tout d'abord, un coût de placement qui ordonnance la prochaine manœuvre sur chaque locotracteur. Puis, un coût d'affectation qui permet de connaître la meilleure EBF restante à ordonnancer sur chaque locotracteur. Et enfin, un coût d'efficacité qui sélectionne le meilleur locotracteur pour les EBF restantes.

L'ensemble de ces coûts sont décrits et déterminés dans le chapitre 4 - 4.2.1.

La maquette que nous avons à disposition contient l'ensemble de ces coûts que nous devons paramétrer.

Tout d'abord, le coût de placement. Il est caractérisé par deux critères :

- la fin de tournées qui représente la date de fin de réalisation d'une EBF
- la marge totale qui représente le retard admissible du début de réalisation de l'EBF qui n'entraîne aucun retard

Ensuite, le coût d'affectation qui est caractérisé par les mêmes critères que ceux présentés précédemment. Et enfin, le coût d'efficacité qui privilégie les temps de transport par rapport au temps de haut le pied.

### 4 - 4.2.1 Critères locaux

Les paramètres mis en jeu dans la définition des coûts locaux sont les suivants :

- $a_i$  = date au plus tôt de la manœuvre  $i$ , *i.e* borne inférieure de la fenêtre de temps
- $b_i$  = date au plus tard de la manœuvre  $i$ , *i.e* borne supérieure de la fenêtre de temps

- $p_i$  = durée de réalisation de la manœuvre  $i$
- $d_i$  = date de disponibilité du locotracteur à l'atelier de destination de la manœuvre  $i$
- $C_{ij}$  = temps de haut le pied entre la manœuvre  $i$  et la manœuvre  $j$
- $MT_i$  = marge totale de la manœuvre  $i$
- $T_m$  = durée de temps mort de disponibilité d'une manoeuvre

Pour chaque critère local, nous nous plaçons à un instant de calcul de l'ordonnancement, et nous supposons que la dernière opération exécutée ou en cours d'exécution sur le locotracteur, est la manœuvre  $j$ , et, nous envisageons le positionnement de la manœuvre  $i$ .

### a Coût de placement et coût d'affectation

Les critères locaux qui déterminent le coût de placement et le coût d'affectation sont identiques. Le coût de placement est utilisé par la première EBF sur chaque locotracteur à la suite de la manœuvre en cours, tandis que le coût d'affectation est utilisé pour placer les autres EBF. Nous disposons de deux critères : la fin de tournée et la marge totale.

#### ❖ Fin de tournée

La fin de tournée représente la date de fin de réalisation de la dernière manœuvre ordonnancée (Cf. Figure 32).

$$\left[ \begin{array}{c} \text{Fin} \\ \text{tournée} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{Date disponibilité locotracteur à} \\ \text{l'atelier de destination EBF } j \end{array} + \begin{array}{c} \text{Haut le pied entre } i \text{ et} \\ \text{atelier origine EBF } j \end{array} + \begin{array}{c} \text{Durée de} \\ \text{réalisation} \\ \text{EBF } i \end{array} + \begin{array}{c} \text{Temps} \\ \text{mort} \end{array} \right]$$

Soit,  $d_i = d_j + C_{ji} + p_i + T_m$  = fin de tournée prévisionnelle de l'EBF  $i$

Le temps mort considère la date de disponibilité de la manœuvre  $i$ , c'est-à-dire l'intervalle de temps qui sépare la date au plus tôt de  $i$  et la fin de réalisation de la manœuvre  $j$ . Soit,  $T_m = \text{Max} \{ 0, a_i - d_j - C_{ji} \}$

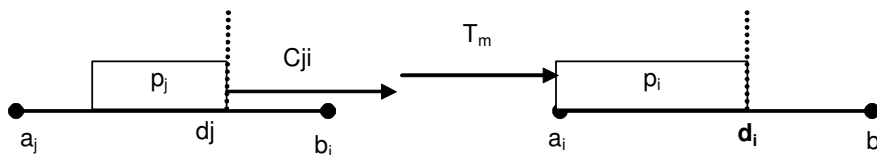


Figure 32 : Critère local = Fin réalisation



Si la manœuvre  $i$  ne peut être réalisée dans le créneau horaire souhaité par l'atelier, soit  $d_j + C_{ji} > b_i$ , le coût de placement est fixé à une valeur très grande, et l'affectation n'est pas retenue. Dans l'autre cas, le coût de placement est fixé à  $d_j$ .

❖ **Marge totale**

La marge totale d'une EBF représente le retard admissible du début de réalisation de la manœuvre qui n'entraîne aucun retard (Cf. Figure 33).

$$\left[ \begin{array}{c} \text{Marge} \\ \text{totale} \end{array} \right] = \text{Date au plus tard EBF } i - \left[ \begin{array}{c} \text{Date disponibilité locotracteur à} \\ \text{l'atelier de destination EBF } j \end{array} + \text{Haut le pied entre } i \text{ et atelier origine EBF } j \right]$$

Soit,  $MT_i = b_i - (d_j + C_{ji}) =$  marge totale prévisionnelle de l'EBF  $i$

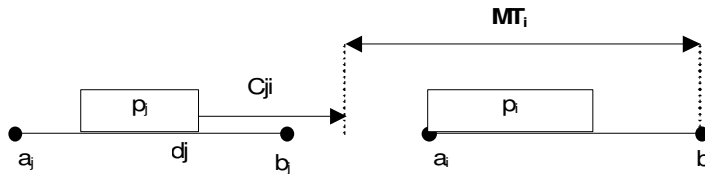


Figure 33 : Critère local = Marge totale

Si la manœuvre  $i$  ne peut être réalisée dans le créneau horaire souhaité par l'atelier soit  $d_j + C_{ji} > b_i$ , le coût de placement est fixé à une valeur très grande, et l'affectation n'est pas retenue. Dans l'autre cas, le coût de placement est fixé à  $MT_i$ .

**b Coût d'efficacité**

Ce coût détermine l'efficacité de l'affectation d'une EBF sur un locotracteur. Nous disposons d'un critère unique qui privilégie les temps de transport par rapport au temps de haut le pied.

$$\left[ \begin{array}{c} \text{Efficacité} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{Coût} \\ \text{affectation} \end{array} - \left[ \begin{array}{c} \text{Haut le pied} \\ \text{entre EBF } j \text{ et} \\ \text{EBF } i \end{array} \right] \right]$$

**4 - 4.2.2 Configuration des coûts**

Pour paramétrer notre maquette avec les critères locaux, nous avons réalisé 50 tests sur des historiques de données de production réelles (Cf. § 9 - 10). Chaque test correspond à un horizon de planification d'un poste de travail de huit heures. On ne tient pas compte de

l'aspect temps réel dans ces tests, et notamment de l'arrivée aléatoire et en temps réel des demandes. Ainsi, chaque test est constitué de la liste globale des EBF réalisées par le dispatcher sur un poste de travail identifié. La procédure de construction se base sur l'ensemble des EBF, de leurs fenêtres de temps, des valeurs prévisionnelles, et des ateliers mis en jeu.

Nous avons étudié quatre configurations particulières :

CAS 1	CAS 2	CAS 3	CAS 4
Placement = Marge totale	Placement = Fin de tournée	Placement = Marge totale	Placement = Fin de tournée
Affectation = Fin de tournée	Affectation = Fin de tournée	Affectation = Marge totale	Affectation = Marge totale

Nous avons constitué une table résultat qui évalue les performances de chaque configuration, en terme de nombre d'EBF en retard et de somme des durées des retards.

Le tableau ci-dessous est un échantillon représentatif des résultats des quatre configurations (Cf. Figure 34).

POSTE	Nb Total	CAS 1		CAS 2		CAS 3		CAS 4	
		Placement = Marge totale		Placement = Fin de tournée		Placement = Marge totale		Placement = Fin de tournée	
		Affectation = Fin de tournée		Affectation = Fin de tournée		Affectation = Marge totale		Affectation = Marge totale	
		Nb	Durée Totale	Nb	Durée Totale	Nb	Durée Totale	Nb	Durée Totale
2	12	0	0	0	0	0	0	0	0
3	18	4	111	5	145	4	197	4	197
2	17	2	72	1	28	7	224	6	143
3	17	4	124	3	69	7	168	6	113
1	13	0	0	0	0	0	0	0	0
2	31	10	284	6	154	13	428	13	428
1	23	9	418	9	308	17	730	19	1761
2	14	3	62	4	94	5	145	5	182
3	24	8	394	11	393	19	1232	17	923

Figure 34 : Echantillon représentatif des résultats des quatre configurations

Sur les 50 essais réalisés, les configurations : cas 1 ou cas 2 améliorent toujours le critère principal d'optimisation par rapport aux cas 3 et 4. L'analyse du critère secondaire, soit la somme des durées des retards, montre que la configuration 1 donne les meilleurs résultats d'optimisation globaux.

Nous avons donc paramétré notre maquette avec un coût de placement basé sur la marge totale, et un coût d'affectation basé sur la fin de réalisation. Cette configuration permet d'appréhender l'aspect temps réel de notre système. En effet, la marge totale permet de prendre en compte le placement des EBF peu anticipées et dont l'urgence de réalisation est sensible. Tandis que la fin de tournée permet de libérer au plus tôt les locotracteurs, et donc d'être disponibles pour la réalisation de nouvelles demandes EBF.

## 4 - 4.3 Méthodologie de construction

L'algorithme de construction des tournées peut maintenant être présenté comme suit. Nous rappelons que la construction se réalise en temps réel. Les dates de disponibilités des locotracteurs ne sont donc pas nécessairement identiques à l'instant zéro.

- Etape 1 = Placement
  - Ordonner les locotracteurs par ordre croissant de numérotation
  - Ordonner les demandes EBF par ordre croissant de marge totale sur chaque locotracteur
  - Ordonner cette liste de manière à respecter les contraintes de précédences entre les manœuvres
  - Ordonner la première EBF de la tournée de chaque locotracteur en sélectionnant une à une les EBF ordonnées
  - Appliquer l'étape 2 aux EBF restantes de la liste ordonnée
- Etape 2 = Affectation
  - Ordonner chaque demande EBF par ordre croissant de fin de tournée sur chaque locotracteur
- Etape 3 = Efficacité
  - Affecter la demande EBF ordonnée sur le locotracteur dont l'efficacité est maximale
- Etape 4 = Test d'arrêt
  - Si toutes les demandes sont affectées, fin de la procédure.  
Sinon, appliquer l'étape 2 sur les demandes EBF restantes

Nous pouvons noter que notre procédure ne cherche pas à minimiser le nombre de locotracteurs en service. En effet, la flotte des locotracteurs est fixe, et nous cherchons à uniformiser la charge de travail de chaque équipe (conducteur et accrocheur).

## 4 - 4.4 Exemple illustratif de la procédure de construction

Nous sommes le 29/02/2004, il est 13 h 30. Nous avons deux locotracteurs disponibles (n° 1 et n° 2) à leur atelier de maintenance nommé WAGO, et quatre demandes EBF sont à ordonnancer. Aucune manœuvre n'est en cours de réalisation.

Les manœuvres identifiées par les codes affaire et codes poste affaire 515-01, 720-01, 518-33 et 717-01, n'ont aucune règle de précédences à respecter. Elles ont les caractéristiques suivantes (Cf. Figure 35) :

Au niveau de la demande				Caractéristiques			
Identifiant EBF	Date au plus tôt	Date au plus tard	Type	Atelier origine	Atelier destination	Durée moyenne de réalisation	Retard maximal admissible
515-01	13h45	14h15	M	CC24	PAB3	19	0
720-01	13h35	14h30	M	PAB3	TPAB	19	60
518-33	13h30	14h00	M	PAB2	CC24	13	120
717-01	14h00	14h55	M	PAB3	SNCF	39	30

Figure 35 : Manœuvres EBF à ordonnancer

Le tableau ci-dessous représente la matrice des temps moyens de haut le pied des ateliers mis en jeu dans cet exemple (Cf. Figure 36). Nous rappelons que cette matrice est symétrique.

	CC24	PAB2	PAB3	TPAB	SNCF	WAGO
CC24	0					
PAB2	10	0				
PAB3	10	10	0			
TPAB	15	15	5	0		
SNCF	25	35	25	30	0	
WAGO	25	25	20	25	12	0

Figure 36 : Matrice des temps de haut le pied

Lors de la première étape de placement de la construction des tournées, nous cherchons à obtenir une solution sans retard absolu par rapport aux fenêtres de temps initiales émises par les ateliers.

Lors de la première étape de la procédure de construction (Cf. Figure 37), on ordonne tout d'abord les EBF par ordre croissant de marge totale.

Chapitre 4 – Méthode de résolution

Au niveau de la demande				Coût de placement		
Identifiant EBF	Date au plus tôt	Date au plus tard	Type	Date disponibilité locotacteur	Haut le pied entre WAGO et EBF	Marge totale
515-01	13h45	14h15	M	13h30	25	<b>20</b>
720-01	13h35	14h30	M	13h30	20	<b>40</b>
518-33	13h30	14h00	M	13h30	25	<b>5</b>
717-01	14h00	14h55	M	13h30	20	<b>65</b>

Figure 37 : Construction = Phase 1. Etape 1 = Placement

Les deux locotracteurs étant disponibles à la même date, les coûts de placements sont identiques quels que soient le locotacteur.

Les EBF ordonnées par ordre croissant de marge totale et par locotacteur sont :

518-33 / 515-01 / 720-01 / 717-01

Les EBF de cette liste ne sont pas soumises à une contrainte de précédence entre elles, la liste ordonnée reste donc la même.

On sélectionne la première EBF de la liste ordonnée, à savoir 518-33, et on la place sur le premier locotacteur ordonné, soit n° 1 (Cf. Figure 38).

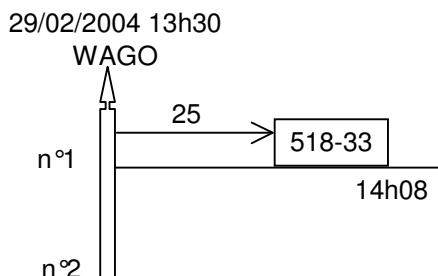


Figure 38 : Construction = Phase 1. Etape 1 = Placement

La manœuvre 518-33, de type M, a une fin de réalisation supérieure à sa date au plus tard souhaitée. Elle a un retard de 8 minutes, la construction n'est donc pas réalisable sans retard absolu. On passe alors à la deuxième phase de la procédure.

On augmente les fenêtres de temps de chaque EBF d'une valeur égale à son retard maximal admissible, qui définit sa date butoir. On cherche à construire une solution sans retard relatif, par rapport à ces nouvelles fenêtres (Cf. Figure 39).

Chapitre 4 – Méthode de résolution

Au niveau de la demande				Coût de placement		
Identifiant EBF	Date au plus tôt	Date butoir	Type	Date disponibilité locotracteur	Haut le pied entre WAGO et EBF	Marge totale
515-01	13h45	14h15	M	13h30	25	20
720-01	13h35	15h30	M	13h30	20	100
518-33	13h30	16h00	M	13h30	25	125
717-01	14h00	15h25	M	13h30	20	95

Figure 39 : Construction = Phase 2. Etape 1 = Placement

Les EBF ordonnées par ordre croissant de marge totale et par locotracteur sont :

515-01 / 717-01 / 720-01 / 518-33

On sélectionne la première EBF de la liste ordonnée, à savoir 515-01, et on la place sur le premier locotracteur ordonné, soit n° 1 (Cf. Figure 40).

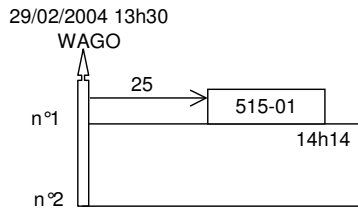


Figure 40 : Construction = Phase 2. Etape 1 = Placement EBF Locotracteur n° 1

La manœuvre 515-01, de type M, a une fin de réalisation inférieure à sa date butoir, la construction sans retard relatif est donc possible. Cependant, nous évaluons les retards des manœuvres par rapport aux dates émises dans la demande des ateliers. Ici, la manœuvre 515-01, de type M, a une fin de réalisation inférieure à sa date au plus tard souhaitée (14 h 15). Elle n'a donc aucun retard.

Dans cette première phase, nous avons choisi d'affecter une manœuvre supplémentaire à chaque locotracteur afin d'équilibrer la charge sur l'ensemble des locotracteurs. La manœuvre 717-01 est donc placée sur ce dernier (Cf. Figure 41).

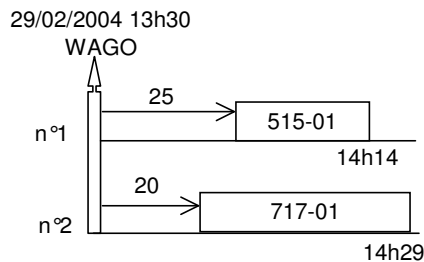


Figure 41 : Construction = Phase 2. Etape 1 = Placement EBF Locotracteur n° 2

La manœuvre 717-01, de type M, a une fin de réalisation inférieure à sa date butoir, la construction sans retard relatif est donc possible. De plus, sa fin de réalisation est inférieure à sa date au plus tard souhaitée (14 h 55), elle n'a donc aucun retard.

Les deux premières EBF de chaque locotracteur ont été sélectionnées, l'étape de placement est donc terminée. On va maintenant chercher à affecter les EBF restantes de manière à minimiser la fin des tournées (Etape 2 de la procédure de construction). Nous avons maintenant à considérer les manœuvres suivantes (Cf. Figure 42) :

Au niveau de la demande				Coût d'affectation - Locotracteur n°1				Coût d'affectation - Locotracteur n°2			
Identifiant EBF	Date au plus tôt	Date au plus tard	Type	Date disponibilité locotracteur	Haut le pied entre PAB3 et EBF	Durée EBF	Fin tournée	Date disponibilité locotracteur	Haut le pied entre SNCF et EBF	Durée EBF	Fin tournée
720-01	13h35	14h30	M	14h14	0	19	<b>14h33</b>	14h29	25	19	<b>15h13</b>
518-33	13h30	14h00	M	14h14	10	13	<b>14h37</b>	14h29	35	13	<b>15h17</b>

Figure 42 : Construction = Phase 2. Etape 2 = Affectation

Si nous ordonnons chaque EBF par ordre croissant de fin de tournée sur chaque locotracteur, nous avons :

720-01 = Locotracteur n° 1 / Locotracteur n° 2

518-33 = Locotracteur n° 1 / Locotracteur n° 2

Le locotracteur n° 1 permet la réalisation des deux EBF pour une fin de tournée minimale. Lors de l'étape 3 de la construction, nous allons évaluer l'efficacité maximale des affectations sur chaque locotracteur (Cf. Figure 43).

Au niveau de la demande				Coût d'efficacité - Locotracteur n° 1		
Identifiant EBF	Date au plus tôt	Date au plus tard	Type	Fin tournée	Haut le pied entre PAB3 et EBF	Coût d'efficacité
720-01	13h35	14h30	M	14h33	0	<b>14h33</b>
518-33	13h30	14h00	M	14h37	10	<b>14h27</b>

Figure 43 : Construction = Phase 2. Etape 3 = Efficacité

L'affectation de la manœuvre 720-01 sur le locotracteur n° 1 est la plus efficace car elle privilégie un temps de transport nul (Cf. Figure 44).

Nous avons ainsi :

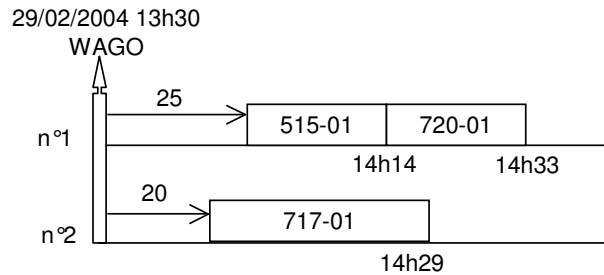


Figure 44 : Construction = Phase 2. Etape 3 = Efficacité EBF Locotracteur n° 1

La manœuvre 720-01, de type M, a une fin de réalisation inférieure à sa date butoir, la construction sans retard relatif est donc possible. Par contre, sa fin de réalisation est supérieure à sa date au plus tard souhaitée (14 h 30), elle a donc un retard de 3 minutes.

Nous sélectionnons la dernière EBF de notre liste à savoir 518-33, et nous réitérons notre procédure depuis l'étape 2 d'affectation (Cf. Figure 45).

Au niveau de la demande				Coût d'affectation - Locotracteur n° 1				Coût d'affectation - Locotracteur n° 2			
Identifiant EBF	Date au plus tôt	Date au plus tard	Type	Date disponibilité locotracteur	Haut le pied entre TPAB et PAB2	Durée EBF	Fin tournée	Date disponibilité locotracteur	Haut le pied entre SNCF et PAB2	Durée EBF	Fin tournée
518-33	13h30	14h00	M	14h33	15	13	15h01	14h29	35	13	15h17

Figure 45 : Construction = Phase 2. Etape 2 = Affectation

Si nous ordonnons la manœuvre 518-33 par ordre croissant de fin tournée sur chaque locotracteur, nous avons :

$$518-33 = \text{Locotracteur n° 1} / \text{Locotracteur n° 2}$$

L'ordonnancement est donc le suivant (Cf. Figure 46) :

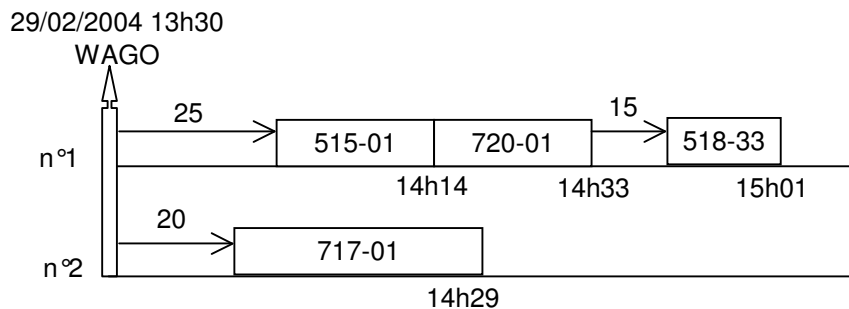


Figure 46 : Construction = Phase 2. Etape 3 = Efficacité EBF Locotracteur n° 1



La manœuvre 518-33, de type M, a une fin de réalisation inférieure à sa date butoir, la construction sans retard relatif est donc possible. Par contre, sa fin de réalisation est supérieure à sa date au plus tard souhaitée (14 h 00), elle a donc un retard de 61 minutes.

Le planning prévisionnel de charge obtenu nous donne une solution réalisable avec deux EBF en retards et une somme des durées des retards de 64 minutes.

Lors de cette phase prédictive de notre méthode de résolution, nous avons obtenu un planning prévisionnel de charge des locotracteurs, après avoir trié les EBF selon une règle de priorité basée sur l'urgence de réalisation.

Cependant, cet ordonnancement qui comporte des retards, peut être amélioré par une procédure d'optimisation globale qui tente de réduire les deux critères d'optimisation.

## 4 - 5 Procédure d'optimisation des tournées

La procédure de construction des tournées que nous avons décrite précédemment fournit une solution réalisable en s'appuyant soit :

- sur les fenêtres temps des manœuvres émises par les ateliers
- sur les fenêtres de temps augmentées d'une valeur égale à la date butoir qui représente le retard maximal admissible
- sur les fenêtres de temps basées sur les dates butoirs et augmentées d'un pourcentage lié au retard maximal admissible

Pour une solution donnée, si le planning prévisionnel comporte au moins un retard, nous appliquons une procédure d'optimisation globale qui cherche à réduire nos deux critères d'optimisation : le nombre d'EBF en retards et la durée totale des retards (Cf. Figure 47). Cette procédure repose sur l'échange de sommets entre les tournées et s'appuie sur deux méthodes de recherche locale. Elle s'inspire des travaux de [Thangiah et al. 1996] et [Tan et al. 2000]. Son efficacité est déterminée par la richesse et par la manière dont est exploré le voisinage de la solution courante.

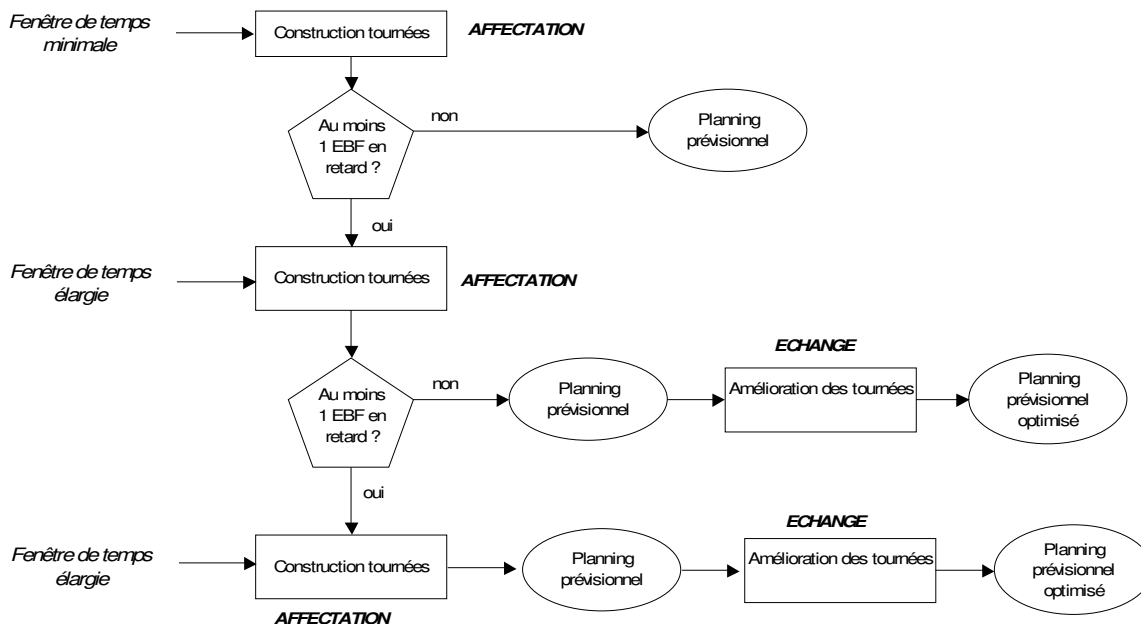


Figure 47 : Méthode de résolution = Construction et Amélioration de tournées

Dans une première étape, nous appliquons une procédure d'échange 2 - opt sur une solution dite courante, qui correspond au planning prévisionnel de charge. Cette procédure explore le voisinage de la solution courante et sélectionne une nouvelle solution qui améliore les critères d'optimisation. Puis, dans une deuxième étape, nous appliquons une procédure  $\lambda$  - échange. La combinaison de ces deux heuristiques donne de bons résultats [Thangiah et al. 1996].

#### 4 - 5.1.1 Procédure d'échange 2 - opt

La procédure d'échange 2 - opt coupe initialement deux tournées, en supprimant un lien dans chacune d'elles. Les points de divisions sont effectués à mi-durée de chacune des tournées (Cf. Figure 48).

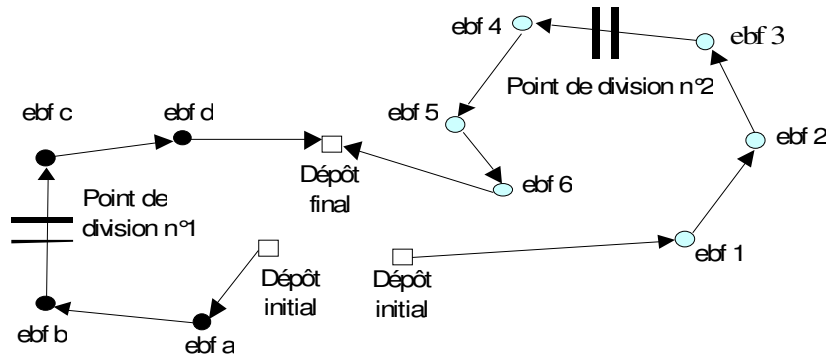


Figure 48 : Points de divisions des tournées

On échange ensuite les EBF entre ces deux tournées. Le premier ensemble d'EBF de la première tournée est lié au dernier ensemble d'EBF de la seconde tournée, et le premier ensemble d'EBF de la seconde tournée est lié au dernier ensemble d'EBF de la première tournée (Cf. Figure 49).

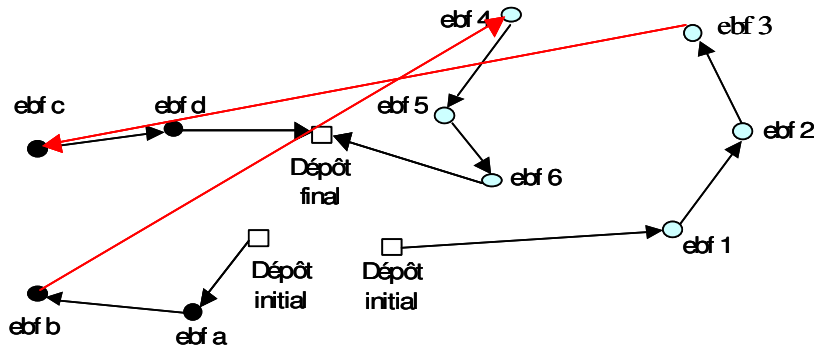


Figure 49 : Echange des tournées

Les deux tournées obtenues après l'échange 2 - opt sont toujours soumises aux contraintes temporelles du système. Cependant, cet échange ne garantit pas le respect de ces contraintes et donc que la solution soit réalisable. Pour cela, on applique une méthode  $\lambda$  - échange qui améliore cette nouvelle configuration et qui fournit une solution réalisable optimisée.

#### 4 - 5.1.2 Procédure $\lambda$ - échange

La méthode  $\lambda$  - échange est une méthode de descente de recherche locale qui utilise une insertion systématique et un échange de sous-ensemble d'EBF entre les tournées. Par commodité de programmation, seuls les opérateurs 1 - échange et 2 - échange sont utilisés : ils autorisent l'insertion et l'échange simultané d'une ou deux EBF.

Nous avons mis en œuvre un ordre d'exploration qui s'appuie sur la séquence des huit opérateurs suivant :

$$(0,1), (1,0), (1,1), (0,2), (2,0), (1,2), (2,1), (2,2)$$

L'opérateur (1,0) insère une EBF d'une tournée vers une autre. L'opérateur (1,1) quant à lui échange simultanément une EBF entre deux tournées distinctes. Tandis que, l'opérateur (1,2) échange simultanément une EBF d'une première tournée et deux EBF d'une seconde entre deux tournées distinctes.

Etant donné la dimension faible de notre problème, nous allons explorer toutes les possibilités d'insertion des EBF pour chaque opérateur et au sein de chaque tournée de locotracteurs.

#### 4 - 5.1.3 Les stratégies de sélection d'une solution

Une stratégie de sélection permet d'accepter ou de rejeter une solution générée dans le voisinage de la solution courante. A chaque solution générée nous évaluons sa faisabilité. Et, la solution courante que l'on considère, ici, est le planning prévisionnel de charge obtenu par la procédure de construction des tournées.

Il existe deux stratégies, celles de :

- « Meilleure amélioration » qui génère toutes les solutions et qui sélectionne celle qui améliore au maximum les critères d'optimisation de la solution courante
- « Première amélioration » qui génère des solutions et qui sélectionne la première qui améliore les critères d'optimisation de la solution courante

La procédure d'optimisation fait appel tout d'abord à la procédure d'échange 2 – opt, puis, à la procédure  $\lambda$  - échange, qui explore toutes les possibilités d'insertion des EBF.

Nous avons ainsi retenu la stratégie de « première amélioration » pour la procédure d'échange 2 – opt, et étudié deux configurations particulières pour la stratégie de sélection de la procédure  $\lambda$  - échange. Nous avons réalisé 50 tests sur des historiques de données de production réelles (Cf. § 9 - 11). Les données industrielles utilisées sont les mêmes que celles employées pour le paramétrage des critères locaux.

Les configurations étudiées sont les suivantes :

CAS 1	CAS 2
Procédure 2 - opt	Procédure 2 - opt
<i>Première amélioration</i>	<i>Première amélioration</i>
Procédure $\lambda$ - échange	Procédure $\lambda$ - échange
<i>Première amélioration</i>	<i>Meilleure amélioration</i>

La figure ci-dessous est une illustration représentative des résultats des deux configurations (Cf. Figure 50).

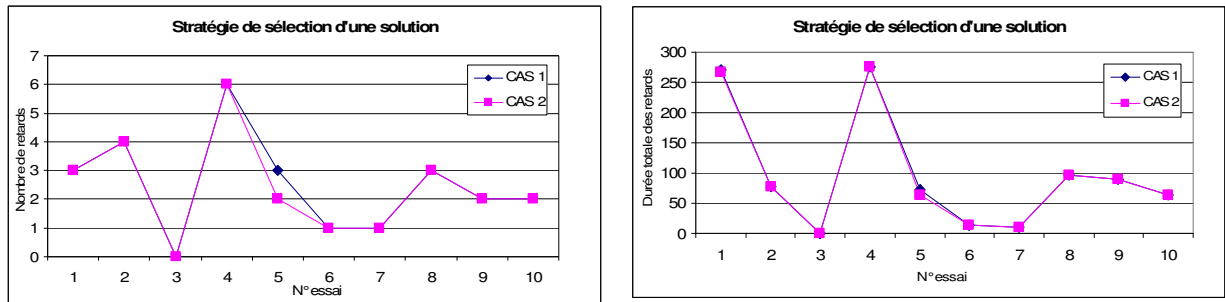


Figure 50 : Illustration représentative des résultats des deux configurations

Sur les 50 essais réalisés, nous remarquons que les solutions générées donnent des résultats d'optimisation globaux sensiblement égaux.

Nous avons choisi de paramétrer notre maquette avec un critère d'arrêt de la procédure 2 - opt sur la « première amélioration », et un critère d'arrêt de la procédure  $\lambda$  - échange sur la « meilleure amélioration ».

Cette configuration permet d'explorer au maximum le voisinage de la solution courante dans la dernière étape de la procédure d'optimisation globale. Cela permet de repousser la rencontre d'un minimum local et l'arrêt de l'exploration du voisinage de la solution courante.

#### 4 - 5.1.4 Procédure d'optimisation

L'algorithme d'optimisation des tournées peut maintenant être présenté comme suit.

- Etape 1 = Evaluation de la solution courante
  - Evaluer les deux critères d'optimisation : nombre d'EBF en retards et somme des durées des retards
- Etape 2 = Procédure d'échange 2 - opt
  - Effectuer les points de division à mi-durée de chacune des tournées
  - Sélectionner deux tournées par ordre croissant de numérotation, et échanger les EBF entre-elles
  - Sauvegarder la première solution qui diminue le critère principal d'optimisation de la solution courante ou, qui diminue le critère secondaire d'optimisation dans le cas où le critère principal ne peut être amélioré
- Etape 3 = Procédure  $\lambda$  - échange
  - Appliquer la séquence des opérateurs suivante: (0,1), (1,0), (1,1), (0,2), (2,0), (1,2), (2,1), (2,2) sur toutes les EBF et entre toutes les tournées
  - Evaluer la faisabilité de chaque solution générée
  - Sauvegarder la solution qui diminue au maximum le critère principal d'optimisation de la solution courante ou, qui diminue au maximum le critère secondaire d'optimisation dans le cas où le critère principal ne peut être amélioré

#### 4 - 5.1.5 Exemple illustratif de la procédure d'optimisation

Nous allons illustrer cette étape d'amélioration des tournées à partir de la solution courante obtenue lors de la procédure de construction des tournées (paragraphe 4 - 4.4), (Cf. Figure 51).

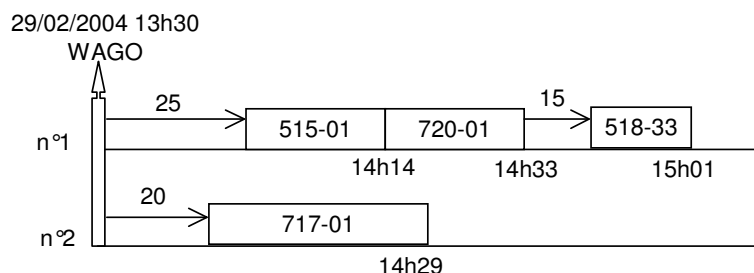


Figure 51 : Solution courante

Cette solution courante comporte deux EBF en retard avec une somme des durées des retards de 64 minutes.

Si nous appliquons la procédure d'échange 2 - opt sur cette solution, aucun ordonnancement des manœuvres n'améliore nos critères d'optimisation. Elle reste donc notre solution courante.

Lors de la procédure  $\lambda$  - échange, nous explorons le voisinage de cette solution en appliquant la séquence des opérateurs d'insertion et d'échange. Nous rappelons que ces opérateurs sont au nombre de huit : (0,1), (1,0), (1,1), (0,2), (2,0), (1,2), (2,1), (2,2).

Utilisons tout d'abord l'opérateur (1,0). Il sélectionne une EBF de la tournée du locotracteur n° 1 et l'insère dans la tournée du locotracteur n° 2. Trois EBF peuvent être sélectionnées : 515-01, 720-01 et 518-33. Elles peuvent être insérées à deux positions différentes : EBF / 717-01 ou 717-01 / EBF. Néanmoins, aucune de ces douze configurations possibles ne diminue nos critères d'optimisation.

L'exécution entière de la séquence des opérateurs nous permet de sélectionner la solution qui diminue au maximum les critères d'optimisation. Le planning prévisionnel optimisé est obtenu grâce à l'opérateur (2,1) qui permute les manœuvres 720-01 et 518-33 du locotracteur n° 1 avec la manœuvre 717-01 du locotracteur n° 2 (Cf. Figure 52).

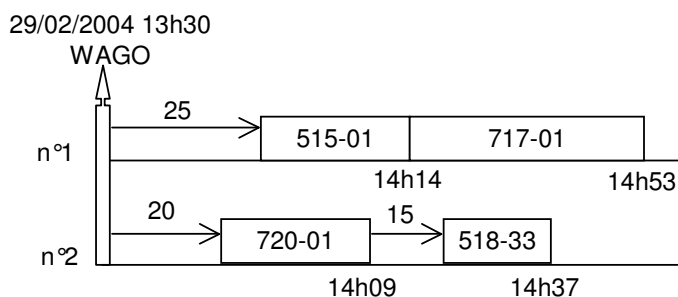


Figure 52 : Planning prévisionnel optimisé

Le planning prévisionnel de charge optimisé comporte une seule EBF en retard (518-33) d'une durée de 37 minutes. La solution proposée a considérablement diminué nos critères d'optimisation.

## 4 - 6 Réajustement prévision/réalisation

A ce niveau de résolution du problème, nous avons un planning prévisionnel optimisé qui représente la charge d'une flotte de locotracteurs constitué d'un ensemble d'EBF.

Dès que les contraintes temporelles de délai de réalisation des manœuvres sont atteintes, le dispatcher informe le conducteur du locotracteur des caractéristiques de la manœuvre qu'il doit réaliser : origine, destination, nombre de wagons. Une fois la manœuvre terminée, l'EBF est soldée.

Le planning réalisé résultant, s'appuie ainsi, sur le planning prévisionnel établi lors de la procédure de construction des tournées. Il est modifié par la fin de réalisation des manœuvres qui déterminent des durées réelles qui peuvent être différentes des prévisions. De plus, ce planning complète les tournées déjà entamées avec l'arrivée en temps réel de nouvelles EBF. Nous pouvons alors nous interroger sur le comportement du planning prévisionnel compte tenu des valeurs observées qui découlent et qui sont différentes des prévisions.

Nous avons déterminé deux instants de calcul non connus à l'avance, où le système comme le dispatcher, doivent prendre de nouvelles décisions.

Tout d'abord, à l'arrivée d'une nouvelle demande EBF afin de la prendre en compte dans l'ordonnancement avec son urgence de réalisation le cas échéant.

Et ensuite, à la fin de la réalisation du planning prévisionnel d'un locotracteur, alors que des demandes EBF sont encore en attente de réalisation. On considère que l'exécution des EBF se réalise dans l'ordre du planning prévisionnel, et qu'il ne peut être modifié que lorsque l'un de ces instants décisionnels se produit.



## 4 - 6.1 Exemple de réajustement du planning prévisionnel

Nous allons illustrer cette phase de réajustement du planning prévisionnel à partir de la solution proposée par la procédure d'amélioration des tournées (paragraphe 4 - 5.1.5).

Nous avons un planning prévisionnel de charge optimisé qui comprend une EBF en retard d'une durée de 37 minutes (Cf. Figure 53).

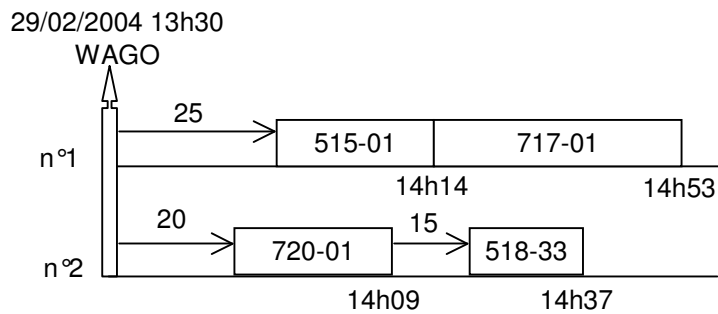


Figure 53 : Planning prévisionnel optimisé

A 13 h 30, les contraintes temporelles de début de réalisation des manœuvres 515-01 et 720-01 sont atteintes. Elles sont donc mises en réalisation à 13 h 30. On considère que les temps de haut le pied nécessaires à l'exécution de ces deux manœuvres sont inclus dans le temps global de la réalisation. De plus, on considère qu'une EBF entamée ne peut être interrompue dans sa réalisation. Elle est soldée quand sa date de fin de réalisation est atteinte. Cependant, il n'est pas possible de connaître à l'avance cette date réelle de fin de manœuvre, mais seulement son estimation calculée en fonction des durées moyennes.

A 13 h 40, une nouvelle demande EBF est émise. La manœuvre 515-33 de type M, est à réaliser au plus tôt à 14 h 00 et au plus tard à 14 h 30 (Cf. Figure 54). De plus, cette manœuvre doit être précédée de la manœuvre 515-01.

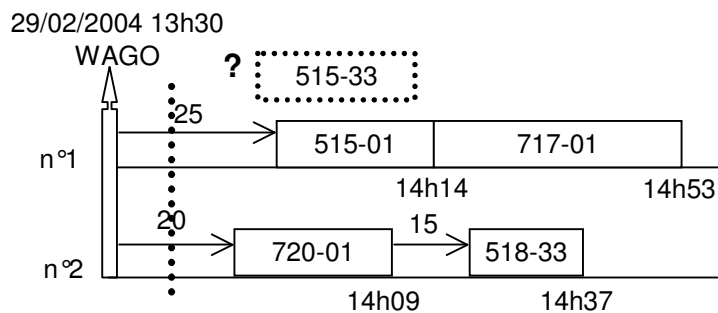


Figure 54 : Arrivée nouvelle EBF

Pour considérer cette nouvelle demande dans notre ordonnancement, nous relançons une optimisation du système à la date de soumission de l'EBF, soit 13 h 40. Nous prenons en compte le fait que deux manœuvres soient en cours de réalisation : le locotracteur n° 1 est disponible en moyenne dans 34 min soit 14 h 14 à l'atelier de destination de la manœuvre 515-01 soit PAB3, et le locotracteur n° 2 dans 29 min à 14 h 09 à l'atelier de destination de la manœuvre 720-01 soit TPAB.

Nous avons maintenant trois manœuvres à considérer et à ordonnancer : 717-01, 518-33 et 515-33.

Elles ont les caractéristiques suivantes (Cf. Figure 55) :

Au niveau de la demande				Caractéristiques				
Identifiant EBF	Date au plus tôt	Date au plus tard	Type	Atelier origine	Atelier destination	Durée moyenne de réalisation	Retard maximal admissible	Précédence
518-33	13h30	14h00	M	PAB2	CC24	13	120	518-01
717-01	14h00	14h55	M	PAB3	SNCF	39	30	XXX
515-33	14h00	14h30	M	PAB3	CC24	17	0	515-01

Figure 55 : Manœuvres EBF à ordonnancer

On peut remarquer que cette nouvelle EBF est une manœuvre dont la date au plus tard souhaitée est proche de sa date de soumission, et elle dispose d'un retard maximal admissible nul. Elle a donc une urgence de réalisation importante.

Lors de la première étape de la procédure de construction des tournées, nous ordonnons tout d'abord les EBF par ordre croissant de marge totale (Cf. Figure 56).

Au niveau de la demande				Coût de placement - Locotracteur n° 1			Coût de placement - Locotracteur n° 2		
Identifiant EBF	Date au plus tôt	Date au plus tard	Type	Date disponibilité locotracteur	Haut le pied entre PAB3 et EBF	Marge totale	Date disponibilité locotracteur	Haut le pied entre TPAB et EBF	Marge totale
518-33	13h30	14h00	M	14h14	10	-24	14h09	15	-24
717-01	14h00	14h55	M	14h14	0	41	14h09	5	41
515-33	14h00	14h30	M	14h14	0	16	14h09	5	16

Figure 56 : Construction = Phase 1. Etape 1 = Placement

On remarque que la marge totale est négative pour l'une des EBF quelque soient le locotracteur, la construction n'est donc pas réalisable sans retard absolu. On passe alors à la deuxième étape de la procédure.

On augmente les fenêtres de temps de chaque EBF d'une valeur égale à son retard maximal admissible, qui définit sa date butoir. On cherche à construire une solution sans retard relatif par rapport à ces nouvelles fenêtres (Cf. Figure 57).

## Chapitre 4 – Méthode de résolution

Au niveau de la demande				Coût de placement - Locotracteur n° 1			Coût de placement - Locotracteur n° 2		
Identifiant EBF	Date au plus tôt	Date butoir	Type	Date disponibilité locotracteur	Haut le pied entre PAB3 et EBF	Marge totale	Date disponibilité locotracteur	Haut le pied entre TPAB et EBF	Marge totale
518-33	13h30	16h00	M	14h14	10	<b>96</b>	14h09	15	<b>96</b>
717-01	14h00	15h25	M	14h14	0	<b>71</b>	14h09	5	<b>71</b>
515-33	14h00	14h30	M	14h14	0	<b>16</b>	14h09	5	<b>16</b>

Figure 57 : Construction = Phase 2. Etape 1 = Placement

Les EBF ordonnées par ordre croissant de marge totale est identique sur chaque locotracteur, soit : 515-33 / 717-01 / 518-33.

L'EBF 515-33 de cette liste est soumise à une contrainte de précedence avec la manœuvre 515-01. Or, cette EBF de précedence est déjà placée sur le locotracteur n° 1, la liste ordonnée reste donc inchangée.

On sélectionne la première EBF de la liste ordonnée, à savoir 515-33, et on la place sur le premier locotracteur ordonné, soit n° 1 (Cf. Figure 58).

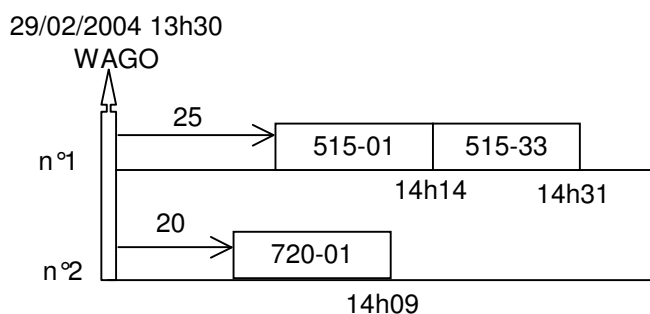


Figure 58 : Construction = Phase 2. Etape 1 = Placement EBF Locotracteur n° 1

La manœuvre 515-33, de type M, a une fin de réalisation inférieure à sa date butoir, la construction sans retard relatif est donc possible. Mais, sa fin de réalisation est supérieure à sa date au plus tard souhaitée (14 h 30), elle a donc un retard de 1 minute.

On sélectionne ensuite la deuxième EBF de la liste ordonnée soit 717-01, et on la place sur le locotracteur n° 2 (Cf. Figure 59).

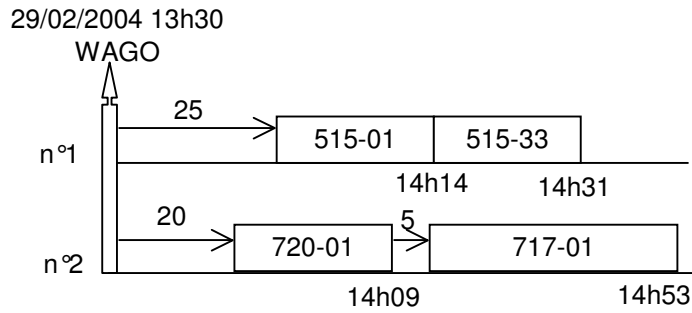


Figure 59 : Construction = Phase 2. Etape 1 = Placement EBF Locotracteur n° 2

La manœuvre 717-01, de type M, a une fin de réalisation inférieure à sa date butoir, la construction sans retard relatif est donc possible. De plus, sa fin de réalisation est inférieure à sa date au plus tard souhaitée (14 h 55), elle n'a donc aucun retard.

Les deux premières EBF de chaque locotracteur ont été sélectionnées, l'étape de placement est donc terminée. On cherche maintenant à affecter l'EBF restante de manière à avoir une fin de tournée minimale. Ces caractéristiques sont les suivantes (Cf. Figure 60) :

Au niveau de la demande				Coût d'affectation - Locotracteur n° 1				Coût d'affectation - Locotracteur n° 2			
Identifiant EBF	Date au plus tôt	Date au plus tard	Type	Date disponibilité locotracteur	Haut le pied entre CC24 et PAB2	Durée EBF	Fin tournée	Date disponibilité locotracteur	Haut le pied entre SNCF et PAB2	Durée EBF	Fin tournée
518-33	13h30	14h00	M	14h31	10	13	14h54	14h53	35	13	15h41

Figure 60 : Construction = Phase 2. Etape 2 = Affectation

L'affectation de la manœuvre 518-33 sur le locotracteur n° 1 donne une fin de tournée minimale. Nous avons aucun autre choix pour cette affectation : cette EBF est donc la plus efficace sur ce locotracteur.

Nous avons ainsi (Cf. Figure 61) :

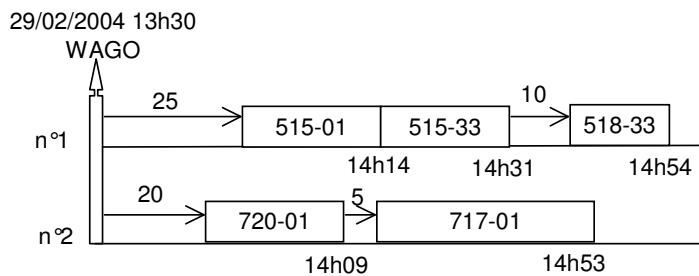


Figure 61 : Construction = Phase 2. Etape 3 = Efficacité Locotracteur n° 1

La manœuvre 518-33, de type M, a une fin de réalisation inférieure à sa date butoir, la construction sans retard relatif est donc possible. Mais, sa fin de réalisation est supérieure à sa date au plus tard souhaitée (14 h 00), elle a donc un retard de 54 minutes.

Ce planning prévisionnel de charge comporte deux EBF en retard avec une somme des durées de 55 minutes.

Si nous appliquons la procédure d'optimisation des tournées sur cette solution, aucune configuration ne permet d'améliorer les critères d'optimisation. La solution générée par la construction est donc la plus performante.

Nous pouvons noter que l'aspect temps réel a modifié l'ordonnancement prévisionnel et plus particulièrement l'affectation des manœuvres 518-33 et 717-01.

## CHAPITRE 5

# APPLICATION AUX CAS REELS

<u>CHAPITRE 5</u> <u>APPLICATION AUX CAS REELS</u>	<u>93</u>
5 - 1 METHODOLOGIE DE VALIDATION	95
5 - 1.1 DUREES REELLES DES MANŒUVRES	96
5 - 1.2 EVALUATION DES PRESTATIONS DU DISPATCHER	97
5 - 1.3 EVALUATION DES PERFORMANCES DE SOFFI	98
5 - 2 RESULTATS NUMERIQUES	101
5 - 2.1 CRITERE PRINCIPAL D'OPTIMISATION : NOMBRE DE RETARDS	102
5 - 2.2 ANALYSE DETAILLEE DU CRITERE PRINCIPAL D'OPTIMISATION	105
5 - 2.3 CRITERE SECONDAIRE D'OPTIMISATION : DUREE TOTALE DES RETARDS	108
5 - 2.4 CONCLUSION	112

Pour évaluer les performances de notre système baptisé SOFFI\*, nous définissons un taux de satisfaction client qui est l'image, vu de l'atelier, du critère principal d'optimisation. Si des ressources arrivent avec un certain retard par rapport à la plage horaire souhaitée par l'atelier émetteur de la demande, celui-ci ne sera pas satisfait de la prestation de transport. Pour le dispatcher, cette EBF réalisée en dehors du délai de réalisation correspondra à une EBF en retard.

On montre que SOFFI\* améliore dans 54 % des cas le critère principal, qui se traduit non seulement par une baisse moyenne du nombre de retards de 11 %, et par une division par 2 de la durée totale des retards dans 93 % des cas. Si la soumission des demandes peut être anticipée, notre système améliore encore d'avantage la satisfaction client.

## CHAPITRE 5 – APPLICATION AUX CAS REELS

### 5 - 1 Méthodologie de validation

Nous allons analyser les performances de notre système que nous avons baptisé SOFFI\*, pour Système d'Optimisation de Flux Ferroviaires Industriels. Nous nous plaçons dans les conditions réelles d'utilisation avec une arrivée aléatoire et au fil de l'eau des demandes EBF. Tous les essais effectués correspondent à un horizon de planification d'un poste de travail de huit heures : ce sont des cas réels issus d'historiques de données de production qui représentent les réalisations EBF effectuées par le dispatcher. Les essais, au nombre de cinquante, sont le reflet de l'activité ferroviaire.

Pour évaluer les performances de SOFFI\*, nous définissons un taux de satisfaction client qui est l'image, vu de l'atelier, du critère principal d'optimisation. Si des ressources arrivent avec un certain retard par rapport à la plage horaire souhaitée par l'atelier émetteur de la demande, celui-ci ne sera pas satisfait de la prestation de transport. Pour le dispatcher, cette EBF réalisée en dehors du délai de réalisation correspondra à une EBF en retard.

La valeur d'un taux de satisfaction client pour un essai donné, sera toujours comparée à celle obtenue par le dispatcher. Nous considérons que les prestations du dispatcher constituent notre référence. Ce taux de satisfaction client, noté  $S$ , correspond au rapport entre le nombre d'EBF sans retard et le nombre total d'EBF. Pour un poste de travail donné, il vaut :

$$S = (\text{Nb d'EBF sans retard} / \text{Nb total d'EBF}) * 100$$

Par exemple, au cours du poste de travail du 20/02/2004 de 05 h 00 à 13 h 00, le dispatcher a traité 17 EBF dont 11 ont été réalisées avec un certain retard par rapport aux fenêtres de temps émises dans les demandes. La prestation du dispatcher correspond alors, à un taux de satisfaction client de 35 %.

$$S_d = (6 / 17) * 100 \approx 35 \%$$

Les sauvegardes informatiques que nous avons à disposition et qui constituent les données d'entrée de notre système, ne sont pas directement exploitables sous leurs formes extraites.



Nous devons mettre en forme ces données, afin d'évaluer les performances de notre système SOFFI\* par rapport à celles du dispatcher sur des critères identiques.

## 5 - 1.1 Durées réelles des manœuvres

Par convention, le dispatcher ne distingue pas dans les saisies des réalisations des EBF, les temps de haut le pied nécessaires à l'enchaînement de deux EBF. Il inclut par défaut, le temps de haut le pied dans les dates de réalisation de la seconde manœuvre.

Par exemple (Cf. Figure 62), pour enchaîner la manœuvre 720-01 suivie de 515-01, il est nécessaire de parcourir un temps de haut le pied de 15 minutes. Si la manœuvre 720-01 a une date de fin de réalisation à 10 h 00, le dispatcher va saisir la date de début de réalisation de la manœuvre 515-01 à 10 h 00, bien que sa date réelle de début de réalisation soit à 10 h 15.

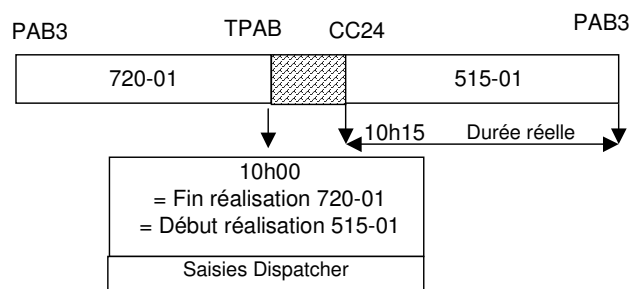


Figure 62 : Saisies des dates de réalisation des EBF

Or, notre système distingue les temps de haut le pied et la durée de réalisation des manœuvres dans son processus d'optimisation. Il est donc nécessaire d'identifier les durées réelles des manœuvres au sein des dates de réalisation saisies par le dispatcher. L'identification de l'atelier de destination d'une première manœuvre et de l'atelier d'origine de la seconde, nous permet d'estimer ce temps de parcours et de calculer sa valeur d'après la matrice symétrique des temps de haut le pied. Cette durée est alors ajoutée à la date de début de réalisation saisie par le dispatcher sur la seconde manœuvre. L'intervalle de temps qui sépare cette nouvelle date avec la date de fin de réalisation correspond à la durée réelle de la deuxième manœuvre.

Nous retrouvons cette distinction dans le mode de calcul des retards des manœuvres. Celle-ci n'a pas d'influence sur les EBF du type E, M ou R. Cependant, il y a une divergence de point de vue au niveau des ateliers pour les EBF du type S (Cf. Figure 63).

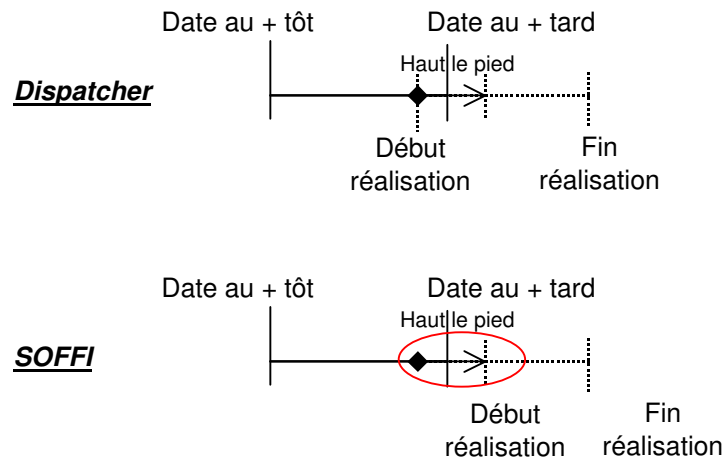


Figure 63 : Mode de calcul du retard Dispatcher / SOFFI

Dans les saisies de réalisation du dispatcher, l'EBF n'a aucun retard car sa date de début de réalisation est inférieure à sa date de début au plus tard. Or, vu de l'atelier émetteur de la demande, le locotracteur n'a pas effectué sa manœuvre de sortie de wagons des voies ferrées, car il effectue un trajet de haut le pied pour rejoindre l'atelier d'origine de la manœuvre. SOFFI considère un retard car sa date de début de réalisation est supérieure à sa date de début au plus tard. Notre système permet d'être plus réaliste dans son calcul du taux de satisfaction client.

Ce nouveau mode de calcul du retard a été retenu par le service Mouvement.

## 5 - 1.2 Evaluation des prestations du dispatcher

Les sauvegardes informatiques extraites de SIMPLUS\* contiennent l'ensemble des caractéristiques des EBF réalisées. La méthodologie et les informations contenues dans ces extractions sont présentées dans la section suivante.

Pour automatiser la manipulation des diverses informations, nous avons développé une plate-forme qui calcule pour une liste d'EBF donnée :

- le nombre total d'EBF à ordonnancer
- les durées réelles de chaque EBF
- les 2 critères d'optimisation :

- principal = nombre total d'EBF en retard calculé en fonction du type EBF et des dates réelles de réalisation
- secondaire = durée totale des retards exprimée en minutes

Les résultats obtenus par cette plate-forme, nous permettent d'évaluer les prestations réalisées par le dispatcher. Pour un poste de travail donné (un n° de test) nous disposons à la fois, du nombre total d'EBF, du nombre d'EBF en retards, et de la durée totale des retards. Le taux de satisfaction client réalisé par le dispatcher sur ce poste de travail identifié, est ainsi quantifiable.

Le tableau ci-dessous est un échantillon représentatif des prestations réalisées par le dispatcher (Cf. Figure 64).

N° de test	Nb total d'EBF	Dispatcher		
		Nb d'EBF en retards	Durée cumulée des retards	% satisfaction client
1	17	11	457	35%
2	29	12	432	59%
3	26	10	271	62%
4	21	10	192	52%
5	20	6	177	70%
6	18	2	112	89%
7	17	1	10	94%
8	14	0	0	100%
9	26	8	805	69%
10	19	7	172	63%

Figure 64 : Evaluation des performances du dispatcher

## 5 - 1.3 Evaluation des performances de SOFFI

Dans notre méthode de résolution, nous traitons la construction d'un ensemble prévisionnel de tournées de locotracteurs, et le réajustement de ces tournées à des instants décisionnels non connus à l'avance. Pour évaluer les performances de SOFFI, nous devons considérer l'ensemble des paramètres qui influent lors de ces constructions. Pour cela, nous constituons un fichier qui comporte les informations caractérisant chaque demande EBF (Cf. Figure 65).

Soit :

- la date de soumission qui détermine un instant décisionnel de calcul
- les dates de début de réalisation au plus tôt et au plus tard qui fixent les délais temporels de mises en réalisation, et le calcul des retards
- le type EBF qui spécifie le mode de calcul du retard
- le code affaire et le code poste affaire qui identifient l'EBF
- la durée moyenne de réalisation qui permet la construction du planning prévisionnel de charge
- la durée réelle de réalisation qui permet le réajustement du planning prévisionnel en valeurs réalisées

Date de soumission	Date au plus tôt	Date au plus tard	type EBF	EBF	Durée réelle	Durée moyenne
20/02/2004 11:57	20/02/2004 13:00	20/02/2004 13:30	M	723-33	20	18
20/02/2004 12:22	20/02/2004 13:30	20/02/2004 14:10	M	720-01	15	19
20/02/2004 12:52	20/02/2004 13:10	20/02/2004 14:10	M	720-01	20	19
20/02/2004 11:53	20/02/2004 12:00	20/02/2004 13:00	M	720-01	25	19
20/02/2004 14:45	20/02/2004 14:50	20/02/2004 15:20	M	515-01	15	19
20/02/2004 16:10	20/02/2004 16:28	20/02/2004 16:58	M	714-01	20	16
20/02/2004 16:32	20/02/2004 16:52	20/02/2004 17:52	M	720-33	15	17
20/02/2004 17:07	20/02/2004 17:25	20/02/2004 18:25	M	714-33	15	19
20/02/2004 18:57	20/02/2004 19:15	20/02/2004 19:45	M	714-01	30	16
20/02/2004 19:28	20/02/2004 19:48	20/02/2004 20:48	M	714-33	17	19
20/02/2004 19:31	20/02/2004 19:35	20/02/2004 20:15	M	720-01	10	19

Figure 65 : Fichier résumé des EBF

Nous rappelons que nous cherchons à évaluer les performances de SOFFI par rapport aux prestations du dispatcher que nous avons estimées dans le point précédent. Nous avons donc connaissance de toutes les dates de soumission des EBF. Or, dans son utilisation opérationnelle, le système ne connaît pas ces instants d'arrivée des demandes. Pour construire le planning prévisionnel de charge à une date donnée, nous devons donc considérer uniquement les EBF dont la date de soumission est inférieure ou égale à la date de calcul. Cette liste d'EBF va constituer les données d'entrée de notre système.

Par exemple, si on se place au début du poste de l'après midi du 20/02/2004 à 13 h 00. L'optimisation va porter sur les quatre premières EBF de la liste Figure 65 qui précèdent cette date. Soient les manœuvres : 723-33, 720-01, 720-01 et 720-01.

## Chapitre 5 – Application aux cas réels

Nous cherchons maintenant à affecter les EBF de cette liste sur les locotracteurs. Pour cela, nous lançons la procédure de construction des tournées qui permet d'obtenir le planning prévisionnel de charge des locotracteurs et les heures de réalisations de chaque EBF. Les durées prises en compte dans la constitution de ce planning prévisionnel sont les durées moyennes qui caractérisent chaque manœuvre.

Toutes les valeurs associées aux différentes durées sont exprimées en minutes.

Dès que les contraintes temporelles de délai de réalisation d'une EBF sont atteintes, nous fixons sa date de début de réalisation. Sa durée de prestation sera égale à la durée réelle calculée d'après les dates de réalisations saisies par le dispatcher.

Les instants décisionnels de calcul nécessaires au réajustement du planning prévisionnel nous contraignent à renseigner notre système de l'état prévisionnel des ressources. A chaque nouvelle optimisation, nous devons définir l'atelier de destination de chaque locotracteur et sa date prévisionnelle de disponibilité, définie par sa date de fin de manœuvre. Celle-ci est calculée d'après la durée moyenne de réalisation de l'EBF.

Nous suivons la mise en œuvre du planning réalisé après réajustement du planning prévisionnel, en construisant au fil de l'eau le diagramme de Gantt des EBF réalisées.

Dès que toutes les EBF du poste de travail ont été réalisées, nous évaluons les performances de notre maquette SOFFI par rapport aux prestations du dispatcher. Le tableau ci-dessous est un échantillon représentatif de nos évaluations (Cf. Figure 66) :

N° de test	Nb total d'EBF	Dispatcher			SOFFI		
		Nb d'EBF en retards	Durée cumulée des retards	% satisfaction client	Nb d'EBF en retards	Durée cumulée des retards	% satisfaction client
1	17	11	457	35%	5	220	71%
2	29	12	432	59%	7	278	76%
3	26	10	271	62%	6	111	77%
4	21	10	192	52%	7	130	67%
5	20	6	177	70%	3	119	85%
6	18	2	112	89%	2	50	89%
7	17	1	10	94%	1	3	94%
8	14	0	0	100%	0	0	100%
9	26	8	805	69%	10	230	62%
10	19	7	172	63%	8	270	58%

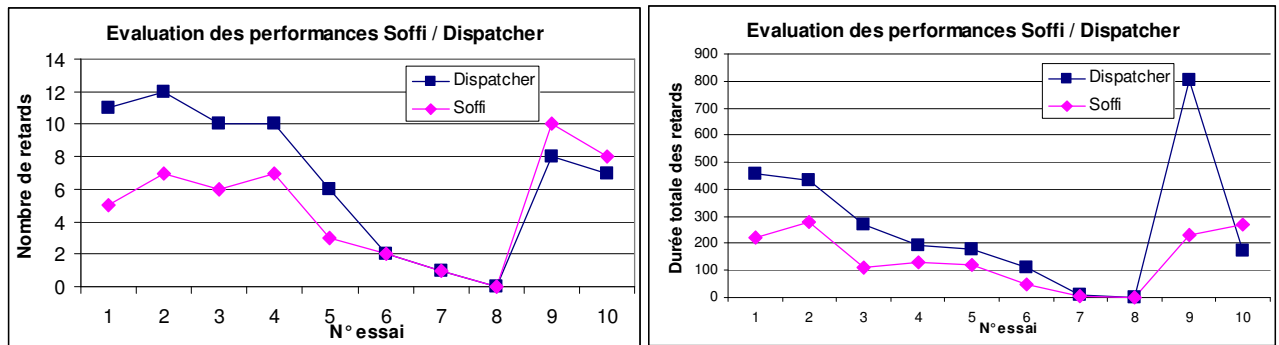


Figure 66 : Evaluation des performances SOFFI / Dispatcher

Au cours du test n° 1, le dispatcher a obtenu une satisfaction client ( $S_d$ ) de 35 %. Notre système, quand à lui, a atteint une valeur de 71 %.

$$S_s = (12 / 17) * 100 = 71 \%$$

Toutes les opérations de réajustement du planning prévisionnel, du renseignement de l'état prévisionnel des ressources, de la construction du diagramme de Gantt, compliquent considérablement la méthodologie d'évaluation des performances. Il est donc difficile de réaliser un nombre conséquent d'essais. C'est pourquoi, nous avons réalisé 50 tests issus d'historiques de données industrielles qui sont représentatifs de l'activité ferroviaire.

## 5 - 2 Résultats numériques

Les dispatchers régulent actuellement le trafic ferroviaire avec un horizon de travail de l'ordre de la manœuvre. Le système, quant à lui, permet de gérer toutes les demandes EBF à réaliser quelles que soient leur nombre et leur nature. Son horizon de travail est donc égal à ce nombre d'EBF à traiter. La charge des locotracteurs et la répartition des EBF sur un horizon à long terme sont également facilement réalisables et quantifiables.

Nous allons analyser trois scénarios où les dates des EBF vont être reconsidérées. Le scénario :

- SOFFI s'appuie sur les dates de réalisations souhaitées par les ateliers
- Soffi1 repose sur la non prise en compte de la date de début au plus tôt
- Soffi2 considère une anticipation de dix minutes sur la date de soumission de chaque EBF

Nous allons évaluer l'influence d'une anticipation, soit sur la date de début au plus tôt, soit sur la date de soumission des EBF, de manière à représenter au mieux l'activité du dispatcher. En effet, ce dernier dispose d'un ensemble de caméras placées sur le réseau ferré qui lui permettent d'anticiper ses prestations.

Il est à noter, que le planning prévisionnel de charge est toujours obtenu avec un temps de calcul de l'ordre de la seconde.

Dans les analyses qui vont suivre, nous présentons tout d'abord les concepts de l'étude, suivi d'une application illustrative, et enfin la généralisation des résultats à nos 50 essais.

## 5 - 2.1 Critère principal d'optimisation : Nombre de retards

### **Concepts :**

Le pourcentage moyen de satisfaction client ( $S_T$ ) réalisés sur les 50 essais, représente la moyenne de l'ensemble des pourcentages de satisfaction client ( $S_i$ ). Soit :

$$S_T = \frac{\sum_{i=1}^{50} (S_i)}{50}$$

Le pourcentage minimal de satisfaction client ( $S_m$ ) correspond au pire des cas observé sur les 50 essais. Soit :

$$S_m = \text{Min} ( S_i )$$

Et, le pourcentage maximal de satisfaction client ( $S_M$ ) correspond au pourcentage de satisfaction client le plus élevé. Soit :

$$S_M = \text{Max} ( S_i )$$

### **Applications :**

Sur les 10 tests Figure 66, le pourcentage moyen de satisfaction client réalisé par le dispatcher est de 69 %, contre 78 % par SOFFI.

$$S_d = ( 35 + 59 + 62 + 52 + 70 + 89 + 94 + 100 + 69 + 63 ) / 10 = 69 \%$$

$$S_s = ( 71 + 76 + 77 + 67 + 85 + 89 + 94 + 100 + 62 + 58 ) / 10 = 78 \%$$

Le pourcentage minimal de satisfaction client obtenu par le dispatcher est de 35 % (test n° 1) contre 58 % par SOFFI (test n° 10). On peut noter que sur certains tests, SOFFI donne de moins bons résultats que le dispatcher (test n° 9 et 10), car il prend en compte des données que nous ne connaissons pas, mais que nous avons identifiées dans les scénarios soffi1 et soffi2.

**Généralisations :**

La Figure 67 réalisée sur l'ensemble des 50 essais (Cf. § 9 - 12), représente la répartition des pourcentages de satisfaction client.

Le pourcentage moyen de satisfaction client obtenu par le dispatcher s'élève à 76 %, avec un pire des cas observé à 35 %. Le système SOFFI permet d'obtenir une valeur moyenne de 80 %, soit une amélioration moyenne de 4 % par rapport au dispatcher. De plus, le pire des cas suit cette tendance avec une valeur minimale de 45 %.

Le pourcentage maximal de satisfaction client est de 100 % quels que soient les scénarios : nous avons au moins un essai parmi les 50 qui n'a aucune EBF en retard.

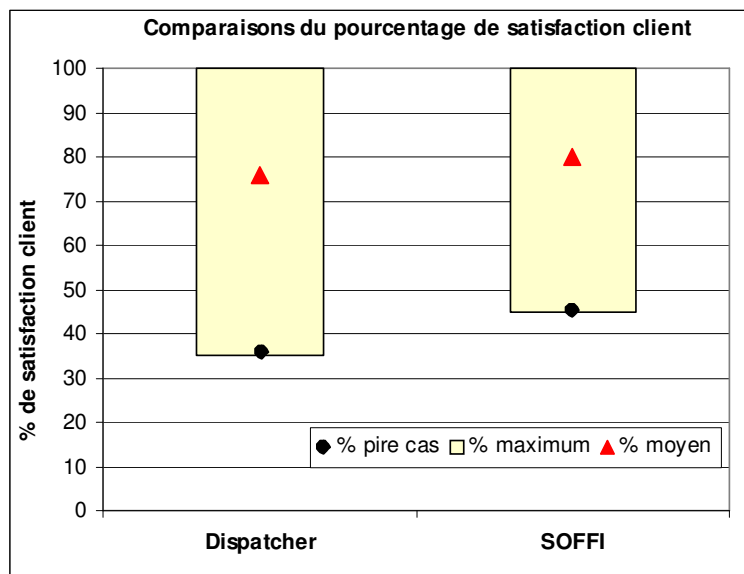


Figure 67 : Pourcentages de satisfaction client

Même si SOFFI permet d'atteindre 80 % de satisfaction client, il est à noter que ce pourcentage global contient des taux améliorés, égaux ou, dégradés par rapport à la prestation du dispatcher. Par exemple, l'essai n° 1 de la Figure 66, illustre une amélioration du taux obtenu par le dispatcher passant de 35 % à 71 %.



Les essais qui dégradent le taux de satisfaction client obtenu par le dispatcher se justifient par la méthode de travail de celui-ci qui peut anticiper les manœuvres grâce à un ensemble de caméras placées sur le réseau ferré. Il effectue des anticipations sur la date de début au plus tôt et/ou des anticipations sur la date de soumission des EBF. Nous avons évalué l'impact de ces anticipations sur les taux globaux dans les scénarios respectifs soffii1 et soffii2 (Cf. Figure 68, § 9 - 13).

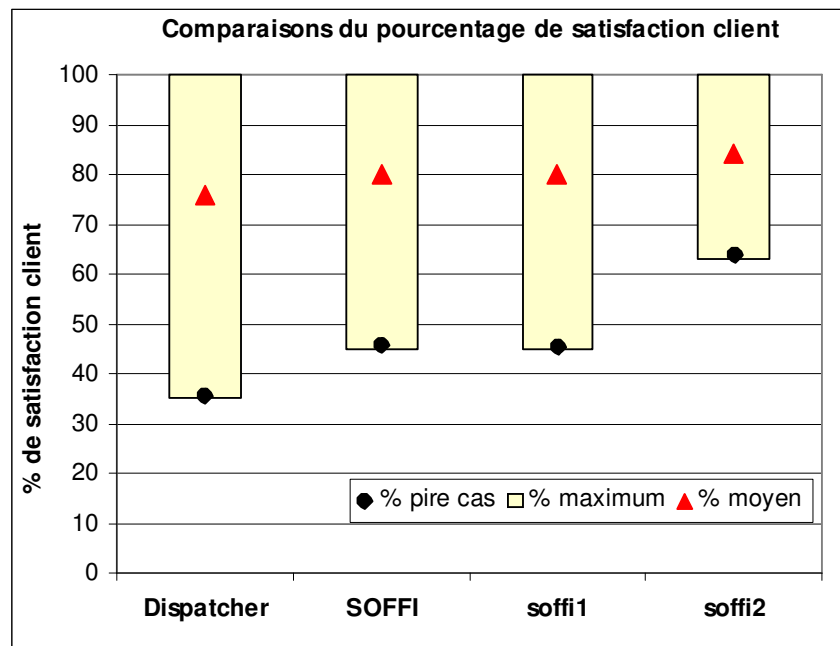


Figure 68 : Comparaisons du pourcentage de satisfaction client

Dans le scénario soffii1, nous considérons qu'une EBF peut être mise en réalisation alors que la contrainte temporelle de début de réalisation n'est pas atteinte. Nous réalisons alors une anticipation sur la date de début au plus tôt de l'EBF. Cette forme d'anticipation n'apporte aucune amélioration sur le pourcentage moyen de satisfaction client qui reste à 80 % et le pire cas à 45 %. Nous n'étudierons pas dans la suite de ce document ce scénario qui n'améliore pas notre critère principal d'optimisation.

Cependant, une anticipation de 10 minutes sur chaque date de soumission des EBF (soffi2) nous permet d'obtenir un pourcentage moyen de satisfaction de 84 %, soit une amélioration de 8 % par rapport au dispatcher. Et, le pire des cas atteint un taux de 65 %, soit encore une amélioration par rapport au dispatcher.

Cela montre qu'une meilleure anticipation sur la soumission des demandes permet d'avoir une vision plus large de la charge de travail à réaliser et donc une meilleure réactivité pour la prise en compte des EBF urgentes. Le planning prévisionnel améliore ainsi nos critères d'optimisation.

On peut remarquer, que la valeur minimale du taux de satisfaction client (le pire cas observé) obtenue par le dispatcher, est toujours améliorée ; et que la valeur maximale reste à 100 % quels que soient les scénarios. Nous avons donc une amélioration du taux de satisfaction client en moyenne par notre système et dans le cas le plus critique.

## 5 - 2.2 Analyse détaillée du critère principal d'optimisation

### **Concepts :**

Au sein des 50 essais, on peut identifier trois classes de solutions délimitées par des valeurs de taux qui améliorent, égalisent ou, dégradent la prestation réalisée par le dispatcher. On note :

$$A = \% \text{ d'essais améliorés} = \text{Nb d'essais améliorés} / 50 * 100$$

$$I = \% \text{ d'essais identiques} = \text{Nb d'essais identiques} / 50 * 100$$

$$D = \% \text{ d'essais dégradés} = \text{Nb d'essais dégradés} / 50 * 100$$

Au sein de chaque classe, on peut évaluer l'écart de satisfaction client existant entre SOFFI et le dispatcher :

$$e_{sd} = \text{Ecart de \% de satisfaction client} = S_s - S_d$$

Si cet écart est positif, SOFFI améliore le pourcentage de satisfaction client obtenu par le dispatcher. A l'inverse, s'il est négatif, SOFFI le dégrade.

La valeur moyenne de réduction ou d'amélioration du taux de satisfaction client peut être quantifiée. Si on dénombre NbVal valeurs d'essais où le taux de satisfaction client a été amélioré,

$$E_m = \% \text{ moyen d'amélioration de satisfaction client} = \frac{\sum_{e_{sd}=1}^{NbVal} (e_{sd})}{NbVal}$$

**Applications :**

Sur notre tableau représentatif Figure 66, nous avons cinq tests dont l'écart de satisfaction client est positif (tests n° 1, 2, 3, 4 et 5). Ces essais améliorent dans 50 % des cas la prestation du dispatcher (Cf. Figure 69).

$$A = 5 / 10 * 100 = 50 \%$$

Et, le pourcentage moyen d'amélioration vaut 20 % :

$$E_m = (36 + 17 + 15 + 15 + 15) / 5 = 20 \%$$

N° de test	Nb total d'EBF	Dispatcher			SOFFI			Ecart de satisfaction client %
		Nb d'EBF en retards	Durée cumulée des retards	% satisfaction client	Nb d'EBF en retards	Durée cumulée des retards	% satisfaction client	
1	17	11	457	35%	5	220	71%	36%
2	29	12	432	59%	7	278	76%	17%
3	26	10	271	62%	6	111	77%	15%
4	21	10	192	52%	7	130	67%	15%
5	20	6	177	70%	3	119	85%	15%
6	18	2	112	89%	2	50	89%	0%
7	17	1	10	94%	1	3	94%	0%
8	14	0	0	100%	0	0	100%	0%
9	26	8	805	69%	10	230	62%	-7%
10	19	7	172	63%	8	270	58%	-5%

Figure 69 : Ecart du pourcentage de satisfaction client

On peut donc conclure que dans 50 % des cas, le système SOFFI a permis une amélioration de la satisfaction client par rapport à celle du dispatcher qui se traduit par une baisse moyenne du nombre de retards de 20 %.

**Généralisations :**

Sur l'ensemble de nos 50 essais, notre système a permis dans 54 % des cas d'améliorer la satisfaction client obtenue par le dispatcher. Cette amélioration se traduit par une baisse moyenne du nombre de retards de 11 % (Cf. Figure 70).

On dénombre également 26 % des essais où SOFFI donne un nombre de retards identique au dispatcher, et 20 % d'essais où le nombre est dégradé d'une valeur moyenne de 9 % compte tenu des anticipations réalisées par le dispatcher.

---

<b>SOFFI / Dispatcher</b>	<b>Amélioré</b>	<b>Identique</b>	<b>Dégradé</b>
% de simulations où le nb de retard est	54%	26%	20%
% d'écart moyen du nb de retard	11%	0%	-9%

Figure 70 : Evaluation du critère principal SOFFI / Dispatcher

Si on anticipe chaque date de soumission des EBF de 10 minutes (soffi2) on constate une amélioration de la satisfaction client dans 62 % des cas avec une baisse moyenne du nombre de retards de 14 % (Cf. Figure 71).

On dénombre également 32 % des tests où soffi2 donne un nombre de retards identique au dispatcher, et 6 % de tests où la solution est dégradée d'une valeur moyenne de 5 %.

<b>soffi2 / Dispatcher</b>	<b>Amélioré</b>	<b>Identique</b>	<b>Dégradé</b>
% de simulations où le nb de retard est	62%	32%	6%
% d'écart moyen du nb de retard	14%	0%	-5%

Figure 71 : Evaluation du critère principal soffi2 / Dispatcher

On peut noter que le scénario soffi2 qui représente au mieux la méthode de travail du dispatcher améliore sensiblement le critère principal d'optimisation. De plus, il diminue le nombre de solutions dégradées par rapport à SOFFI, passant de 20 % à 6 %.

Nous allons maintenant étudier le comportement du critère secondaire d'optimisation compte tenu des résultats obtenus. Nous considérerons dans cette analyse, uniquement les cas où on a noté une amélioration du critère principal d'optimisation.

## 5 - 2.3 Critère secondaire d'optimisation : Durée totale des retards

### Concepts :

Au sein des 50 essais réalisés, on a identifié précédemment A solutions où le taux de satisfaction client de SOFFI a amélioré celui obtenu par le dispatcher.

Le pourcentage de cas où la durée totale des retards a été diminuée correspond au rapport entre le nombre d'essais où la durée a été diminuée et le nombre d'essais où le nombre de retards a été diminué. Soit :

$$\% \text{ d'essais où la durée a été diminuée} = ( \text{nb d'essais où la durée à été diminuée} / A ) * 100$$

Pour identifier les essais où la durée a été diminuée, on calcule l'écart de la durée totale des retards entre SOFFI et le dispatcher. Il correspond à la différence entre la durée totale obtenue par le dispatcher moins la durée totale donnée par SOFFI, soit :

$$\text{Ecart de la durée totale des retards} = \text{Durée totale des retards (dispatcher)} - \text{Durée totale des retards (soffi)}$$

Si cet écart est positif, SOFFI a diminué la durée totale des retards par rapport au dispatcher. A l'inverse, s'il est négatif, il l'a dégradée.

Le pourcentage moyen de réduction de la durée totale des retards au sein de ces solutions correspond au rapport entre la somme des durées totales des retards de SOFFI et la somme des durées totales des retards du dispatcher.

Pour les solutions où le pourcentage de satisfaction client a été amélioré (A), si on dénombre NbVal valeurs d'essais où la durée a été améliorée,

$$\% \text{ moyen de réduction de la durée totale des retards} =$$

$$\sum_{i=1}^{NbVal} \text{durée totale des retards (SOFFI)}_i / \sum_{i=1}^{NbVal} \text{durée totale des retards (dispatcher)}_i$$

**Applications :**

Sur notre tableau représentatif Figure 66, nous avons identifié cinq essais où le nombre de retard a été diminué (tests n° 1, 2, 3, 4 et 5). Ces essais ont tous diminué la durée totale des retards obtenu par le dispatcher (Cf. Figure 72).

Et, le pourcentage moyen de réduction s'élève à 56 % :

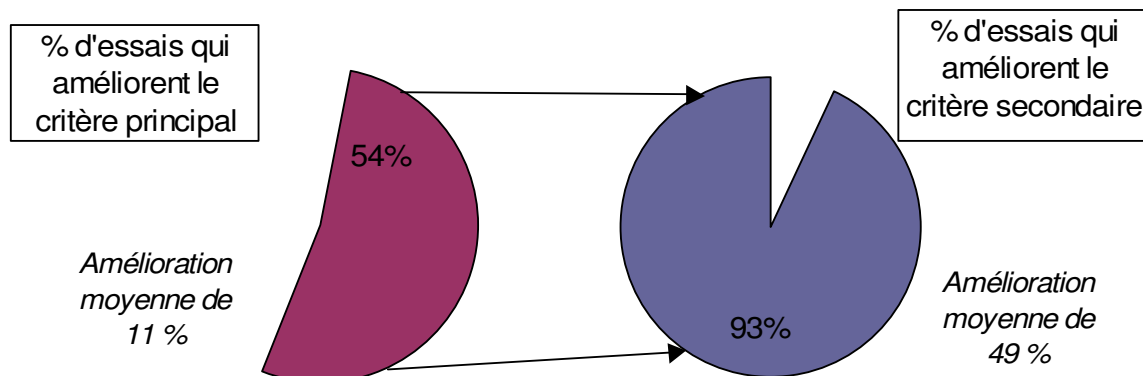
$$(220 + 278 + 111 + 130 + 119) / (457 + 432 + 271 + 192 + 177) = 56 \%$$

N° de test	Nb total d'EBF	Dispatcher			SOFFI			Baisse de la durée totale des retards
		Nb d'EBF en retards	Durée cumulée des retards	% satisfaction client	Nb d'EBF en retards	Durée cumulée des retards	% satisfaction client	
1	17	11	457	35%	5	220	71%	237
2	29	12	432	59%	7	278	76%	154
3	26	10	271	62%	6	111	77%	160
4	21	10	192	52%	7	130	67%	62
5	20	6	177	70%	3	119	85%	58
6	18	2	112	89%	2	50	89%	62
7	17	1	10	94%	1	3	94%	7
8	14	0	0	100%	0	0	100%	0
9	26	8	805	69%	10	230	62%	575
10	19	7	172	63%	8	270	58%	-98

Figure 72 : Baisse de la durée totale des retards

**Généralisations :**

Sur les 54 % d'essais où SOFFI a amélioré le taux de satisfaction client obtenu par le dispatcher, on note une amélioration dans 93 % des cas, de la durée totale des retards qui se traduit par une baisse moyenne de 49 % (Cf. Figure 73).



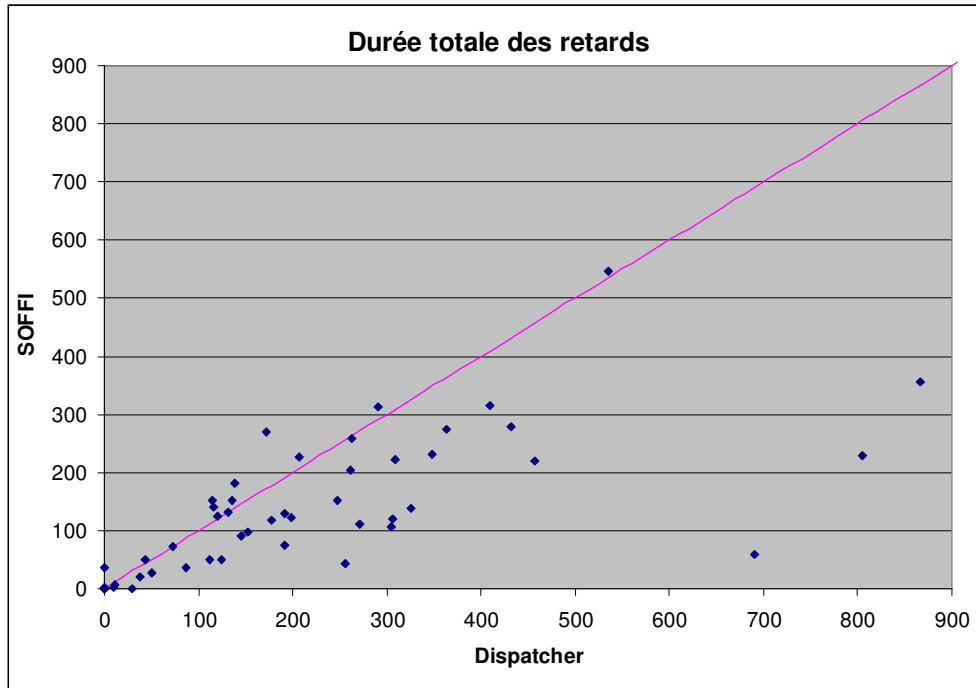


Figure 73 : Critères d'optimisation SOFFI / Dispatcher

Sur ce graphique, tous les points situés en dessous de la ligne médiane représentent les essais où SOFFI a obtenu une baisse de la durée totale des retards par rapport à celle obtenue par le dispatcher. On remarque que dans la majorité des essais, SOFFI améliore la durée totale des retards.

Sur le graphique ci-dessous (Cf. Figure 74), tous les points situés en dessous de la ligne médiane représentent les essais où SOFFI a obtenu une valeur moyenne des retards inférieure à celle du dispatcher.

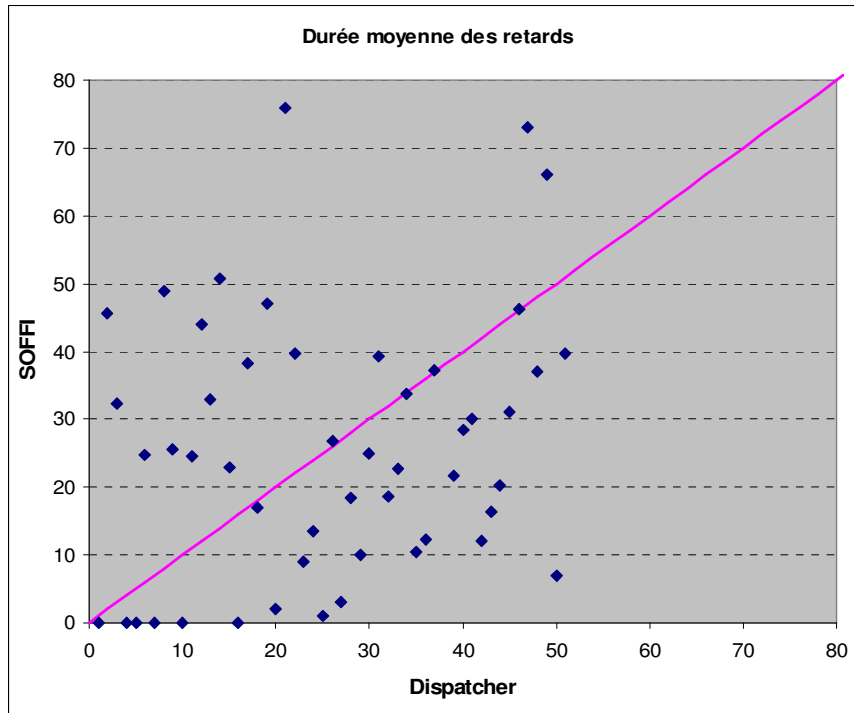


Figure 74 : Durée moyenne des retards SOFFI / Dispatcher

Nous pouvons remarquer que la durée moyenne d'attente des clients est sensiblement la même pour le dispatcher et pour SOFFI. Cependant, les manœuvres en retard sont beaucoup plus fréquentes avec le dispatcher que par notre système. Mais, ce dernier qui minimise le nombre de manœuvre en retard va pénaliser plus largement certaines durées de retard des EBF.

Cette amélioration se perçoit également entre le dispatcher et le scénario soffii2 où le critère secondaire est diminué de 54 % dans 94 % des tests (Cf. Figure 75).

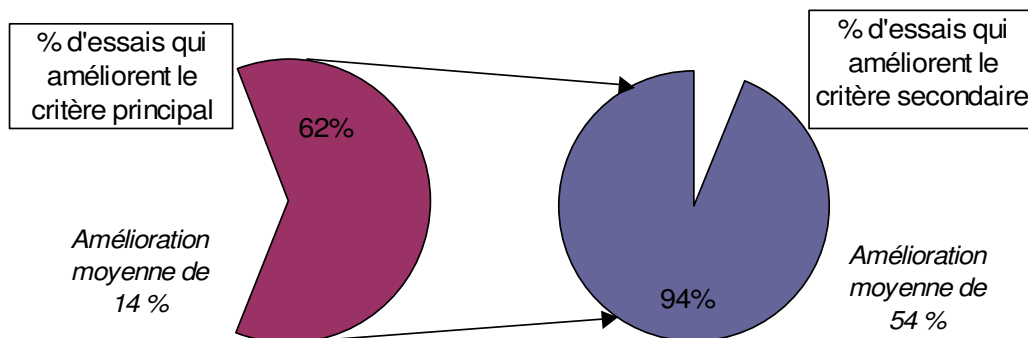


Figure 75 : Critères d'optimisation soffii2/Dispatcher



## 5 - 2.4 Conclusion

SOFFI permet d'augmenter de 4 % le taux moyen de satisfaction client pour atteindre une valeur de 80 %.

On montre que SOFFI améliore dans 54 % des cas le critère principal, qui se traduit non seulement par une baisse moyenne du nombre de retards de 11 %, et par une division par 2 de la durée totale des retards dans 93 % des cas.

Quand SOFFI n'a pas d'impact significatif (20 % des cas) cela s'explique par le fait que le dispatcher a la possibilité d'anticiper les réalisations des EBF grâce à un ensemble de caméras réparties sur le réseau ferré et sur les parcs de stockage. Ces anticipations sur la date de début au plus tôt et/ou sur la date de soumission, ont été prises en compte dans les scénarios respectifs *soffi1* et *soffi2*.

Anticiper la date de début au plus tôt (*soffi1*) ne permet pas d'améliorer ni le critère principal (qui reste à 80 %) ni la valeur minimale de satisfaction client (qui reste à 45 %).

Par contre avec *soffi2* où 10 minutes d'anticipation ont été imposées à chaque date de soumission, le taux moyen de satisfaction client passe à 84 %, soit 8 % d'augmentation par rapport à la référence dispatcher.

De plus, on note une amélioration du nombre de retards de 14 % dans 62 % des cas (comparés respectivement aux 11 % de 54 % dans SOFFI) avec plus de 54 % de baisse de la durée totale dans presque tous les cas (94 %).

Nous avons donc une amélioration sensible du taux de satisfaction client par notre méthode tant en moyenne que dans le cas le plus critique. De plus, la diminution de la durée totale des retards va permettre aux ateliers de voir leur temps d'attente diminuer.

Une anticipation sur la soumission des demandes permet d'améliorer encore les résultats tant sur le critère principal que secondaire. Elle permet notamment d'avoir une réactivité plus forte et une vision à plus long terme de la charge de travail.

Notre système SOFFI permet ainsi de quantifier les performances plutôt que de rechercher des valeurs très améliorées. Il permet également de tester de nouvelles approches et surtout d'offrir une aide au dispatcher lorsque les flux de production seront plus denses.

# CHAPITRE 6

## MISE EN PRODUCTION

<b>CHAPITRE 6</b>	<b>MISE EN PRODUCTION</b>	<b>113</b>
6 - 1	INTRODUCTION	115
6 - 2	DONNEES INDUSTRIELLES	116
6 - 3	ANALYSE DE LA BASE DE DONNEES	117
6 - 3.1	REPARTITION DES MANŒUVRES	118
6 - 3.2	REPARTITION DES CAUSES DE NON-RESPECT	119
6 - 3.3	OCCURRENCE DES EBF	121
6 - 3.4	DUREES DES MANŒUVRES	122
6 - 4	ANALYSE DES DYSFONCTIONNEMENTS	124
6 - 5	AMELIORATIONS INDUITES PAR LE CHANGEMENT DE SYSTEME	125
6 - 6	INDUSTRIALISATION	126
6 - 6.1	MISE EN PRODUCTION PAR LE SERVICE INFORMATIQUE	126
6 - 6.2	FONCTIONNALITES DU SYSTEME D'INFORMATION	130

L'analyse de la base de données a permis de souligner plusieurs points marquants. Tout d'abord, les manœuvres propres à la production représentent 98 % de la charge des locotracteurs, et quatre ateliers sur les trente trois existants représentent 90 % des demandes. Ensuite, 40 % des EBF sont effectuées en dehors des plages horaires souhaitées par les ateliers. La cause majeure de ce non-respect des fenêtres de temps est une gestion de priorités plus importantes. Enfin, on quantifie à 15 % la part d'EBF sauvegardées avec des erreurs de saisies manuelles. Toutes ces identifications nous ont permis d'apporter plusieurs améliorations à notre système d'informations afin de garantir les données sauvegardées.

L'industrialisation de notre système a été réalisée par les services informatiques de la société ARCELOR, qui assure à la fois l'hébergement de notre projet sous une licence industrielle et sa maintenance en opérationnelle. Le prototype est en exploitation au sein des dispatchings\* depuis le 20 octobre 2004.

# CHAPITRE 6 – MISE EN PRODUCTION

## 6 - 1 Introduction

		2003			2004							
		O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Expérimentations	Tests réels											
	Améliorations											
	Présentation prototype											
Industrialisation	Evolutions											
	Mise en œuvre											

Figure 76 : Développement du système d'aide à la décision

Nous avons testé en octobre 2003 (Cf. Figure 76), une première implémentation du système SOFFI, avec huit équipes de dispatchers répartis sur les secteurs géographiques Nord et Sud. Les expérimentations se sont déroulées en parallèle des prestations du dispatcher, avec une arrivée des EBF non pas en temps réel, mais par une application informatique qui récupère les EBF soumises dans SIMPLUS\* toutes les minutes.

Cette diversité tant au niveau de la méthode de travail des dispatchers que dans les flux géographiques, nous a donné une vision globale de l'activité ferroviaire. Nous avons pu apprécier le mode d'affectation des locotracteurs, la répartition de la charge de travail, la gestion des EBF, et le partage des informations entre les ateliers et le prestataire de transport. Nous avons surtout pu identifier les choix décisionnels du dispatcher qui pouvaient être différents du planning prévisionnel proposé par SOFFI. Nous avons également répertorié toutes les opérations qu'il est amené à réaliser et que la version première du système ne prenait pas en compte : création manuelle de demande, regroupement, scindement ou suppression d'EBF, saisies de codes de non-respect, règles de précedence, retard maximal admissible.

Toutes ces identifications nous ont conduit à améliorer le prototype initial de manière à représenter au mieux l'activité ferroviaire et les besoins opérationnels des dispatchers.

Nous avons ensuite, présenté en mars 2004, le prototype amélioré et les premiers résultats numériques à tous les dispatchers, quel que soit leur secteur géographique. Ces journées

d'informations ont permis de faire évoluer à nouveau le système de manière à ce que l'utilisation par les principaux intéressés soit la plus agréable possible et proche de leur gestion actuelle. Les modifications portent principalement sur l'affichage d'informations relatives aux EBF comme par exemple les valeurs des retards des EBF réalisées. Ces séances ont permis d'inclure les dispatchers dans le déroulement du projet et de rappeler l'importance de toutes les saisies relatives aux EBF qui permettent d'évaluer les prestations du service. Le sentiment général qui en ressort, est une adoption par la majorité des utilisateurs concernés. Ils ont apprécié à la fois l'aide à la décision que nous leur offrons, et la nouvelle configuration de travail qui se réalise sous un environnement Windows. L'allègement des saisies clavier les a également séduit. L'assurance d'avoir un outil support optimisé qui prend en compte les caractéristiques particulières du transport des produits sidérurgiques, et qui permet de répartir la charge de travail des locotracteurs même dans le futur contexte de production, est la vision la plus notable de notre système.

L'adoption de notre système par les futurs utilisateurs, nous a permis d'industrialiser et d'implanter SOFFI au sein des dispatchings\*. Le service informatique du groupe ARCELOR qui assure d'une part la maintenance de l'application SIMPLUS, et d'autre part, son évolution, a par conséquent pris en charge cette phase de notre projet.

## 6 - 2 Données Industrielles

Le service Mouvement avait à disposition deux tables de nomenclature extraites de SIMPLUS sur les années 1993 et 2001. Ces tables répertorient l'ensemble des codes affaire, des codes poste affaire, et des durées moyennes de réalisation des manœuvres. Nous avons demandé une extraction pour l'année 2003 afin de disposer de données industrielles actualisées. En effet, certains flux existants en 1993 ne l'étaient plus en 2001 et/ou 2003, tandis que de nouveaux sont apparus en 2003 avec l'augmentation de production de l'usine et la création de zones de stockage.

Ces tables nous ont permis de constituer la nomenclature des 258 types de manœuvres. Et par conséquent, les nomenclatures des codes affaire et des codes poste affaire. Cependant, les informations disponibles ne sont pas suffisantes pour analyser tous les concepts influents de l'activité ferroviaire. Pour cela, une requête informatique qui extrait des données historiques de SIMPLUS entre deux dates a été réalisée auprès du service Tixis System.

Nous avons à disposition 22 extractions réalisées sur sept journées consécutives de 3\*8 heures. Elles sont représentatives du fonctionnement global des EBF et constituent la base de données des prestations ferroviaire. Leur répartition est la suivante :

- 17 au 23/02/2003
- 24 au 30/03/2003
- 13 au 19/10/2003
- 05/01 au 16/05/2004

L'ensemble de ces données industrielles représente 462 postes de travail de huit heures, soit environ 25 000 EBF. Chaque extraction comporte quinze champs de données historiques. Seuls neuf de ces champs ont été utiles pour l'évaluation des performances de notre système (Cf. § 5 - 1.3) et l'analyse de la base de données que nous allons mener.

- date de soumission de l'EBF par l'atelier
- date de début au plus tôt de réalisation de la manœuvre souhaitée par l'atelier
- date de début au plus tard de réalisation de la manœuvre souhaitée par l'atelier
- date de début de réalisation de la manœuvre saisie par le dispatcher
- date de fin de réalisation de la manœuvre saisie par le dispatcher
- type EBF saisi par l'atelier
- code affaire saisi par l'atelier
- code poste affaire saisi par l'atelier
- code non-respect saisi par le dispatcher

## 6 - 3 Analyse de la base de données

L'analyse de la base de données porte exactement sur 24 826 EBF. Ces demandes appartiennent aux deux secteurs géographiques : nous ne centrons plus nos analyses uniquement au secteur Nord. Tous les résultats présentés dans cette section sont issus d'analyses statistiques de cette base de données des prestations ferroviaires.

## 6 - 3.1 Répartition des manœuvres

L'orientation du déplacement d'une manœuvre entre deux ateliers est spécifiée dans le code de poste affaire de l'EBF. Ces codes saisis par les ateliers, sont au nombre de 23 (Cf. Figure 77).

1	Expédition wagons chargés
2	Wagons chargés à rectifier
3	Réception Wagons chargés de l'extérieur
4	Wagons avec erreur de chargement
5	Bobines à refroidir
7	Brouettage navettes
8	Remplacement pousse wagons par un locotracteur
9	Wagons à réparer
10	Wagons déchargés remis au départ
20	Locotracteur attente déchargement
23	Attente déchargement
24	Pesage bascules 2 ou 7 (GTSI)
26	Wagons réformés
27	Attente chargement
30	Etalonnage des bascules 2 et 7
31	Manœuvre interne (intérieur atelier)
32	Manœuvre annulée
33	Retour wagons vides
34	Wagons SNCF non demandés remis au départ
35	Wagons SNCF entrés par erreur remis au départ
36	Wagons SNCF à décharger
38	Attente aiguilleur au poste J
99	Attente fin chargement

Figure 77 : Nomenclature des codes poste affaire

La nature de ces codes permet d'identifier trois classes particulières de manœuvres. Celles :

- propres à la production identifiées par les codes n° 1, 3, 10 et 33
- de triages de ressources identifiées par les codes n° 2, 4, 5, 7, 8, 9, 26, 30, 31, 32, 34, 35 et 36
- d'attentes identifiées par les codes n° 20, 23, 24, 27, 38 et 99

On peut remarquer que l'attente est considérée, ici, comme une manœuvre. Lorsque le locotracteur arrive à un atelier et que le convoi\* à acheminer n'est pas prêt, le dispatcher crée une demande identique a celle de l'atelier mais avec un code d'attente.

L'analyse statistique de ces trois répartitions montre que les quatre codes propres à la production, représentent 98 % de la charge des locotracteurs. Les autres manœuvres que l'on peut considérer comme secondaires ont donc très peu d'influence.

## 6 - 3.2 Répartition des causes de non-respect

Dans le cas où une manœuvre serait effectuée avec un retard par rapport à la fenêtre de temps initiale émise par l'atelier, le dispatcher peut saisir un code de non-respect qui justifie la plage de réalisation de cette manœuvre. Ces codes sont au nombre de 13 (Cf. Figure 78) :

1	Regroupement wagons vides
2	Wagons vides réformés à différer
3	Wagons chargés à rectifier
4	Wagons chargés réformés à transborder
5	Demande fin de poste
6	Priorité suite à demandes dans m tranche horaire
7	Délai anticipation trop court
8	Wagons vides pas disponibles
9	Anomalies à Mardyck (aiguilles et signaux)
10	Panne locotracteur
11	Problème voies ferrées
12	Attente fin de manœuvre
13	Autres

Figure 78 : Nomenclature des codes de non-respect

On quantifie en moyenne à 40 % le nombre d'EBF renseignée par un code de non-respect (Cf. Figure 79).

37 % d'entre elles sont dues à des priorités plus importantes sur d'autres manœuvres (code de non-respect n° 6). En effet, les EBF soumises avec peu voire sans anticipation et dont l'urgence de réalisation est plus importante que les autres manœuvres, sont ordonnancées en priorité. Cela induit des retards sur les réalisations des manœuvres suivantes.

Les demandes de fin de poste (16 %) qui représentent la réalisation d'EBF dans des tranches horaires où les équipes ne sont pas disponibles, occupent une place non négligeable.

Les codes sans justification (code n° 13) saisis par le dispatcher (28 %) ne correspondent à aucun des codes de la nomenclature. Le dispatcher est libre de saisir le code de non-respect sur une manœuvre.



Et, la proportion des autres codes (19 %) représente l'ensemble des codes (n° 1 à 4 et 7 à 12) dont l'occurrence est dispersée et non significative.

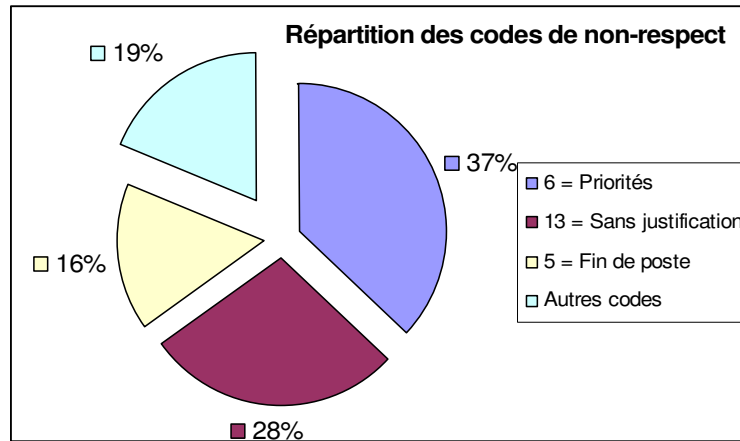


Figure 79 : Répartition des codes de non-respect

Actuellement, le suivi de ces codes de non-respect n'est pas réalisé par le service Mouvement. Les saisies ne sont donc pas contrôlées. Notre système d'aide à la décision qui améliore le taux de satisfaction obtenu par le dispatcher va permettre de réduire cette part d'EBF réalisées avec un certain retard. Nous avons décidé de suivre a posteriori la répartition de ces codes qui contiennent des informations très intéressantes sur la nature des retards, et de quantifier si les actions mises en place avec les ateliers et l'utilisation de notre système par les dispatchers permettent d'améliorer les résultats globaux. De plus, il a été prouvé qu'une meilleure anticipation des demandes permet d'améliorer encore les résultats globaux : c'est ce levier qui va diminuer la part due aux manœuvres prioritaires (code n° 6). Et, une sensibilisation des clients sur les soumissions d'EBF à réaliser dans les tranches horaires où les équipes ne sont pas disponibles va permettre de réduire la part du code de non-respect n° 5.

## 6 - 3.3 Occurrence des EBF

Si nous analysons l'occurrence des EBF, 90 % des demandes sont émises par quatre ateliers sur les trente trois existants (Cf. Figure 80).

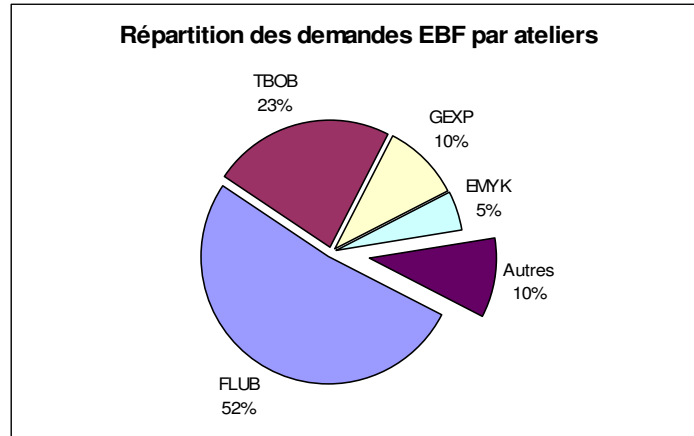


Figure 80 : Répartition des demandes EBF par ateliers

L'atelier flux brames (noté FLUB) situé dans la zone géographique Nord, représente à lui seul 52 % de cette répartition. Il contient l'ensemble des ateliers PAB1, PAB2, PAB3, TPAB et P3.

Et, les ateliers d'expéditions de bobines (TBOB), de la société GTS (GEXP), et de l'usine de Mardyck (EMYK) situés dans le secteur géographique Sud, représentent globalement 38 % des demandes.

Une analyse centrée cette fois ci sur l'occurrence des manœuvres, permet de retrouver cette même répartition. Sur les 102 codes affaire existants, l'occurrence de 6 d'entre eux représente globalement 70 % des demandes (Cf. Figure 81). Ces codes affaire appartiennent aux ateliers FLUB, TBOB et GEXP. De la même manière, on dénombre 4 codes poste affaire sur les 23 existants dont l'occurrence représente 98% des EBF.

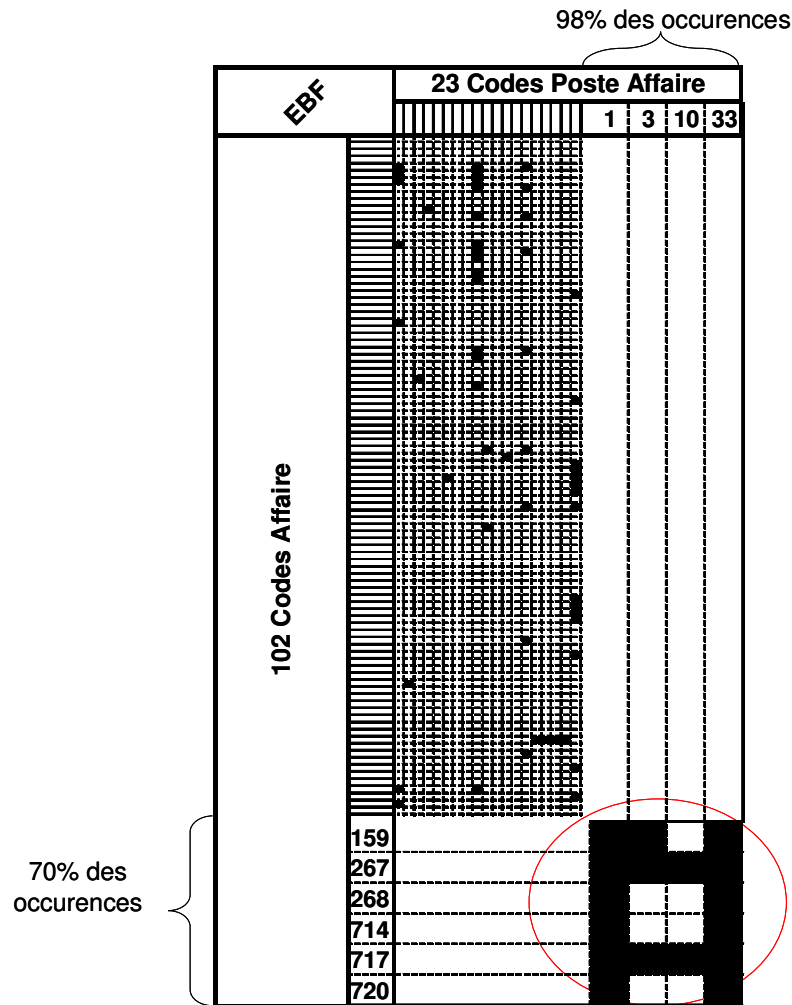


Figure 81 : Répartition des occurrences code affaire et code poste affaire

Ces analyses nous ont permis d'identifier les flux dont l'occurrence est la plus importante. Nous devons ainsi garantir dans notre système les données associées à ces manœuvres et notamment leur durée de réalisation de manière à représenter un planning de charge représentatif de l'activité ferroviaire.

### 6 - 3.4 Durées des manœuvres

La base de données des prestations ferroviaires comporte l'ensemble des EBF réalisées par le dispatcher. Or, les dates de réalisation saisies incluent par défaut les temps de haut le pied nécessaire à l'enchaînement de deux manœuvres. Nous cherchons, ici, à garantir les durées réelles des EBF implantées dans notre système qui sont utiles au processus

d'optimisation. Pour cela, l'application informatique présentée au paragraphe 5 - 1.2, nous a permis de caractériser les durées réelles de chaque EBF.

Cette étude réalisée au cours du dernier semestre 2003, ne s'applique que sur une partie des extractions, c'est-à-dire 7 125 EBF.

Il est à noter que les manœuvres réservées à la gestion du service Mouvement (au nombre de 70) : casse croûte, fin poste, visite médicale, etc. Elles ont une durée fixe de réalisation de 30 minutes n'entrent pas dans le cadre de cette analyse.

On dénombre dans la base de données 145 types de manœuvres différents sur les 258 existants. Il existe donc 113 EBF (= 258 - 145) qui ne sont pas présentes dans notre base. Leur occurrence étant très faible, elles ne rentrent pas dans cette analyse. On considère que leur durée est égale à la valeur moyenne présente dans les tables de nomenclature des années 1993, 2001 et 2003.

Pour les 145 EBF présentes dans la base de données, nous analysons la répartition de leur durée réelle de réalisation. Si on accepte un seuil de risque de 5 %, on dénombre 42 EBF (sur les 145) dont la durée a un écart au maximum de +/-10 minutes par rapport à la moyenne. Ces EBF correspondent aux manœuvres dont l'occurrence des demandes est la plus importante, et dont la valeur de la durée est très faiblement dispersée. Pour les autres EBF, dont la dispersion est plus importante, nous analysons la valeur médiane qui ne prend pas en compte les valeurs extrêmes qui sont des cas rares et peu représentatifs de la réalité.

La règle de choix de la durée réelle de réalisation d'une EBF est la suivante,

Si  $| \text{moyenne} - \text{médiane} | > 10$  minutes,

    Choix de la valeur médiane

    Sinon choix de la valeur moyenne

Grâce à cette analyse, nous avons l'assurance que les durées réelles implantées dans notre système permettent de fournir un planning prévisionnel de charge représentatif de la réalité. Le paramétrage des durées réelles des EBF s'appuie sur l'identification des temps de haut le pied et des heures de réalisations des manœuvres saisies par le dispatcher. Il paraît important de conforter ces valeurs en réalisant régulièrement une mise à jour de ces durées. Cette application est mise en place dans l'industrialisation de notre système.

## 6 - 4 Analyse des dysfonctionnements

La mise en place de SIMPLUS depuis plus de dix ans et sa non réactualisation, ont entraîné une baisse de vigilance et donc de rigueur dans son utilisation quotidienne.

La base de données comporte ainsi des erreurs de saisies manuelles, lors de l'émission des demandes par les ateliers, lors de la saisie des prévisions, des réalisations ou, des codes de non-respect par le dispatcher. En effet, il n'existe aucun module de validation des données saisies manuellement. Notre système comporte cette fonctionnalité qui permet de garantir les sauvegardes liées aux EBF dans SIMPLUS. Il valide l'ensemble des informations décrivant une EBF par rapport à celles contenues dans les différentes nomenclatures.

On trouve également des erreurs de saisie sur les plages horaires, comme par exemple une heure de début de réalisation d'une manœuvre inférieure à l'heure de fin de la demande précédente, ou encore quand la date souhaitée au plus tard est inférieure à la date au plus tôt, etc. La saisie automatique par un bouton d'action sur l'écran de notre système garantit les valeurs temporelles des EBF.

Au niveau de la demande EBF, le dispatcher peut être amené à modifier le code affaire dans le cas où la destination ne pourrait être respectée, pour des problèmes d'encombrements de voies ferrées ou quand la destination a été modifiée a posteriori. Nous avons mis en œuvre dans SOFFI, la possibilité de modifier ou de créer cette donnée d'entrée.

De même, il n'est pas rare de constater des demandes EBF sans code affaire ni code poste affaire, voire même une absence totale de demande, comme par exemple quand le dispatcher du secteur Nord a anticipé une EBF grâce à ses caméras. Nous allons mettre en place un verrou informatique dans l'émission de la demande qui oblige l'atelier à renseigner les codes des manœuvres.

Le dispatcher est également amené à créer lui-même des EBF, quand les ateliers ne possèdent pas l'application SIMPLUS ; les demandes sont émises soit par téléphone soit par fax.

Au niveau opérationnel, lorsque deux demandes sont à réaliser dans la même plage horaire et dont la destination est identique, le dispatcher regroupe ces deux demandes en une seule lors de la réalisation. Au niveau de la sauvegarde informatique, les deux demandes sont conservées mais avec des dates de réalisation identiques et sur le même locotracteur. Notre

système permet de regrouper simultanément plusieurs EBF et conserve uniquement celle qui a été réalisée. Les autres sont supprimées.

Le dispatcher est ainsi conduit à manipuler et à renseigner plusieurs EBF pour optimiser l'utilisation de ses ressources locotracteurs lors de toutes manipulations de convois : regroupements, scindements, etc. Cependant, toutes ces EBF sont sauvegardées avec les mêmes spécifications dans SIMPLUS. On quantifie à 15 % cette part d'EBF « virtuelles » présentes dans la base de données.

Tous les résultats d'analyses effectuées sur cette base doivent donc tenir compte de ce pourcentage. Ainsi, l'évaluation des 40 % d'EBF réalisées avec un code de non-respect (Cf. § 6 - 3.2), soit l'équivalent d'une satisfaction client de 60 %, peut être revalorisée. On peut alors considérer que le dispatcher obtient une satisfaction client moyenne de 75 % (= 60 + 15). On retrouve ainsi une concordance avec les résultats numériques présentés dans le Chapitre 5 où la satisfaction client du dispatcher est évaluée à 76 %.

On observe qu'un suivi des indicateurs au plus près de la réalité ne peut s'effectuer que par une amélioration dans la sauvegarde informatique. Et particulièrement, dans le suivi des modifications apportées sur les EBF, comme les regroupements, les suppressions ou les erreurs venant de l'atelier.

Notre système permet d'assurer une sauvegarde saine et réaliste de ces modifications. De plus, un module de validation de toutes les saisies manuelles garantit les données d'entrées.

## 6 - 5 Améliorations induites par le changement de système

Une utilisation induite par notre système d'aide à la décision est la sauvegarde et la structuration d'informations. On dispose d'un affichage des résultats sous forme d'un planning prévisionnel de charge des locotracteurs avec une évaluation des heures de réalisation des manœuvres, et du retard éventuel. Ce planning est également représenté sous forme d'un diagramme de Gantt qui met en évidence les temps d'occupation globaux des locotracteurs (haut le pied et durée), et les temps propres de transport (durées réelles).

Pour la gestion en temps réel du trafic ferroviaire, il est offert à l'utilisateur la possibilité de créer une demande, d'en supprimer une dans le cas d'un abandon, de fusionner plusieurs

demandes dans le cas de regroupements de convois ou encore de positionner géographiquement et de programmer une heure de disponibilité pour chaque locotracteur.

Un module de validation des données permet également de garantir les informations d'entrées du système. On vérifie que pour chaque EBF créée par le dispatcher ou par l'atelier, les codes affaire et codes poste affaire sont reconnus dans la nomenclature des manœuvres. Si ce n'est pas le cas, on offre au dispatcher le choix d'une manœuvre dans ladite liste. De plus, on vérifie que les heures souhaitées sont concordantes, c'est-à-dire une date de début au plus tard supérieure à la date de début au plus tôt.

Notre maquette permet de gérer les saisies des réalisations par des boutons d'actions qui sauvegardent automatiquement les heures de début et de fin des manœuvres.

## 6 - 6 Industrialisation

### 6 - 6.1 Mise en production par le service informatique

Impliqué depuis avril 2004 dans le déroulement de notre projet, les services informatiques Tixis System et Tixis Technologies ont pris en charge l'industrialisation de notre système d'information SOFFI. Le service Tixis System a la responsabilité du développement du système et le service Tixis Technologies la mise à disposition de l'infrastructure nécessaire à l'hébergement du système, à son exploitation et aux données.

Notre système fait appel à ces deux services car il s'implante au sein de l'architecture actuelle déjà mise en place et notamment en liaison directe avec SIMPLUS. Il est mis à disposition au niveau des deux dispatchings\* Nord et Sud et est totalement transparent vis à vis des ateliers. Il s'alimente en temps réel par les demandes EBF émises dans SIMPLUS, utilise les nomenclatures existantes (locotracteur, codes affaire, codes poste affaire, type EBF, etc.), et vérifie les données d'entrées pour fournir un planning prévisionnel de charge des locotraceurs et le calcul des dates de réalisation de chaque EBF. Ces dates prévisionnelles seront renvoyées vers l'application SIMPLUS tout comme les saisies des réalisations. Il a donc été nécessaire de réaliser à la fois les liaisons d'entrée et de sortie entre les deux systèmes (SIMPLUS et SOFFI), de développer une application générique applicable sur les deux secteurs, et de mettre en œuvre le nouveau système sous une licence d'exploitation industrielle. En effet, notre système SOFFI avait été développé dans un

environnement totalement autonome par rapport à SIMPLUS : il n'existait aucune liaison de re-direction ou de sauvegarde des informations entre les deux applications. De plus, il avait été développé sous une version Freeware nommée NetBeans de Sun Microsystem qui n'était pas exploitable industriellement.

Dans un premier temps, nous avons présenté notre système SOFFI aux services informatiques. Nous avons détaillé ses fonctionnalités, son principe algorithmique de construction des tournées, et sa méthodologie de fonctionnement avec l'utilisation de fichiers au format texte qui alimentent et sauvegardent les résultats de l'application.

Il a fallu tout d'abord trouver un logiciel informatique compatible avec notre programmation qui soit actuellement en exploitation sur le site de Dunkerque. Nous avons retenu la technologie WebSphere développée par IBM. Cependant, cette technologie ne reconnaît pas l'intégralité de nos développements, mais nous avons l'avantage d'avoir un moteur de calcul et une interface utilisateur totalement indépendante. Cette particularité a permis de gagner beaucoup de temps en développement car seule l'interface utilisateur et les liaisons sous jacentes ont dû être reconfigurées. Le moteur de calcul est resté à l'identique ce qui garantit le processus d'optimisation et les résultats présentés.

Puis, nous avons identifié les caractéristiques propres au fonctionnement de notre système et qui ne sont pas présentes dans les nomenclatures de SIMPLUS. Nous avons retenu les notions de précédence, retard maximal admissible (valeur de la date butoir), durée réelle de réalisation associés à chaque EBF, et la matrice des temps haut le pied. Pour une demande EBF donnée, nous allons identifier dans SIMPLUS ses ateliers d'origine et de destination, son code affaire, son code poste affaire, son type EBF, et ses dates de réalisation souhaitées par l'atelier ; tandis que dans SOFFI nous allons identifier sa précédence, son retard admissible et sa durée de réalisation. De même, la matrice des temps de haut le pied sera consultée dans l'application SOFFI.

Nous avons dû au cours de cette première phase gérer tous les problèmes associés aux données d'entrée dans le système. La difficulté principale à laquelle nous avons dû répondre a été de définir quelles informations devaient être fournies par SIMPLUS ou par SOFFI. Nous avons envisagé tout d'abord de mettre l'ensemble des informations contenues dans SIMPLUS et qui sont nécessaires à notre processus d'optimisation, dans le système SOFFI, de manière à éviter l'utilisation parallèle des deux systèmes. Or, SIMPLUS est utilisé par



d'autres acteurs que le service ferroviaire et il est impossible de fournir l'ensemble des informations telles quelles : il est nécessaire de réaliser des tables actualisées propres à la gestion du service Mouvement. Cet aspect nécessite un temps certain de réflexion et surtout de développement informatique. Nous avons donc retenu la configuration présentée précédemment et choisi de réaliser cette tâche dans une seconde phase du projet. Actuellement il est nécessaire de mettre à jour les deux systèmes pour toute création de nouveaux codes de mouvements.

Dans un deuxième temps, nous avons analysé toutes les sorties offertes par le système SOFFI : planning prévisionnel, calcul des heures prévisionnelles de réalisation, affichage des EBF, saisie des EBF réalisées, regroupement. Il a été nécessaire, ici, de définir clairement toutes ces spécifications compte tenu du fait que notre système comporte uniquement les informations nécessaires à son processus d'optimisation.

Nous avons décidé tout d'abord d'afficher l'ensemble des informations contenues dans une demande EBF. Il est nécessaire au dispatcher d'avoir accès à la fois aux codes affaire et poste affaire, aux dates souhaitées par l'atelier, au type EBF mais également aux commentaires saisis par l'atelier, aux codes de non-respect, aux ateliers d'origine et de destination, aux types et au nombre de wagons.

Puis, concernant les prévisions d'exécution des manœuvres qui évoluent au cours du temps en fonction de l'arrivée de nouvelles demandes et des durées réalisées des manœuvres, nous avons décidé de renvoyer cette information aux ateliers non pas à chaque calcul mais par lots et sur décision du dispatcher. Nous voulons éviter que les informations renvoyées dans le système évoluent constamment et que les ateliers ne puissent se fier à ces valeurs pour établir leurs plans de chargement des wagons.

Au sujet des EBF réalisées, nous sommes convenu de garder la fonctionnalité de notre prototype qui mémorise automatiquement l'heure système à laquelle est effectuée l'opération de début et de fin de réalisation. Cela permet d'éviter les erreurs de saisie sur les dates et d'alléger les opérations de renseignement du système par l'utilisateur.

Enfin, au sujet des regroupements de demandes EBF la principale difficulté est de configurer cette manipulation dans SIMPLUS puisqu'elle n'existe pas à l'heure actuelle. Pour gagner en temps de développement, nous avons décidé de conserver dans un premier temps la méthode actuelle du dispatcher. Il renseigne toutes les EBF de regroupements avec les

mêmes dates de réalisation. Pour éviter que notre planning de charge prévisionnel ne prenne en compte ces demandes virtuelles, nous avons mis en place une fonctionnalité qui permet de désactiver temporairement certaines EBF pour la construction des tournées des locotracteurs.

Nous avons abordé l'ensemble de ces spécifications au fur et à mesure des réunions et des points d'avancement avec le service Mouvement, et les services informatiques. Il a été difficile d'évaluer les répercussions qui pouvaient se produire sur SIMPLUS après modifications des informations comme les prévisions d'exécution ou les regroupements. De même, il n'est pas facile de quantifier le volume de développement nécessaire pour réaliser chacune de ces spécifications.

Compte tenu de l'ensemble des modifications que nous souhaitons apporter au système, nous avons décidé de réaliser le projet en deux étapes de manière à valider le système d'information SOFFI avant la fin du contrat de collaboration entre le LAG et Arcelor.

Lors d'une première étape, Tixis System s'était engagé à fournir pour le 20 octobre 2004 une application de type intranet sous technologie WebSphere. Elle est alimentée en temps réel par l'application existante SIMPLUS qui reste maître dans la création des EBF. Puis, elle génère un planning prévisionnel de charge identique à celui fourni par notre prototype visualisable également sous forme d'un diagramme de Gantt. Et, enfin le système SIMPLUS est mis à jour avec le stockage des dates prévisionnelles calculées, des dates réalisées et des codes de non-respect. Aucune base de données n'est mise en place, SIMPLUS reste propriétaire des informations des EBF et de sauvegarde des données.

Dans une deuxième étape (actuellement en cours), l'extension des fonctionnalités sera mise en place et l'application SOFFI sera maître et garant de l'activité ferroviaire du site de Dunkerque. Il sera mis en place une base de données actualisées propres aux activités ferroviaires et l'ensemble des fonctionnalités implantées en première étape seront étendues. Il sera possible de regrouper simultanément plusieurs EBF, de créer manuellement une demande. De plus, un module de suivi et d'actualisation des données permettra de conforter les durées réelles des EBF, de suivre le taux global de satisfaction client, et la répartition des codes de non-respect pour les manœuvres effectuées avec un certain retard. De même, nous suivrons les divergences décisionnelles du dispatcher par rapport au planning prévisionnel proposé. Cet indicateur permettra de comprendre les choix du dispatcher et de faire évoluer les paramètres de la maquette le cas échéant.

Nous étendrons la modification de la création des EBF au niveau des ateliers qui disposent actuellement d'écran de type Ordinateur de Gestion. Il sera proposé une interface intranet dédiée aux ateliers qui permet la création d'EBF avec uniquement les codes affaire et poste affaire accessibles à cet atelier émetteur.

A ce jour, nous avons validé la maquette développée par le service Tixis System qui fournit exactement les mêmes résultats que notre prototype. La difficulté principale a été de trouver le bon processus de validation des informations et de réaliser les opérations d'initialisation et d'optimisation à la même date système. La première phase d'industrialisation de notre système est achevée et sa mise en exploitation est réalisée depuis le 20/10/2004. La deuxième phase d'industrialisation est en cours de traitement par le service Mouvement qui a pris en charge la pérennité de SOFFI.

Le développement de notre système d'information s'inscrit dans le cadre du projet Flux Brames de l'usine de Dunkerque. Un comité de direction du projet a été établi avec comme propriétaire messieurs J-L. CAREYE responsable du service Mouvement, J QUESTIER responsable des parcs sur le secteur du TCC\*, A MATHIEU responsable du projet flux brames. Je me place aux côtés de Mr JL AUTE animateur TPM du service Mouvement en tant que pilotes du projet et Mr A. BEMBENNEK comme chef de projet pour le service informatique.

Pour défendre l'investissement encouru, nous avons garanti que notre système permet d'absorber naturellement l'augmentation de volume de production de l'Acierie visé en 2005 et ainsi, d'acheminer les brames vers le Train Continu à Chaud et les parcs de stockage. L'investissement pour l'industrialisation de l'étape une de notre système par le service Tixis System s'élève à 79,6 k€ avec un supplément de 5,7k€/an pour la mise en exploitation d'une maintenance en jours et heures ouvrés. Côté Tixis Technologies l'investissement s'élève à 8k€ pour l'hébergement de l'application sous WebSphere.

## **6 - 6.2 Fonctionnalités du système d'information**

Une présentation détaillée du système d'information et des interfaces homme/machine sont présentées dans l'annexe 9 - 14.

## **CHAPITRE 7**

# **CONCLUSION ET PERSPECTIVES**

Actuellement, l'interface graphique de travail des dispatchers s'effectue sur un écran du type Ordinateur de Gestion. Ils ont une vision géographique du positionnement de leurs ressources et de la charge de travail (locotracteurs, wagons, réalisation des demandes) en réalisant manuellement et au cours du temps des graphiques horaires de travail.

L'entreprise a en charge depuis le 20 octobre 2004 l'exploitation d'un outil d'aide à la décision baptisé SOFFI (pour Système d'Optimisation de Flux Ferroviaires Industriels) constitué d'un module d'optimisation couplé avec une interface graphique conviviale et simple d'utilisation. Il est mis en oeuvre depuis.

Il est possible grâce à ce système d'accéder à plusieurs historiques de listes alimentées en temps réel. Ils répertorient les règles de fonctionnement des réalisations, regroupements, et suppressions de manœuvres.

Cet outil permet de planifier la production sur une période de temps non fixe. Les résultats numériques montrent une amélioration du taux de satisfaction client même dans le cas le plus critique. De plus, l'analyse d'un critère secondaire sur la durée totale des retards montre encore une amélioration du résultat global et donc une meilleure fluidité des ressources de transport.

La performance et la pertinence du système sont conditionnées par deux points : l'anticipation du besoin, et la saisie des dates au plus tôt et au plus tard par les ateliers. Ces derniers ont été sensibilisés sur l'importance de la formulation du besoin et participent au bon fonctionnement de la régulation du trafic ferroviaire.

Notre projet a permis également de capitaliser le savoir-faire des dispatchers et de mettre en avant plusieurs dysfonctionnements. Notre regard critique sur l'activité globale et les améliorations qui en découlent, contribuent à la démarche de développement du service et de progrès dans sa position de prestataire.

Notre outil peut aussi s'utiliser comme un outil de simulation. La maquette dispose de toutes les informations relatives au réseau ferroviaire et aux divers équipements : nomenclature des ateliers, temps de haut le pied entre les ateliers, nomenclature caractéristique des manœuvres, nomenclature des véhicules, etc.

Ce nombre conséquent d'informations disponibles peut être utilisé pour évaluer le système en termes de capacité. Il est alors aisé de simuler des journées types de production et de quantifier les besoins par analyse des résultats.

On peut dimensionner le nombre de locotracteurs nécessaires pour écouler une charge de travail fixée, identifier les flux les plus pénalisants en terme d'occurrence ou de délai de réalisation, évaluer le nombre de kilomètres parcourus par les locotracteurs et les temps de déplacements à vide.

On peut également apprécier de nouvelles stratégies, comme par exemple le regroupement des deux secteurs géographiques. Il est actuellement difficile d'apprécier sans cet utilitaire, le passage de quatre et six locotracteurs séparés à dix locotracteurs en moyenne, et la réception d'un nombre plus important de demandes à réaliser dans les mêmes délais.

Il est aussi possible d'analyser une nouvelle distribution des demandes et d'évaluer la répartition des ateliers suivant le secteur géographique des dispatchings\*. Est-ce qu'un atelier actuellement dédié sur un secteur ne devrait pas être géré par l'autre secteur ?

De même, il serait intéressant de réaliser une analyse des aléas liés à la cadence des outils de production et des ressources de transport. Cette approche permettrait d'obtenir un planning de charge des locotracteurs plus robuste.

On peut apprécier l'implication du service Mouvement de l'usine de Dunkerque dans une démarche TPM-JIPM depuis 1990. Il se positionne comme le premier service de transport mondial à remporter le prix d'excellence en 2003, et à émettre sa candidature pour le prix de pérennisation en 2005. Cette démarche issue d'une méthode japonaise (JIPM pour « Japan Institut of Plant Maintenance ») est une évolution des méthodes de maintenance qui améliore le rendement des outils de production tout en éliminant les causes de perte. Elle vise le zéro panne, zéro défaut, zéro accident, zéro pollution, zéro nuisance ; et s'appuie sur huit piliers fondamentaux. Notre système SOFFI constitue le pilier 6 qui concerne la détection et la suppression de la non qualité.

Le groupe ARCELOR possède plusieurs sites de production au niveau mondial. Deux sites situés en France, similaires au niveau des outils de production, sont intéressés par la transposition du système.

Une présentation au sein de l'usine méditerranéenne a permis de formuler les concepts influents de notre système d'aide à la décision, sa capacité en terme d'outil de simulation et d'exposer les règles de fonctionnement de l'usine de Dunkerque.

Les similitudes dégagées au niveau de la gestion ferroviaire laissent présager la bonne pérennité de l'application.

## CHAPITRE 8

### BIBLIOGRAPHIE

#### 8 - 1 Problèmes de routage

[Andreatta et Brunetta. 1998] ANDREATTA, G., BRUNETTA, L. Multi-airport ground holding problem : A computational evaluation of exact algorithms. *Operations Research*, 1998, vol 44, n°1, p 57-64.

[Bussieck et al. 1997] BUSSIECK, MR., WINTER, T., ZIMMERMANN, U.T. Discrete optimization in public rail transport. *Mathematical programming*, 1997, vol 79, p 415-444.

[Clarke et Wright 1964] CLARKE, G., WRIGHT, J.W. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points, *Operations Research*, 1964, vol 12, p. 568-581.

[Cordeau et al. 2001] CORDEAU, J-F., SOUMIS, F., DESROSIER, J. Simultaneous Assignment of locomotives and cars to passenger trains. *Operations Research*, 2001, vol 49, n°4, p 531-548.

[Desaulnier et al. 1998] DESAULNIER, G., LAVIGNE, J., SOUMIS, F. Multi-depot vehicle scheduling problems with time windows and waiting costs. *European Journal of Operational Research*, 1998, vol 111, p 479-494.

[Desrochers et al. 1990] DESROCHERS, M., LENSTRA, J-K., SAVELSBERGH, M.W.P. A classification scheme for vehicle routing and scheduling problems. *European Journal of Operational Research*, 1990, vol 46, p 322-332.

[Feillet et al. 2001] FEILLET, D., DEJAX, P., GENDREAU, M. Traveling Salesman Problems With Profits : An overview. *ORP*, 2001, Paris, September 26-29, 13p.

[Feillet 2001] FEILLET, D. Problèmes de tournées avec gains : étude et application au transport inter-usines. *Thèse de doctorat, Laboratoire Productique Logistique, Ecole Centrale de Paris*, 2001.

[Heizer et Render 2002] HEIZER, J., RENDER, B. Vehicle routing and scheduling. *Principles of Operations Management*, 2002, CD Tutorial n°5, 18p. Disponible sur : <http://myphlip.pearsoncmg.com/cw/mpbookhome.cfm?vbookid=464>.

[Kallehauge et al. 2000] KALLEHAUGE, B., LARSEN, J., MADSEN, O.B.G. Lagrangean duality and non-differentiable optimization applied on routing with time windows-experimental results. *Internal report IMM-REP-2000-8, Department of Mathematical Modeling, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 2000.*

[Laporte 1995] LAPORTE, G. Routing problems : A bibliography. *Annals of Operations Research*, 1995, vol 61, p 227-262.

[Savelsbergh et Solomon 1998] SAVELSBERGH, M., SOLOMON, M. Drive : dynamic routing of independent vehicles. *Operations Research*, 1998, vol 46, n° 4, p 474-490.

[Solomon et Desrosiers 1988] SOLOMON, M., DESROSIERS, J. Time window constrained routing and scheduling problems. *Transportation Science*, 1988, vol 22, p 1-13.

## 8 - 2 VRP

[Augera 1995] AUGERA, P. Approche polyédrale de problème de tournées de véhicules. *Thèse de doctorat, Laboratoire ARTEMIS-IMAG, 1995.*

[Fisher 1994] FISHER, M.L. Optimal solution of the vehicle routing problems using minimum k-tress. *Operations Research*, 1994, vol 42, p 626-642.

[Gendreau et al. 1994] GENDREAU, M., HERTZ, A., LAPORTE, G. A tabu search heuristic for the vehicle routing problem. *Management Science*, 1994, vol 40, p 1276-1290.

[Hachicha et al. 2000] HACHICHA, M., HODGSON, J., LAPORTE G. Heuristics for the multi-vehicle routing tour problem. *Computers & Operations Research*, 2000, vol 27, p 29-42.

[Landrieu 2001] LANDRIEU, A. Logistique inverse et collecte des produits techniques en fin de vie, tournées de véhicules avec contraintes. *Thèse de doctorat, Laboratoire d'Automatique de Grenoble, 2001.*

[Laporte 1992] LAPORTE G. The vehicle routing problem : An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, 1992, vol 59, p 345-358.



[Laporte et al. 2000] LAPORTE G., GENDREAU M., POTVIN J-Y, SEMET F. Classical and Modern Heuristics for the Vehicle Routing Problem. *International Transaction in Operational Research*, 2000, vol 7, p 285-300.

[Osman 1993] OSMAN, I.H. Meta-strategy simulated annealing and tabu search algorithm building algorithm for the vehicle routing problem. *Annals of Operations Research*, 1993, vol 41, p 421-451.

[Rego et Roucairol 1994] REGO, C., ROUCAIROL, C. Le problème de tournées de véhicules : étude et résolution approchée. *Rapport de recherche INRIA Rocquencourt*, 1994, n°2197, 90p.

[Shaw 1998] SHAW, P. Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems. *Working Paper*, 1998.

[Taillard 1993] TAILLARD, E. Parallel iterative search methods for vehicle routing problems. *Networks*, 1993, vol 23, p 661-673.

[Taillard et al. 1995] TAILLARD, E., LAPORTE, G., GENDREAU, M. Vehicle Routing with Multiple use of Vehicles. *CRT*, 1995, N°19.

[Toth et Vigo 2002] TOTH, P., VIGO, D. *The Vehicle Routing Problem*. United States of America : SIAM : 2002. 367p.

## 8 - 3 VRPTW

[Antes et Derigs 1995] ANTES, J., DERIGS, U. A new parallel construction algorithm for the vehicle routing problem with time windows. *Working paper, Department of Economics and Computer Science, University of Köln, Germany*, 1995, 19p.

[Desaulnier et al. 1999] DESAULNIER, G., DESROSIERS, J., SOLOMON, M., SOUMIS, F. The VRP with Time Windows. *Les cahiers du GERAD*, 1999b, G-99-13 Revised, June 2000 .

[Desrochers et al. 1992] DESROCHERS, M., DESROSIERS, J., SOLOMON, M. A new optimization algorithm for the vehicle routing problem with time windows. *Operations Research*, 1992, vol 40, n° 2, p 342-354.

[Fisher et al. 1997] FISHER, M.L., JORNSTEN, K.O., MADSEN, O.B.G. Vehicle Routing with time windows, two optimization algorithms. *Operations Research*, 1997, vol 45, p 488-492.

- [Kohl et Madsen 1997] KOHL, N., MADSEN, O.B.G. An optimization algorithm for the vehicle routing problem with time windows based on Lagrangean relaxation. *Operations Research*, 1997, vol 45, p 395-406.
- [Kolen et al. 1987] KOLEN, A.W.J., KAN, A.H.G.R., TRIENEKENS, H.W.J.M. Vehicle Routing with Time Windows. *Operations Research*, 1987, vol 35, p 266-273.
- [Potvin et Rousseau 1993] POTVIN, J-Y, ROUSSEAU, J-M. A parallel route building algorithm for the vehicle routing and scheduling problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, 1993, vol 66, p 331-340.
- [Potvin et Rousseau 1995] POTVIN, J-Y, ROUSSEAU, J-M. An exchange heuristic for routing problems with time windows. *Journal of Operational Research Society*, 1995, vol 46, p 1433-1446.
- [Potvin et Bengio 1996] POTVIN, J-Y, BENGIO, S. The vehicle routing problems with time windows, Part 2, Genetic search. *INFORMS Journal on Computing*, 1996, vol 8, p 165-172.
- [Russel 1995] RUSSEL, R.A. Hybrid heuristics for the vehicle routing problem with time windows. *Transportation Science*, 1995, vol 29, p 156-166.
- [Schulze et Fahle 1999] SCHULZE, J., FAHLE, T. A parallel algorithm for the vehicle routing problem with time window constraints. *Annal of Operations Research*, 1999, vol 86, p 585-607.
- [Solomon 1986] SOLOMON, M. On the worst-case performance of some heuristics for the vehicle routing and scheduling problem with time windows constraints. *Network*, 1986, vol 16, p 161-174.
- [Solomon 1987] SOLOMON, M. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time windows constraints. *Operations Research*, 1987, vol 35, n° 2, p 254-265.
- [Tan et al. 2000] TAN, K.C., LEE, H.C., ZHU, K.Q. Heuristic methods for vehicle routing problem with time window. *Artificial Intelligent in Engineering*, 2000, p 289-295.
- [Thangiah et al. 1993] THANGIAH, S., OSMAN, I.H., SUN, T. Hybrid genetic algorithm, simulated annealing and tabu search methods for vehicle routing problems with time windows. *Technical Report UKC/OR94/4, Institute of Mathematics and Statistics, University of Kent, Canterbury, UK, 1994.*

[Thangiah et al. 1996] THANGIAH, S., POTVIN, J-Y., SUN, T. Heuristic approaches to vehicle routing with backhauls and time windows. *International Journal of Computers and Operations Research*, 1996, p 1043-1057.

[Zhu 1999] ZHU, Q. Heuristic Methods for Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Bachelor Degree of Engineering, Department of Electrical Engineering, National University of Singapore*, 1999.

## 8 - 4 Gestion de production : ordonnancement, techniques d'optimisation

[Carlier et Chretienne 1988] CARLIER, J., CHRETIENNE, P. *Problèmes d'ordonnancement, modélisation / complexité / algorithmes*. Paris: Masson, 1988. 326p.

[Chu et Proth 1996] CHU, C., PROTH, J-M. *L'ordonnancement et ses applications*. Paris : Masson, 1996.

[Dupond 1998] DUPONT, L. *La gestion industrielle*. Paris : Hermès, 1998. 414p.

[Esquirol et Lopez 1999] ESQUIROL, P., LOPEZ, P. *L'Ordonnancement*. Paris : Economica, 1999. 141p.

[Gioretti] GIORGETTI, A. Cours n°9 : Algorithmes et complexité. *Laboratoire d'informatique de l'Université de Franche-Comté, France*. Disponible sur : <http://lifc.univ-fcomte.fr/~giorgett/Ens/Poo/PDF/09complex.pdf>.

[Goldberg 1994] GOLDBERG, E, D. *Algorithmes génétiques, exploration, optimisation et apprentissage automatique*. Paris: Addison-Wesley France, 1994. 410p.

[Henet 1997] HENNET, J-C. *Concepts et outils pour les systèmes de production*. Toulouse : Cépaduès Editions, 1997. 325p.

[Javel 2000] JAVEL, G. *Organisation et gestion de la production*. Paris : Dunod, 2ème éd., 2000. 405p.

[Laburte 1998] LABURTE, F. *Contraintes et algorithmes en optimisation combinatoire. Thèse de doctorat, Université Paris VII, Denis Diderot, UFR d'Informatique*, 1998.

[Mathe et Tixier 1987] MATHE, M, TIXIER, D. *La logistique*. Que sais-je ?, PUF, n°2351, Paris, 1987, 127p.

[T'Kindt et Billaut 2002] T'KINDT, V., BILLAUT, J-C. *Multi-criteria Scheduling, Theory, Models and Algorithms*. Springer, 2002.

## 8 - 5 Manuels supports

[David et Alla 1989] DAVID, R., ALLA, H. *Du Grafset aux réseaux de Petri*. Paris : Hermès, 1989. 424 p.

[Flanagan 2002] FLANAGAN, D. *Java in a Nutshell, Manuel de référence pour java 2*. Paris : O'Reilly, 2002. 1128p.

## 8 - 6 Rapports internes Arcelor

### 8 - 6.1 Rapports de mission

[Legroux 2003] LEGROUX, C. Optimisation des flux ferroviaires. *Rapport d'étude* n° EI/CLG.03.068, Sollac Atlantique, Dunkerque, 30/06/2003. 49p.

[Lefebvre 2003] LEFEBVRE, L. Faculté de médecine, Henri Warembourg, DU d'ergonomie : Etude ergonomique, projet de conception dispatching fonte, Sollac Dunkerque. Dunkerque : Sollac Atlantique, Août 2003. 98p.

[Toupet 2003] TOUPET, C. Retour Semaine 48 au LAG. Dunkerque : Sollac Atlantique, 03/12/2003. 9p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/03099.

[Toupet 2003] TOUPET, C. Mémoire de deuxième année de thèse : optimisation des flux de production. Dunkerque : Sollac Atlantique, 04/07/2003. 78p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/03060.

[Toupet 2003] TOUPET, C. Bilan de la semaine du 06 au 17 janvier 2003 au LAG. Dunkerque : Sollac Atlantique, 11/02/2003. 24p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/03013.

[Toupet 2003] TOUPET, C. Note d'avancement sur l'étude DC.02.19.TC, Optimisation des mouvements fer. Dunkerque : Sollac Atlantique, 07/02/2003. 10p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/03012.

- [Toupet 2002] TOUPET, C. Bilan de la semaine du 04 au 15 novembre 2002 au LAG. Dunkerque : Sollac Atlantique, 20/12/2002. 17p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/02124.
- [Toupet 2002] TOUPET, C. Etude DC.02.033.TC : Modèle d'optimisation de répartition des flux sur les zones de stockage. Dunkerque : Sollac Atlantique, 18/12/2002. 17p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/02123.
- [Toupet 2002] TOUPET, C. Note d'avancement DC.02.019.TC : Optimisation des mouvements fer. Dunkerque : Sollac Atlantique, 31/10/2002. 18p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/02106.
- [Toupet 2002] TOUPET, C. Bilan de la semaine du 04 au 15 mars 2002 au LAG. Dunkerque : Sollac Atlantique, 18/03/2002. 18p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/02025.
- [Toupet 2002] TOUPET, C., FIORELLI, C. Etude DC.02.001.TC : Disponibilité des locotracteurs sur le flux brame. Dunkerque : Sollac Atlantique, 28/02/2002. 21p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/02016.
- [Toupet 2002] TOUPET, C. Bilan de la semaine du 15 au 26 juillet 2002 au LAG. Dunkerque : Sollac Atlantique, 03/10/2002. 18p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/02094.
- [Toupet 2002] TOUPET, C. Bilan de la semaine du 23 au 27 septembre 2002 au LAG. Dunkerque : Sollac Atlantique, 02/10/2002. 8p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/02093.
- [Toupet 2002] TOUPET, C. Mémoire de première année de thèse : optimisation des flux de production. Dunkerque : Sollac Atlantique, 22/08/2002. 82p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/02081.
- [Toupet 2002] TOUPET, C. Bilan de la semaine du 03 au 14 juin 2002 au LAG. Dunkerque : Sollac Atlantique, 01/07/2002. 8p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/02066.
- [Toupet 2002] TOUPET, C. Corrélation entre flux et volume stocké. Dunkerque : Sollac Atlantique, 23/08/2002. 8p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/02052.
- [Toupet 2002] TOUPET, C. Matrice de répartition des flux. Dunkerque : Sollac Atlantique, 26/04/2002. 11p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/02046.
- [Toupet 2002] TOUPET, C. Bilan de la semaine du 03 au 15 janvier 2002 au LAG. Dunkerque : Sollac Atlantique, 21/01/2002. 4p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/02011.
- [Toupet 2001] TOUPET, C. Bilan de la semaine du 22 au 26 octobre 2001 au LAG. Dunkerque : Sollac Atlantique, 30/10/2001. 8p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/01095.
-

[Toupet 2001] TOUPET, C. Etude DC.01.019.TC : ParcT7 avec portique. Dunkerque : Sollac Atlantique, 26/09/2001. 7p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/01084.

[Toupet 2001] TOUPET, C. Poste P3 avec engins. Dunkerque : Sollac Atlantique, 26/09/2001. 8p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/01080. Complément d'étude n° EI/CLT/01097.

## 8 - 6.2 Compte rendu de réunions

[Toupet 2004] TOUPET, C. CR réunion MSI du 01/04/2004 (Mise en opérationnelle du projet SOFFI). Dunkerque : Sollac Atlantique, 02/04/2004. 1 p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/04024.

[Toupet 2004] TOUPET, C. CR réunion du 20/01/2004, Mouvement. Dunkerque : Sollac Atlantique, 21/01/2004. 2p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/04008.

[Toupet 2004] TOUPET, C. CR réunion du 13/01/2004 à Grenoble. Dunkerque : Sollac Atlantique, 13/01/2004. 1p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/04002.

[Toupet 2003] TOUPET, C. Clôture étude DC.02.018.MV. Dunkerque : Sollac Atlantique, 10/11/2003. 1p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/03093.

[Toupet 2003] TOUPET, C. Clôture étude DC.02.017.TC. Dunkerque : Sollac Atlantique, 07/10/2003. 1p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/03080.

[Toupet 2003] TOUPET, C. Description de la phase d'implémentation du prototype SOFFI. Dunkerque : Sollac Atlantique, 06/10/2003. 3p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/03079.

[Toupet 2003] TOUPET, C. CR Réunion tripartite du 19/09/2003 à Dunkerque. Dunkerque : Sollac Atlantique, 19/09/2003. 1p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/03071.

[Toupet 2003] TOUPET, C. Glossaire des termes utilisés pour l'optimisation des mouvements fer. Dunkerque : Sollac Atlantique, 10/04/2003. 3p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/03035.

[Toupet 2003] TOUPET, C. CR visite dispatching. Dunkerque : Sollac Atlantique, 02/04/2003. 2p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/03030.

[Toupet 2003] TOUPET, C. Etude DC.02.19.TC : Optimisation des mouvements fer, point d'avancement. Dunkerque : Sollac Atlantique, 06/03/2003. 1p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/03017.

[Toupet 2003] TOUPET, C. CR Réunion tripartite du 12/02/2003 à Paris. Dunkerque : Sollac Atlantique, 21/02/2003. 1p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/03016.

---

- [Toupet 2003] TOUPET, C. CR réunion du 28/01/2003 relatif à l'étude DC.02.018.TC : Modèle réseau de petri du service ferroviaire. Dunkerque : Sollac Atlantique, 29/01/2003. 5p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/03009.
- [Toupet 2002] TOUPET, C. CR réunion tripartite du 08/11/2002 à Grenoble. Dunkerque : Sollac Atlantique, 19/11/2002. 1p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/02113.
- [Toupet 2002] TOUPET, C. CR réunion tripartite du 29/08/2002 à Dunkerque. Dunkerque : Sollac Atlantique, 01/10/2002. 2p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/02092.
- [Toupet 2002] TOUPET, C. CR réunion tripartite du 06/06/2002 à Grenoble. Dunkerque : Sollac Atlantique, 19/06/2002. 1p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/02063.
- [Toupet 2002] TOUPET, C. CR réunion tripartite du 18/04/2002 à Dunkerque. Dunkerque : Sollac Atlantique, 22/04/2002. 1p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/02043.
- [Toupet 2002] TOUPET, C. CR réunion tripartite du 24/01/2002 à Dunkerque. Dunkerque : Sollac Atlantique, 26/03/2002. 2p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/02027.
- [Toupet 2001] TOUPET, C. Synthèse de la note d'étude n° EI/CLT/01106. Dunkerque : Sollac Atlantique, 18/12/2001. 5p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/01124.
- [Toupet 2001] TOUPET, C. Corrélation entre flux et volume stocké. Dunkerque : Sollac Atlantique, 21/11/2001. 5p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/01106.
- [Toupet 2001] TOUPET, C. Rectification de l'étude n° EI/CLT/01080. Dunkerque : Sollac Atlantique, 06/11/2001. 8p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/01097.
- [Toupet 2001] TOUPET, C. CR réunion tripartite du 21/09/2001 à Grenoble. Dunkerque : Sollac Atlantique, 27/09/2001. 7p. *Rapport d'étude* n° EI/CLT/01085.

# CHAPITRE 9

## ANNEXES

<b>CHAPITRE 9 ANNEXES</b>	<b>143</b>
<b>9 - 1 NOMENCLATURE DES ATELIERS</b>	<b>145</b>
<b>9 - 2 NOMENCLATURES DES MANŒUVRES</b>	<b>146</b>
<b>9 - 3 NOMENCLATURE DES CODES POSTE AFFAIRE</b>	<b>150</b>
9 - 3.1 CODES DU SERVICE MOUVEMENT	150
9 - 3.2 CODES DES ATELIERS	151
<b>9 - 4 MATRICE DES TEMPS DE HAUT LE PIED</b>	<b>152</b>
<b>9 - 5 EBF = DEMANDE INFORMATIQUE</b>	<b>153</b>
<b>9 - 6 EBF = PREVISION D'EXECUTION</b>	<b>153</b>
<b>9 - 7 EBF = REALISATIONS</b>	<b>154</b>
<b>9 - 8 CODES DE NON-RESPECT</b>	<b>155</b>
<b>9 - 9 ETAT DE L'ART VRPTW</b>	<b>155</b>
9 - 9.1 VRP	156
9 - 9.1.1 Méthodes exactes	156
9 - 9.1.2 Heuristiques	158
9 - 9.1.3 Heuristiques d'amélioration	159
9 - 9.1.4 Méta heuristiques	160
9 - 9.2 VRPTW	161
9 - 9.2.1 Construction de tournées	161
9 - 9.2.2 Amélioration de tournées	163
9 - 9.2.3 Combinaison d'heuristiques	163
9 - 9.2.4 Méta heuristiques	164
<b>9 - 10 EVALUATIONS DES PARAMETRES</b>	<b>165</b>
<b>9 - 11 EVALUATION DES CRITERES D'ARRET</b>	<b>167</b>
<b>9 - 12 EVALUATION DES PERFORMANCES</b>	<b>170</b>
<b>9 - 13 EVALUATIONS DES ANTICIPATIONS</b>	<b>172</b>
<b>9 - 14 FONCTIONNALITES DU SYSTEME D'INFORMATION</b>	<b>173</b>
	143



*Chapitre 9 – Annexes*

---

9 - 14.1 PRESENTATION GENERALE _____	173
9 - 14.2 FONCTIONNALITES DE L'IHM _____	174
<b>9 - 15 GLOSSAIRE _____</b>	<b>180</b>

## 9 - 1 Nomenclature des ateliers

Secteur NORD	Secteur SUD				Service Mouvement
ACAR	APEF	ETUB	GOXY	TFIN	GARA
CC24	AREC	FSUD	PDC1	TSKI	MANU
PAB1	EISO	FTRI	PDC2		WAGO
PAB2	EMK	GCYL	SNCF		
PAB3	ESCA	GEXP	SUD		
TPAB	ESOL	GGRE	TBOB		
VMFA	ETOL	GHA6	TCYL		

Signification des sigles :

Ateliers	Libellé
ACAR	Réception Carbone
CC24	Parc à brames de la Coulée Continue 24
PAB1	Parc à brames des Coulées Continue 21, 22, et 23
PAB2	Parc à brames extérieur Quarto
PAB3	Parc à brames extérieur entrée TCC
TPAB	Parc à brames intérieur du TCC
VMFA	Vestiaire secteur Nord
APEF	Parc à ferrailles
AREC	Réception Chaux
EISO	Parc de stockage de tubes
EMK	Usine de Mardyk
ESCA	Quai maritime
ESOL	Société Solomat
ETOL	Parc de stockage de tôles à expédier
ETUB	Parc de stockage de tubes à expédier
FSUD	Faisceau de triage secteur Sud

Ateliers	Libellé
FTRI	Vestiaire secteur Sud
GCYL	Parc de stockage de cylindres à expédier
GEXP	Expéditions de tôles société GTSI
GGRE	Parc de stockage de tôles (Nouveau)
GHA6	Parc de stockage de tôles (Ancien)
GOXY	Zone d'oxycoupage
PDC1	Réception Coke
PDC2	Réception Castine
SNCF	Faisceau d'échange avec la SNCF
SUD	Zone de triage secteur Sud
TBOB	Expédition bobines sortie TCC
TCYL	Parc de stockage de cylindres
TFIN	Parc de stockage de chutes de bobines
TSKI	Parc de stockage de bobines
GARA	Entrepôt de stockage des locotracteurs
MANU	Atelier de manutention
WAGO	Atelier de réparation des wagons

## 9 - 2 Nomenclatures des manœuvres

Départements	Atelier émetteur demande	Secteur Mouvement	Manœuvre	Atelier origine	Atelier destination	Durée moyenne	Retard Permis	Precedence	Libellé
ACIER	FLUB	SUD	150	1 ESCA	PAB2	50	15	150-33	Réception brames quai de l'Escaut pour GTSI Quarto
				33 PAB2	ESCA	30	15	XXX-XXX	
ACIER	FLUB	SUD	155	3 SNCF	PAB2	61	30	XXX-XXX	Réception SNCF de brames de Dilling
				10 PAB2	SNCF	49	30	155-03	
GTSI	GGRE	SUD	157	33 GGRE	GGRE	25	120	XXX-XXX	Wagons internes vides à l'entrée atelier
GTSI	GEXP		158	33 GEXP	GEXP	39	120	XXX-XXX	Wagons internes vides à l'entrée atelier
GTSI	GEXP	SUD	159	1 GEXP	SNCF	38	30	XXX-XXX	Expédition de tôles par SNCF
				2 SNCF	GEXP	63	30	159-01	
				3 SNCF	GEXP	45	30	159-01	
				24 GEXP	SNCF	51	30	159-01	
				32 SNCF	GEXP	35	30	159-01	
				33 SNCF	GEXP	55	30	159-01	
GTSI	GEXP	SUD	160	1 GEXP	ESCA	59	15	XXX-XXX	Expédition de tôles par le quai de l'Escaut
				2 ESCA	GEXP	57	15	160-01	
				24 GEXP	ESCA	20	15	160-01	
				32 ESCA	GEXP	15	15	160-01	
				33 ESCA	GEXP	52	15	160-01	
GTSI	GGRE	SUD	161	1 GGRE	SNCF	38	30	XXX-XXX	Expédition de tôles de Tracogep AT1 (nouveau Tracogep) par SNCF
				2 SNCF	GGRE	22	30	161-01	
				10 GGRE	SNCF	35	30	161-01	
				24 GGRE	SNCF	65	30	161-01	
GTSI	GHA6	SUD	162	1 GHA6	SNCF	33	30	XXX-XXX	Expédition de tôles de Tracogep AT2 (ancien Tracogep) par SNCF
				2 SNCF	GHA6	40	30	162-01	
				24 GHA6	SNCF	38	30	162-01	
				33 SNCF	GHA6	39	30	162-01	
GTSI	GEXP	SUD	163	1 GEXP	ETOL	42	60	XXX-XXX	Expédition de tôles de GTSI vers Europe
				24 GEXP	ETOL	41	60	163-01	
				32 ETOL	GEXP	33	60	163-01	
GTSI	GEXP	SUD	164	1 GEXP	GGRE	17	120	XXX-XXX	Transport de tôles de GTSI vers Tracogep AT1
				33 GGRE	GEXP	52	120	164-01	
				33 GHA6	GEXP	40	120	XXX-XXX	
GTSI	GEXP	SUD	165	1 GEXP	GHA6	40	120	XXX-XXX	Transport de tôles de GTSI vers Tracogep AT2
				33 GHA6	GEXP	46	120	165-01	
GTSI	GEXP	SUD	167	7 GEXP	GOXY	31	120	XXX-XXX	Brouettage aller retour de tôles sur navette et raccord
GTSI	GOXY	SUD	168	1 GOXY	APEF	43	120	XXX-XXX	Evacuation de chutes oxycoupages vers le parc à ferrailles
				24 GOXY	APEF	57	120	168-01	
				32 APEF	GOXY	15	120	168-01	
				33 APEF	GOXY	30	120	168-01	
GTSI	GOXY	SUD	170	1 GOXY	PDC1	45	120	XXX-XXX	Evacuation de chutes oxycoupages refusées par le parc à ferrailles et acheminées vers le parc Siméoni
GTSI	GCYL	SUD	172	3 SNCF	GCYL	52	30	XXX-XXX	Réception de cylindres
				10 GCYL	SNCF	75	30	172-03	
GTSI	GCYL	SUD	173	1 GCYL	ESOL	142	120	XXX-XXX	Acheminement de cylindres rebutés vers Solomat
GTSI	GOXY	SUD	175	1 GOXY	SNCF	39	30	XXX-XXX	Expédition chutes oxycoupages par SNCF
				2 SNCF	GOXY	22	30	175-01	
				24 GOXY	SNCF	45	30	175-01	
				33 SNCF	GOXY	40	30	175-01	
TCC	TFIN	SUD	240	1 TFIN	SNCF	44	30	XXX-XXX	Expédition d'ébauches par SNCF
				24 TFIN	SNCF	31	30	240-01	
				32 SNCF	TFIN	65	30	240-01	
TCC	TFIN	SUD	241	33 SNCF	TFIN	38	30	240-01	Evacuation de chutes d'éboutage C.30 vers le parc à ferrailles Acierie
				1 TFIN	APEF	33	120	XXX-XXX	
				24 TFIN	APEF	30	120	241-01	
TCC	TFIN	SUD	242	33 APEF	TFIN	36	120	241-01	Evacuation d'ébauches à découper vers Solomat
				1 TFIN	ESOL	32	60	XXX-XXX	
TCC	TFIN	SUD	243	33 ESOL	TFIN	33	60	242-01	Evacuation de chutes de bobines de 3 TCC vers le parc à ferrailles Acierie
				1 TFIN	APEF	30	120	XXX-XXX	
				24 TFIN	APEF	27	120	243-01	
TCC	TFIN	SUD	244	33 APEF	TFIN	21	120	243-01	Evacuation de chutes de bobines à découper vers Solomat
				1 TFIN	ESOL	59	60	XXX-XXX	
				24 TFIN	ESOL	28	60	244-01	
ACIER	FLUB	NORD	254	33 ESOL	TFIN	38	60	244-01	Transport de brames de la voie 7 TAB pour l'Acierie 1
				1 TPAB	CC24	17	0	254-33	
				33 CC24	TPAB	11	0	XXX-XXX	
TCC	TPAB	NORD	256	1 TPAB	ESOL	22	480	XXX-XXX	Evacuation de chutes de brames vers Solomat
				33 ESOL	TPAB	30	480	256-01	
				99 ESOL	TPAB	38	480	XXX-XXX	

Chapitre 9 – Annexes

TCC	TPAB	NORD	257	1	TPAB	TPAB	23	60	XXX-XXX	Manœuvre interne sur les voies du PAB TCC INT (voie 7, 15, 15 bis)
				33	TPAB	TPAB	19	60	XXX-XXX	
TCC	TPAB	NORD	258	1	TPAB	TPAB	85	60	XXX-XXX	Attente de manœuvre à la demande du FLUB
				33	TPAB	TPAB	32	60	XXX-XXX	
TCC	TPAB	NORD	259	1	TPAB	TPAB	25	60	XXX-XXX	Manœuvre interne FLUB
TCC	TSKI	SUD	260	1	TSKI	SNCF	34	30	XXX-XXX	Expédition de bobines par SNCF
				2	SNCF	TSKI	40	30	260-01	
				3	SNCF	TSKI	25	30	260-01	
				33	SNCF	TSKI	32	30	260-01	
TCC	TSKI	SUD	262	1	TSKI	ESCA	64	15	XXX-XXX	Expédition de bobines par le quai de l'Escaut
				33	ESCA	TSKI	33	15	262-01	
TCC	TSKI	SUD	263	1	TSKI	TCYL	21	20	XXX-XXX	Manœuvre de cylindres du HC vers 4 TCC aller retour
				33	TCYL	TSKI	27	20	263-01	
TCC	TSKI	SUD	264	1	TSKI	TBOB	28	20	XXX-XXX	Manœuvre de bobines du HC vers TCC
				33	TBOB	TSKI	33	20	264-01	
TCC	TSKI	SUD	265	1	TSKI	APEF	47	120	XXX-XXX	Evacuation de chutes de bobines vers le parc à ferrailles cat 10
				24	TSKI	APEF	33	120	265-01	
				32	APEF	TSKI	85	120	265-01	
				33	APEF	TSKI	41	120	265-01	
TCC	TSKI	SUD	266	24	TSKI	APEF	60	120	XXX-XXX	Evacuation des bobines enfournables en provenance du TCC
TCC	TBOB	SUD	267	1	TBOB	SNCF	44	30	XXX-XXX	Expédition de bobines du TCC par SNCF
				2	SNCF	TBOB	66	30	267-01	
				3	SNCF	TBOB	55	30	267-01	
				4	SNCF	TBOB	110	30	267-01	
				10	TBOB	SNCF	52	30	267-01	
				32	SNCF	TBOB	40	30	267-01	
				33	SNCF	TBOB	42	30	267-01	
TCC	TBOB	SUD	268	1	TBOB	EMYK	47	30	XXX-XXX	Expédition de bobines vers Mardyck
				9	TBOB	WAGO	48	30	268-01	
				32	EMYK	TBOB	37	30	268-01	
				33	EMYK	TBOB	38	30	268-01	
TCC	TBOB	SUD	269	1	TBOB	ESCA	43	15	XXX-XXX	Expédition de bobines vers le quai de l'Escaut
				33	ESCA	TBOB	30	15	269-01	
TCC	TBOB	SUD	270	1	TBOB	TSKI	25	20	XXX-XXX	Manœuvre de bobines sur navettes du TCC vers le HC
TCC	TBOB	SUD	271	1	TBOB	TBOB	15	20	XXX-XXX	Bobines sorties du TCC vers l'extérieur à refroidir à rentrer ensuite avec triage
				5	TBOB	TBOB	52	20	XXX-XXX	
				33	TBOB	TBOB	37	20	XXX-XXX	
TCC	TBOB	SUD	272	1	TBOB	APEF	22	120	XXX-XXX	Evacuation de chutes de bobines cat 11 vers le parc à ferrailles
				24	TBOB	APEF	45	120	272-01	
				33	APEF	TBOB	25	120	272-01	
TCC	TBOB	SUD	273	1	TBOB	ESOL	15	60	XXX-XXX	Evacuation de bobines à découper vers Solomat
				33	ESOL	TBOB	37	60	273-01	
TCC	TPAB	NORD	275	1	TPAB	TPAB	22	60	XXX-XXX	Brouettage des rames de cars ou de navettes sur les voies 15, 15 bis, et 7 du TAB
				33	TPAB	TPAB	26	60	XXX-XXX	
				99	TPAB	TPAB	53	60	XXX-XXX	
TCC	TBOB	SUD	276	1	TBOB	TBOB	25	20	XXX-XXX	Brouettage stockage de bobines du pars à brames TCC voies 13 et 14
TCC	TBOB	SUD	277	33	TBOB	TBOB	24	20	XXX-XXX	Wagons internes vides à l'entrée atelier
TCC	TSKI	SUD	278	33	TSKI	TSKI	32	20	XXX-XXX	Wagons internes vides à l'entrée atelier
MATAGGLO	PDC1	SUD	311	3	SNCF	PDC1	96	30	XXX-XXX	Réception de minerai de l'extérieur pour Matagallo
				10	PDC1	SNCF	91	30	311-03	
MATAGGLO	PDC1	SUD	315	3	SNCF	PDC1	35	30	XXX-XXX	Réception de coke de l'extérieur
				10	PDC1	SNCF	35	30	315-01	
MATAGGLO	PDC1	SUD	317	33	MANU	PDC1	45	30	XXX-XXX	Récupération du coke sur 1Fx minerai vers Matagallo
MATAGGLO	PDC2	SUD	319	1	SNCF	PDC2	74	30	XXX-XXX	Réception de castine au faisceau sud pour la trémie F
				3	PDC2	SNCF	80	30	319-01	
				10	SNCF	PDC2	60	30	319-01	
				26	SNCF	GARA	47	30	319-01	
				32	PDC2	SNCF	65	30	319-01	
TR MVT	SUD	SUD	454	1	SUD	SUD	50	60	XXX-XXX	Etalonnage des balances 2 et 7
				30	SUD	SUD	205	60	XXX-XXX	
ACIER	FLUB	NORD	514	1	CC24	PAB1	20	0	XXX-XXX	Acheminement de brames de la CC24 vers PAB1
				33	PAB1	CC24	8	0	514-01	
				99	PAB1	CC24	26	0	514-01	
ACIER	FLUB	NORD	515	1	CC24	PAB3	19	0	XXX-XXX	Acheminement de brames de la CC24 vers PAB3
				33	PAB3	CC24	17	0	515-01	
				99	PAB3	CC24	25	0	515-01	
ACIER	FLUB	NORD	516	1	CC24	TPAB	19	0	XXX-XXX	Acheminement de brames de la CC24 vers TCC INT
				9	CC24	WAGO	40	0	516-01	
				33	TPAB	CC24	19	0	516-01	
				99	TPAB	CC24	29	0	516-01	

Chapitre 9 – Annexes

ACIER	FLUB	NORD	517	1	CC24	ESOL	14	120	XXX-XXX	Acheminement de chutes de brames de la CC24 vers Solomat
				33	ESOL	CC24	27	120	517-01	
				99	ESOL	CC24	40	120	517-01	
ACIER	FLUB	NORD	518	1	CC24	PAB2	20	120	XXX-XXX	Acheminement de chutes de brames de la CC24 vers PAB2
				33	PAB2	CC24	13	120	518-01	
				99	PAB2	CC24	27	120	518-01	
ACIER	FLUB	NORD	519	1	CC24	CC24	18	120	XXX-XXX	Manœuvre corset voie à voie à la CC24
ACIER	ACAR	NORD	523	1	FSUD	ACAR	44	120	XXX-XXX	Réception des citernes carbure
				3	ACAR	FSUD	37	120	523-01	
				10	FSUD	ACAR	37	120	523-01	
				32	ACAR	FSUD	60	120	523-01	
				97	ACAR	ACAR	39	120	523-01	
ACIER	FLUB	NORD	536	1	CC24	CC24	22	0	XXX-XXX	Manœuvre interne à la CC24
				33	CC24	CC24	21	0	XXX-XXX	
TR MVT	SUD	SUD	550	3	SUD	SUD	55	60	XXX-XXX	Réception de matériel divers
TR MVT	FSUD	SUD	610	1	FSUD	AREC	48	60	XXX-XXX	Réception de chaux
				3	AREC	FSUD	46	60	610-01	
				10	FSUD	AREC	66	60	610-01	
				26	AREC	FSUD	42	60	610-01	
ACIER	FLUB	NORD	700	3	SNCF	PAB2	55	30	XXX-XXX	Réception de brames Dilling par SNCF
ACIER	FLUB	NORD	702	1	PAB3	SNCF	68	30	XXX-XXX	Réception de brames de Hollande par SNCF
				3	SNCF	PAB3	71	30	702-01	
				10	PAB3	SNCF	78	30	702-01	
				33	SNCF	PAB3	70	30	702-01	
ACIER	FLUB	NORD	703	1	PAB3	ESCA	45	15	XXX-XXX	Réception de brames du quai de l'Escaut
				33	ESCA	PAB3	19	15	703-01	
ACIER	FLUB	NORD	704	1	PAB1	GHA6	20	120	XXX-XXX	Transport de brames du TEB vers AFOU (v21 Ac2)
ACIER	FLUB	NORD	705	1	PAB1	GGRE	28	120	XXX-XXX	Acheminement de brames du PAB1 vers le parc à brames Tracogep
				33	GGRE	PAB1	23	120	705-01	
ACIER	FLUB	NORD	706	1	PAB1	PAB1	30	60	XXX-XXX	Attente manœuvre à la demande du PAB1 (-Ac2=Voie 21 ext train à bande)
				33	PAB1	PAB1	50	60	XXX-XXX	
ACIER	FLUB	NORD	707	1	PAB2	PAB2	45	120	XXX-XXX	Attente manœuvre à la demande du PAB2
				33	PAB2	PAB2	70	120	XXX-XXX	
ACIER	FLUB	NORD	708	1	PAB2	PAB2	35	120	XXX-XXX	Manœuvre interne au PAB2
				33	PAB2	PAB2	23	120	XXX-XXX	
ACIER	FLUB	NORD	709	1	PAB1	PAB1	30	60	XXX-XXX	Manœuvre interne au PAB1
				33	PAB1	PAB1	10	60	XXX-XXX	
ACIER	FLUB	NORD	710	1	PAB3	PAB3	20	60	XXX-XXX	Acheminement de brames du PAB1 vers le PAB3
				33	PAB3	PAB1	21	120	710-01	
				99	PAB3	PAB1	31	120	710-01	
ACIER	FLUB	NORD	711	1	PAB1	PAB2	35	120	XXX-XXX	Acheminement de brames du PAB1 vers le PAB2
				33	PAB2	PAB1	13	120	711-01	
				99	PAB2	PAB1	32	120	711-01	
ACIER	FLUB	NORD	713	1	PAB1	ESOL	33	480	XXX-XXX	Chutes de brames du PAB1 vers Solomat
				33	ESOL	PAB1	32	480	713-01	
				99	ESOL	PAB1	15	480	713-01	
ACIER	FLUB	NORD	714	1	PAB1	TPAB	16	60	XXX-XXX	Acheminement de brames du PAB1 vers TPAB
				33	TPAB	PAB1	19	60	714-01	
				99	TPAB	PAB1	17	60	714-01	
ACIER	FLUB	NORD	715	99	PAB2	PAB3	25	120	XXX-XXX	Acheminement de brames (couveuses) du PAB2 vers PAB3
ACIER	FLUB	NORD	716	1	PAB2	ESOL	30	480	XXX-XXX	Evacuation de chutes de brames du PAB2 vers Solomat
				33	ESOL	PAB2	27	480	716-01	
ACIER	FLUB	NORD	717	1	PAB3	SNCF	39	30	XXX-XXX	Expédition de brames du PAB3 vers la SNCF
				2	SNCF	PAB3	58	30	717-01	
				3	SNCF	PAB3	74	30	717-01	
				4	SNCF	PAB3	78	30	717-01	
				10	PAB3	SNCF	38	30	717-01	
				32	SNCF	PAB3	52	30	717-01	
				33	SNCF	PAB3	53	30	717-01	
				99	SNCF	PAB3	31	30	717-01	
ACIER	FLUB	NORD	718	1	PAB3	PAB2	23	120	XXX-XXX	Acheminement de brames du PAB3 vers PAB2
				33	PAB2	PAB3	42	120	718-01	
ACIER	FLUB	NORD	719	1	PAB3	ESCA	52	15	XXX-XXX	Expédition de brames du PAB3 vers le quai de l'Escaut
				32	ESCA	PAB3	20	15	719-01	
				33	ESCA	PAB3	43	15	719-01	
ACIER	FLUB	NORD	720	1	PAB3	TPAB	19	60	XXX-XXX	Acheminement de brames du PAB3 vers TPAB(int train à bande)
				33	TPAB	PAB3	17	60	720-01	
				99	TPAB	PAB3	16	60	XXX-XXX	
ACIER	FLUB	NORD	722	1	PAB3	ESOL	20	480	XXX-XXX	Evacuation de chutes de brames (languettes) vers Solomat
				33	ESOL	PAB3	27	480	722-01	
ACIER	FLUB	NORD	723	1	PAB3	PAB3	14	120	XXX-XXX	Manœuvre interne au PAB3
				33	PAB3	PAB3	18	120	XXX-XXX	
				99	PAB3	PAB3	28	120	XXX-XXX	

Chapitre 9 – Annexes

ACIER	FLUB	NORD	729	1	PAB2	TPAB	25	60	XXX-XXX	Transport de brames du PAB2 vers TPAB
				33	TPAB	PAB2	27	60	729-01	
EXTERIEUR	EMYK	SUD	750	1	EMYK	SNCF	34	30	XXX-XXX	Groupage bobines pour Mardyck
				3	SNCF	EMYK	42	30	750-01	
EXTERIEUR	EMYK	SUD	753	33	EMYK	ESOL	55	60	xxx-xxx	Récupération de wagons bobines à découper pour Solomat
EXTERIEUR	EMYK	SUD	754	3	EMYK	ESCA	37	15	XXX-XXX	Récupération de coils Mardyck pour le quai de l'Escaut
				4	EMYK	ESCA	80	15	XXX-XXX	
				10	ESCA	EMYK	34	15	754-03	
EUROPIPE	ETUB	SUD	771	3	SNCF	ETUB	53	30	XXX-XXX	Réception de tubes de l'extérieur
				10	ETUB	SNCF	65	30	771-03	
EUROPIPE	ETOL	SUD	772	3	SNCF	ETOL	65	30	XXX-XXX	Réception de tôles de l'extérieur pour Europipe
				10	ETOL	SNCF	79	30	772-03	
SOLOMAT	ESOL	SUD	793	1	ESOL	ESOL	31	480	XXX-XXX	Manœuvre interne atelier
				33	ESOL	ESOL	31	480	XXX-XXX	
ACIER	APEF	SUD	794	1	APEF	SNCF	65	30	XXX-XXX	Ferrailles vers SNCF
TR MVT	EISO	SUD	867	3	SNCF	EISO	70	30	XXX-XXX	Réception de tubes de l'extérieur
				10	EISO	SNCF	38	30	867-03	
EUROPIPE	EISO	SUD	868	1	EISO	SNCF	70	30	XXX-XXX	Expédition de tubes par SNCF
EUROPIPE	EISO	SUD	869	1	EISO	SNCF	52	30	XXX-XXX	Expédition de tôles Europipe vers la SNCF
				33	SNCF	EISO	85	30	869-01	
				34	SNCF	FSUD	45	120	XXX-XXX	
TR MVT	SNCF	SUD	900	35	SNCF	FSUD	50	120	XXX-XXX	Matériel SNCF à placer ou arriver par erreur ou non demandé. Triage pour le remettre au départ
				36	FSUD	SNCF	47	120	XXX-XXX	
				38	FSUD	SNCF	36	120	XXX-XXX	
ACIER	APEF	SUD	910	33	APEF	APEF	35	120	XXX-XXX	Attente manœuvre à la demande du parc à ferrailles
ACIER	APEF	SUD	911	3	SNCF	APEF	45	30	XXX-XXX	Réception de ferrailles extérieures
				10	APEF	SNCF	47	30	911-03	
				32	APEF	SNCF	60	30	911-03	
ACIER	APEF	SUD	912	3	APEF	ESOL	52	480	XXX-XXX	Transport de ferrailles du parc à ferrailles pour Solomat
				10	ESOL	APEF	40	480	912-03	
ACIER	APEF	SUD	913	1	APEF	APEF	61	120	XXX-XXX	Manœuvre au parc à ferraille extérieur
				33	APEF	APEF	48	120	913-01	
				99	APEF	APEF	45	120	913-01	
ACIER	APEF	SUD	915	1	APEF	SNCF	70	30	XXX-XXX	Expédition de ferrailles vers Ascométal
GTSI	GGRE	SUD	38741	3	SNCF	GGRE	20	30	XXX-XXX	Réception de tôles de la SNCF pour GGRE
				10	GGRE	SNCF	20	30	38741-03	
GTSI	GOXY	SUD	38797	1	GOXY	APEF	32	120	XXX-XXX	Evacuation de chutes d'oxycoupages vers APEF aciérie
				2	APEF	GOXY	55	120	38797-01	
				24	GOXY	APEF	37	120	38797-01	
				33	APEF	GOXY	35	120	38797-01	
ACIER	FLUB	NORD	38885	1	PAB1	P3	23	60	XXX-XXX	Brames venant de l'aciérie pour P3 faisceau triage (12 FTR)
				33	P3	PAB1	34	60	38885-01	
				99	P3	PAB1	35	60	38885-01	
EXTERIEUR	SNCF	SUD	38886	1	P3	SNCF	34	30	XXX-XXX	Expédition de brames de P3 pour SNCF
				2	SNCF	P3	42	30	38886-01	
				33	SNCF	P3	36	30	38886-01	
ACIER	FLUB	NORD	39105	1	PAB1	ESCA	43	15	XXX-XXX	Wagons de brames chargées à l'aciérie pour le quai de l'Escaut
				33	ESCA	PAB1	42	15	39105-01	

## 9 - 3 Nomenclature des codes poste affaire

### 9 - 3.1 Codes du Service Mouvement

1	Préparation locotracteur
2	Casse croûte
3	Fin poste
4	Plein de gasoil
5	Déraillement
6	Bloquage locotracteur en panne
7	Constat d'accident
8	Remplacement PM Faisceau Sud
9	Coulée en plaque
10	Nettoyage des voies
11	Entrée/Sortie locotracteur du garage
12	Aide à un déraillement
13	Réunion CAB
14	Réunion groupe de travail
15	Réunion sécurité
16	Information syndicale
17	Arbre des causes
18	Entretien CM et consignes
19	Soins infirmerie
20	Don du sang
21	Vote
22	Nettoyage vestiaire
23	Petites pannes
24	Echange pile émetteur
25	Mise en sécurité locotracteur
26	Traction locotracteur en panne
27	Wagons secours lieu déraillement
28	Nettoyage zones
29	Réception/Expédition wagon maintenance
30	Réception/Expédition wagon service voies
31	Désherbage
32	Manœuvre interne wagons atelier
33	Entrée/Sortie wagons atelier
34	Réserve
37	Pannes week end et nuits

## 9 - 3.2 Codes des Ateliers

1	Expédition wagons chargés
2	Wagons chargés à rectifier
3	Réception Wagons chargés de l'extérieur
4	Wagons avec erreur de chargement
5	Bobines à refroidir
7	Brouettage navettes
8	Remplacement pousse wagons par un locotracteur
9	Wagons à réparer
10	Wagons déchargés remis au départ
20	Locotracteur attente déchargement
23	Attente déchargement
24	Pesage bascules 2 ou 7 (GTSI)
26	Wagons réformés
27	Attente chargement
30	Etalonnage des bascules 2 et 7
31	Manœuvre interne (intérieur atelier)
32	Manœuvre annulée
33	Retour wagons vides
34	Wagons SNCF non demandés remis au départ
35	Wagons SNCF entrés par erreur remis au départ
36	Wagons SNCF à décharger
38	Attente aiguilleur au poste J
99	Attente fin chargement



## 9 - 4 Matrice des temps de haut le pied

	ACAR	APEF	AREC	CC24	EISO	EMYK	ESCA	ESOL	ETOL	ETUB	FSUD	FTRI	GARA	GCYL	GEXP	GGRE	GHA6	GOXY	MANU	P3	PAB1	PAB2	PAB3	PDC1	PDC2	SNCF	
ACAR	0																										
APEF	20	0																									
AREC	20	10	0																								
CC24	15	15	15	0																							
EISO	25	15	15	15	0																						
EMYK	40	40	40	30	30	0																					
ESCA	45	45	45	45	30	40	0																				
ESOL	20	10	10	15	10	40	40	0																			
ETOL	25	15	15	15	3	30	30	10	0																		
ETUB	25	15	15	15	3	30	30	10	3	0																	
FSUD	30	15	20	30	25	15	20	20	25	25	0																
FTRI	25	25	15	20	10	15	15	10	10	10	5	0															
GARA	25	15	15	25	5	20	20	15	5	5	10	8	0														
GCYL	15	10	10	20	10	20	20	15	10	10	5	10	5	0													
GEXP	15	10	10	20	10	20	30	15	10	10	5	10	5	0													
GGRE	15	15	10	20	10	20	30	15	10	10	5	10	5	10	5	0											
GHA6	20	15	15	20	10	30	30	20	10	10	30	15	25	5	5	5	0										
GOXY	15	15	10	20	15	30	35	15	15	15	5	15	10	15	10	10	5	0									
MANU	20	15	10	15	20	35	25	15	20	20	25	15	20	20	20	20	20	25	0								
P3	20	10	10	15	15	20	15	10	15	15	10	5	10	10	10	10	25	15	15	0							
PAB1	20	15	10	10	15	40	30	10	15	15	30	15	25	15	15	15	15	20	5	15	0						
PAB2	20	15	10	10	15	40	30	10	15	15	30	20	25	15	15	15	15	20	20	20	15	0					
PAB3	20	10	10	10	20	40	30	10	20	20	20	15	20	20	20	20	15	25	15	15	10	10	0				
PDC1	15	20	20	15	10	35	35	20	10	10	30	20	20	20	10	10	10	10	20	25	15	15	20	0			
PDC2	15	15	15	20	15	30	30	15	15	15	30	10	20	20	15	15	30	15	25	20	20	20	20	15	0		
SNCF	35	15	25	25	12	10	20	25	12	12	5	5	10	10	10	10	35	15	30	15	35	35	25	15	10	0	
SUD	35	15	25	25	12	10	20	25	12	12	5	5	10	10	10	10	35	15	30	15	35	35	25	15	10	5	
TBOB	15	10	10	15	10	15	20	5	10	10	5	10	5	10	5	5	15	10	20	15	15	15	10	15	15	8	
TCYL	10	5	5	10	10	10	15	5	10	10	5	5	5	5	5	5	10	10	15	5	10	10	10	10	15	5	
TFIN	15	10	10	15	15	15	20	5	15	15	5	10	5	10	10	10	15	15	20	15	15	15	10	15	20	10	
TPAB	25	15	15	15	20	45	35	15	20	20	25	20	25	25	25	25	20	30	20	20	15	15	5	25	25	30	
TSKI	15	10	10	15	15	15	20	5	15	15	5	10	5	10	10	10	15	15	20	10	15	15	10	15	20	10	
VMTA	20	1	10	10	20	35	30	10	20	20	30	12	20	15	20	15	15	10	10	15	5	10	10	20	10	15	
WAGO	25	15	15	25	5	20	30	15	5	5	10	8	5	10	10	5	25	10	20	10	25	25	20	20	10	12	



Le client XX (de matricule société n° xxxx) du département TCC joignable au n° 2357 a créé et validé une demande EBF le 14/02/2003 à 11 h 31. Le dispatcher xx (de matricule société n° xxxx) joignable au n° 3312, a renseigné le 14/02/2003 à 11 h 38 l'engagement du service Mouvement. La manœuvre 268-01 d'une durée moyenne de 42 min est prévue en réalisation le 14/02/2003 au poste 2 (second poste des 3\*8 de 13 h 00 et 21 h 00) par le locotracteur FG66 entre 13 h 30 et 15 h 00.

## 9 - 7 EBF = Réalisations

```
+ EBF C - Expression de Besoin Fer Consultation de demande ----- 02/05/03 +
! Demande créée le 14 / 02 / 03 à 11 h 31 Validée le 14 / 02 / 03 à 11 h 31 !
! Par [redacted] [redacted] Tél 2357 Département TCC !
! ..... !
! ..... !
! ..... !
! Réponse mouvement effectuée le : 14 / 02 / 03 à 11 h 38 !
! Matricule réponse .....: [redacted] Tél ..: 3312 !
! Début prévu le .....: 14 / 02 / 03 à 13 h 30 !
! Fin prévue le .....: 14 / 02 / 03 à 15 h 00 !
! ..... !
! Graphique / RFE ---> Engin ..: FG66_____ le: 14 / 02 / 03 Poste: 2 !
! Affaire : 00268 Poste-aff : 01 Durée: h 42 mn !
! ..... !
! Réalisation effectuée Début le : 14 / 02 / 03 à 13 h 35 !
! Fin le : 14 / 02 / 03 à 14 h 15 !
! Cause non respect : 05 demande fin de poste !
! ..... !
! ..... !
+- EBF .. ..... ----- --- PF: .. -+
```

La manœuvre 268-01 prévue en réalisation le 14/02/03 entre 13 h 30 et 15 h 00, a été réalisée par le locotracteur FG 66, le 14/02/03, au cours du poste 2 entre 13 h 35 et 14 h 15. Cette manœuvre est réalisée avec un certain retard car sa réalisation était souhaitée entre 12 h 15 et 13 h 00. Le code de non-respect est du type 05 ce qui correspond à une demande fin de poste. En effet, cette manœuvre

## 9 - 8 Codes de non-respect

1	Regroupement wagons vides
2	Wagons vides réformés à différer
3	Wagons chargés à rectifier
4	Wagons chargés réformés à transborder
5	Demande fin de poste
6	Priorité suite à demandes dans m tranche horaire
7	Délai anticipation trop court
8	Wagons vides pas disponibles
9	Anomalies à Mardyck (aiguilles et signaux)
10	Panne locotracteur
11	Problème voies ferrées
12	Attente fin de manœuvre
13	Autres

## 9 - 9 Etat de l'art VRPTW

En regardant les différents algorithmes qui sont utilisés pour la résolution du VRPTW, nous remarquons une évolution certaine au cours de trois générations particulières.

La première génération se situe dans les années 60 à 70, avec le développement d'heuristiques simples. Elles sont basées principalement sur des recherches locales ou d'échanges. Ces travaux sont peu documentés et il est difficile de comparer les résultats obtenus il y a 40 ans avec des solutions plus récentes.

Les heuristiques de la seconde génération sont fondées sur des programmations dynamiques où les algorithmes d'optimisation « proche » sont très différents des heuristiques classiques. On peut citer, par exemple, la généralisation des problèmes d'affectation et d'ordonnancement vers des problèmes de tournées de véhicules approximatifs. Leurs résultats sont souvent meilleurs que ceux des heuristiques simples. En effet, pour les fonctions objectif linéaire, certaines de ces techniques permettent d'atteindre l'optimum.

La troisième génération qui est celle qui se déroule à l'heure actuelle, utilise des algorithmes d'optimisation exacte et des méthodes approchées issues en grande partie de l'intelligence artificielle. Les algorithmes d'optimisation exactes les plus connus sont le K-arbre, la

relaxation Lagrangienne, et au niveau de l'intelligence artificielle, les algorithmes évolutifs ou la recherche tabou.

Malgré l'amélioration des méthodes de recherche opérationnelle, il subsiste toujours une taille limite au-delà de laquelle il est difficile voire impossible, d'obtenir une solution optimale quelle que soit la méthode employée. En effet, la résolution exacte d'un problème spécifique nécessite une formulation mathématique sous forme de programme linéaire. Or, de nombreux problèmes se prêtent mal à cette modélisation, ce qui explique le développement rapide des méthodes approchées. Si elles ne garantissent une solution optimum, elles fournissent en revanche un résultat en un temps plus rapide.

D'un point de vue industriel, c'est un rapport qualité/temps d'obtention du résultat qui est plus recherché que l'optimum. On prête un intérêt limité au fait de disposer d'une solution optimale au prix d'un délai conséquent. On conçoit plus le logiciel d'optimisation comme un outil d'aide à la décision. Ce raisonnement est d'autant plus évident pour les applications nécessitant une grande réactivité telles que les applications en temps réel. Et notamment le cas présent, avec une gestion dynamique de la flotte de locotracteurs qui évolue en fonction des manœuvres en cours de réalisation et des nouvelles demandes EBF.

Regardons tout d'abord les méthodes de résolution du VRP, pour ensuite se concentrer sur leurs généralisations pour le VRPTW.

## 9 - 9.1 VRP

Le Problème de Tournées de Véhicules avec fenêtres de temps (VRPTW) est une généralisation du Problème de Tournées de Véhicules sans fenêtres de temps (VRP). De nombreuses méthodes ont été développées pour le problème VRP, mais leurs adaptations au VRPTW ont connu plus ou moins de succès. Parmi les diverses méthodes utilisées pour la résolution de VRP, on peut distinguer les méthodes exactes, les heuristiques et les méta heuristiques.

### 9 - 9.1.1 Méthodes exactes

Ces méthodes se distinguent en trois approches : la programmation dynamique, la génération de colonnes, et la relaxation Lagrangienne.

### **a Programmation dynamique**

[Kolen et al. 1987] sont à l'origine de ce premier algorithme d'optimisation basé sur un Branch and Bound pour le VRPTW. La méthode s'appuie sur le calcul de bornes inférieures par une programmation dynamique et une relaxation de l'espace d'état. Les décisions de branchements s'effectuent au niveau de l'affectation des clients sur les tournées. Cette approche a permis une résolution optimale des problèmes comptant jusqu'à quinze clients.

### **b Génération de colonnes**

Le principe de [Desrochers et al. 1992] consiste à formuler le problème comme un problème de partitionnement, et de résoudre ce dernier par la méthode de génération de colonnes en assimilant une tournée à une colonne. Cette approche très performante, permet une résolution des problèmes comptant jusqu'à cent clients.

### **c Relaxation Lagrangienne**

Cette classe de méthodes compte un nombre conséquent de travaux portant sur différentes utilisations de la relaxation, tout d'abord sur les contraintes, où [Kohl et Madsen 1997] proposent une relaxation Lagrangienne d'après un modèle du plus court chemin ; ou encore, sur le partage des variables par [Fisher et al. 1997]. [Fisher 1994] propose également une approche  $k$ -arbre suivie d'une relaxation Lagrangienne.

La seule contrainte qui lie les véhicules entre eux, est la visite unique de chaque client. En dehors de celle-ci, le problème résultant peut être considéré comme un problème du plus court chemin élémentaire avec fenêtre de temps et contrainte de capacité (noté ESPPTWCC) pour chaque véhicule. Ce problème est reconnu dans la littérature NP-difficile. Néanmoins, il existe des algorithmes efficaces de programmation dynamique pour la résolution de tels programmes relâchés. Deux décompositions sont étudiées : la décomposition de Dantzig-Wolfe et le partage de variables.

L'application de la décomposition de Dantzig-Wolfe par [Desrochers et al. 1992] a permis la résolution de problèmes comptant jusqu'à cent clients. De même, la méthode de partage des variables par [Kallehauge et al. 2000] obtient des performances similaires.

Récemment [Larsen et al. 2000] ont implantés une approche combinant la relaxation Lagrangienne utilisée par [Kohl et Madsen 1997] avec la décomposition généralisée de

Dantzig-Wolfe proposée par [Desrochers et al. 1992]. Dans une première phase, la relaxation Lagrangienne est utilisée afin de tirer avantage de la convergence rapide, puis, dans une deuxième phase, les colonnes obtenues en phase une, sont utilisées pour initialiser la procédure.

[Fisher 1994] propose également un algorithme d'optimisation dont la relaxation Lagrangienne sur les contraintes de capacité permet d'obtenir un problème de  $K$ -arbre. Cette méthode a permis la résolution de problèmes jusqu'à cent clients.

A l'heure actuelle, la résolution par méthode exacte permet difficilement la résolution de plus gros problèmes ou simplement de problème nécessitant plus de branchements. C'est pour cette raison que les heuristiques et les méta heuristiques sont souvent les méthodes de prédilection pour ces problèmes.

## **9 - 9.1.2 Heuristiques**

Nous concentrons notre revue sur les diverses catégories d'heuristiques de résolutions telles que les méthodes de construction, la méthode de gain, d'insertion, de l'algorithme de balayage, de l'algorithme de construction en pétales, et de diverses heuristiques d'améliorations. Nous pouvons nous rapporter aux travaux de [Laporte 1995] qui constituent la base de notre état de l'art.

### ***a Heuristiques de construction***

Deux techniques principales sont utilisées pour la construction des solutions. Tout d'abord, la fusion de routes existantes par un critère de gain et ensuite, l'assignation d'arêtes aux routes par l'utilisation d'un coût d'insertion.

### ***b Algorithme de gain***

L'algorithme de gains de [Clarke et Wright 1964] est sans doute l'une des méthodes les plus connues pour le VRP. Dans une version parallèle de cet algorithme, où le nombre de véhicules est une variable de décision, les meilleures fusions possibles sont calculées en partant du haut de la liste.

### ***c Méthode d'insertion séquentielle***

On remarque que les algorithmes d'insertion sont constitués de deux phases. La première constitue la sélection du prochain nœud à insérer et, la deuxième la méthode d'insertion. L'heuristique de résolution du plus proche voisin choisi séquentiellement et de façon répétitive l'arête la plus courte qui n'a pas encore été sélectionnée pour étendre le cycle courant. Pour sa part, la construction parallèle de [Potvin et Rousseau 1993] construit alternativement en séquentiel et en parallèle les différentes routes. Elle s'appuie sur l'initialisation des tournées par l'heuristique d'insertion de [Solomon 1987].

### ***d* Algorithme de balayage**

Adaptée aux instances euclidiennes du VRP, cette méthode effectue un balayage circulaire autour du dépôt pour former des groupes de nœuds rapprochés ayant des angles similaires. Ces groupes sont ensuite résolus comme différents PVC (Problème du Voyageur de Commerce), chacun représentant une tournée à un seul véhicule. Certains échanges peuvent ensuite être effectués entre les nœuds près des frontières.

### ***e* Algorithme en pétale**

Cet algorithme de balayage génère plusieurs routes, appelées pétales, pour ensuite faire une sélection en résolvant un problème de partitionnement. Notons que si les tournées correspondent à des secteurs continus d'arêtes, le problème peut être résolu en un temps polynomial.

## **9 - 9.1.3 Heuristiques d'amélioration**

L'application de descentes locales permet de trouver de meilleures solutions dans un voisinage immédiat, si le minimum local n'a pas été atteint. Elles consistent à réaliser des permutations entre arêtes à l'intérieur de la même tournée ou entre plusieurs tournées. Les descentes locales les plus connues appartiennent à la famille des  $\lambda$ -opt ( $1$ -opt,  $2$ -opt,  $n$ -opt).



## 9 - 9.1.4 Méta heuristiques

### ***a Recherches avec Tabou***

Les méthodes de recherches tabou tentent d'éviter le piège des minimums locaux en permettant une dégradation de la solution durant un certain nombre d'itérations. Une recherche tabou part d'une solution initiale  $x_t$  et visite à chaque itération  $t$  le meilleur voisin  $x_{t+1}$  jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit rencontré. Pour éviter de boucler sur les solutions déjà explorées, les solutions récemment examinées seront dites taboues pour empêcher un retour arrière après ces dites itérations.

### ***b Taburoute***

L'algorithme de [Gendreau et al. 1994] exploite de nouvelles particularités. GENI, un algorithme d'insertion pour le PVC, est utilisé pour explorer le voisinage qui est défini comme toutes les solutions pouvant être atteintes en enlevant une arête et en l'insérant dans une autre route contenant les plus proches voisins. En utilisant des pénalités pour les solutions irréalisables en temps ou en capacité, il est possible de sortir des minima locaux.

### ***c Algorithme de Taillard***

L'heuristique de [Taillard 1993] s'appuie sur un voisinage du type  $\lambda$ -échanges proposé par [Osman 1993] et procède à des insertions simples plutôt qu'à des insertions du type GENI, ce qui accélère le processus. Les routes dans lesquelles il y a eu des insertions sont ensuite ré-optimisées.

### ***d Algorithme de Rego et Roucairol***

L'utilisation de chaînes d'éjections de [Rego et Roucairol 1994] consiste à déplacer une arête de la position occupée par une autre arête et à déplacer cette dernière, de la position occupée d'une troisième arête, et ainsi de suite comme une réaction en chaîne à plusieurs niveaux. De bonnes solutions sont obtenues mais sans comparaison avec les meilleurs algorithmes de recherches tabou.

### ***e Recherche granulaire de Toth et Vigo***

[Toth et Vigo 2002] considèrent que les arêtes les plus longues ont une chance inférieure par rapport aux autres, d'être présentes dans les meilleures solutions. Cette constatation leur permet d'effectuer une recherche tabou avec une granularité variable qui varie en fonction de la longueur des arêtes explorées. D'excellents résultats sont obtenus en des temps raisonnables.

### ***f Algorithme de Shaw***

Une approche différente des méta heuristiques qui cherchent à s'éloigner des minima locaux est la recherche élargie de voisinage (LNS pour Large Neighbourhood Search) proposée par [Shaw 1998]. Cette heuristique gloutonne n'essaye pas d'échapper si possible à un minimum local. La structure du voisinage est considérablement agrandie de manière à augmenter les chances de trouver une solution de haute qualité. La solution initiale est constituée des tournées qui desservent un client unique. Les résultats sont compétitifs avec ceux obtenus par les autres méta heuristiques.

## **9 - 9.2 VRPTW**

L'ajout des fenêtres de temps rend le problème dynamique, au sens où une modélisation à un endroit de la tournée peut se répercuter sur les temps d'arrivée de toutes les arêtes subséquentes, pouvant rendre la tournée irréalisable. Contrairement à la contrainte de capacité, la réalisabilité d'une tournée en temps, dépend de l'ordonnement des arêtes. Regardons les généralisations des concepts introduits dans la section VRP ainsi que les heuristiques et les méta heuristiques qui ont été adaptées au VRPTW.

### **9 - 9.2.1 Construction de tournées**

La construction de tournées, une à la fois ou en parallèle, revient à déterminer quel est le prochain client à insérer et dans quelle route il doit l'être. Les méthodes de construction sont des généralisations des méthodes sans fenêtres de temps sur lesquelles on effectue deux utilisations principales des fenêtres de temps. Premièrement, on peut utiliser les fenêtres de temps comme un élément contraignant, c'est-à-dire que les choix des arêtes à ajouter sont influencés seulement par des distances dans la mesure où l'ajout d'une arête ne rend pas

la solution irréalisable. Deuxièmement, il est possible de pondérer les choix des arêtes à la fois par l'attente, la longueur des fenêtres de temps et le moment d'arrivée dans la fenêtre.

Par une méthode gains, [Solomon 1987] autorise l'insertion des clients dans la meilleure position possible en regard à une somme pondérée de la distance et du temps additionnel requis. Il propose également une analyse dans le pire des cas [Solomon 1986] pour certaines heuristiques simples.

[Antes et Derigs 1995] utilisent une approche d'insertion originale. Chaque client émet et reçoit de chaque tournée un coût d'insertion défini de la même manière que dans l'heuristique de Solomon. Puis, les clients envoient une proposition à la tournée de meilleure offre. Chaque tournée accepte alors la meilleure proposition offerte par les clients. On peut noter qu'un client peut être inséré à chaque itération. Les résultats de cette méthode sont comparables à ceux présentés dans [Potvin et Rousseau 1993].

### ***a Génération par villes***

Dans cette méthode, on commence par sélectionner une ville à partir de laquelle on générera le reste de la tournée. De cette ville, on sélectionne celle qui est la plus proche et on la place à la suite de la tournée. On ajoute successivement la ville qui est la plus proche de l'une des deux extrémités de la sous tournée, jusqu'à ce que qu'il ne soit plus possible de rajouter ou d'insérer une ville. On continue ensuite à construire les autres tournées de cette façon, jusqu'à ce que chaque tournée soit complète. Cette heuristique peut nous donner autant de solutions initiales que le problème a de villes.

### ***b Génération par arête***

On sélectionne en premier lieu les arêtes les plus courtes parmi une possibilité de  $n^2$  arêtes réalisables qu'on ajoute à la tournée courante si elles préservent sa faisabilité, sinon on les ajoute à une autre tournée. Tout au long du processus, il est important de s'assurer qu'il n'y a pas d'introduction de cycles. Cette heuristique permet de générer une solution de bonne qualité en terme de distance totale mais peut contenir beaucoup de tournées si les fenêtres de temps sont très contraintes.

### ***c Génération aléatoire***

Une des meilleures façons d'obtenir de la diversité est la génération aléatoire de solutions. Afin de diminuer les solutions irréalisables, on peut choisir successivement les villes qui possèdent le moins de villes voisines réalisables, c'est-à-dire qui peuvent être visitées en respectant les contraintes de temps et de capacité. On choisit au hasard un successeur parmi ces villes en biaisant vers les plus courts chemins. On l'ajoute ensuite à la tournée appropriée et on met à jour la liste des successeurs. Cette méthode permet de générer plusieurs solutions de faible qualité mais d'une très grande diversité.

### **9 - 9.2.2 Amélioration de tournées**

Le voisinage d'une solution peut être défini par l'ensemble des solutions qui peuvent être atteintes par une manipulation simple de cette solution initiale. Une des façons d'explorer le voisinage d'une solution donnée, est de faire des échanges de positions de  $\lambda$  arêtes inter routes ou intra routes, jusqu'à ce que la  $\lambda$ -optimalité soit atteinte dans chaque tournée, c'est-à-dire que toutes les possibilités de  $\lambda$ -échanges ont été considérées et que la meilleure a été sélectionnée. Pour plus d'informations, le lecteur pourra se rapporter aux travaux de [Schulze et Fahle 1999].

[Thangiah et al. 1996] proposent une méthode de descente qui utilise une insertion systématique et l'échange d'un sous-ensemble de clients entre les tournées. Cet ensemble d'opérations est défini par l'opérateur  $\lambda$ -échange et proposé par [Osman 1993]. Par commodité de programmation, seuls les opérateurs 1-échange et 2-échange sont utilisés : ils autorisent l'insertion et l'échange simultanée d'un ou deux clients. Cet algorithme est rapide, mais il doit être combiné avec une autre heuristique pour donner de bons résultats. La combinaison de cette heuristique avec la procédure d'échange 2-opt proposée par [Potvin et Rousseau 1995] donne des solutions proches de l'optimum à 2,5 %, pour des instances de 25 à 100 clients.

### **9 - 9.2.3 Combinaison d'heuristiques**

A la différence des heuristiques d'amélioration de tournées qui nécessitent la connaissance de la solution initiale, les heuristiques composites se génèrent automatiquement au démarrage. Elles comprennent au sein de la phase de construction une phase d'amélioration des tournées. Cette méthode a l'avantage de ne pas s'optimiser à la fin de la construction et

donc de pouvoir plus facilement explorer le voisinage local à différentes étapes de la construction. On peut se référer aux travaux de [Russel 1995].

## **9 - 9.2.4 Méta heuristiques**

Comme pour le VRP, les méta heuristiques se situent au cœur des méthodes prometteuses pour le VRPTW. On peut distinguer : les algorithmes évolutifs, le recuit simulé, les recherches tabous. Pour leur part, les algorithmes évolutifs tentent d'améliorer la solution à chaque déplacement dans le voisinage, tandis que le recuit simulé et les recherches tabous permettent le parcours d'un voisinage de qualité inférieure lorsqu'un minimum local est atteint.

### ***a Les algorithmes évolutifs***

L'idée de base des algorithmes évolutifs est de simuler l'évolution au sein d'une population de solutions échangeant certaines informations pour produire de nouvelles solutions possiblement mieux adaptées. Le concept de l'algorithme nécessite : un encodage qui permet de représenter une solution, une méthode de sélection et de croisement qui permet de combiner les solutions entre elles et finalement une méthode de mutation permettant d'intégrer la diversité à la population.

[Potvin et Bengio 1996] proposent un algorithme évolutif utilisant différentes formes de voisinages tels que les croisements, les re-combinaisons et les mutations pour améliorer une population générée par une heuristique d'insertion.

### ***b Le recuit simulé***

Le recuit simulé recherche un voisinage dans un ordre défini. La procédure simule le processus de recuit présent dans la métallurgie. On associe un temps à chaque processus de recherche. L'algorithme « saute » vers un point de l'espace de recherche initial par un pas calculé en fonction de la variation de la température. [Osman 1993] a appliqué cette heuristique en déplaçant un client d'une tournée vers une autre et en échangeant deux clients entre deux tournées.

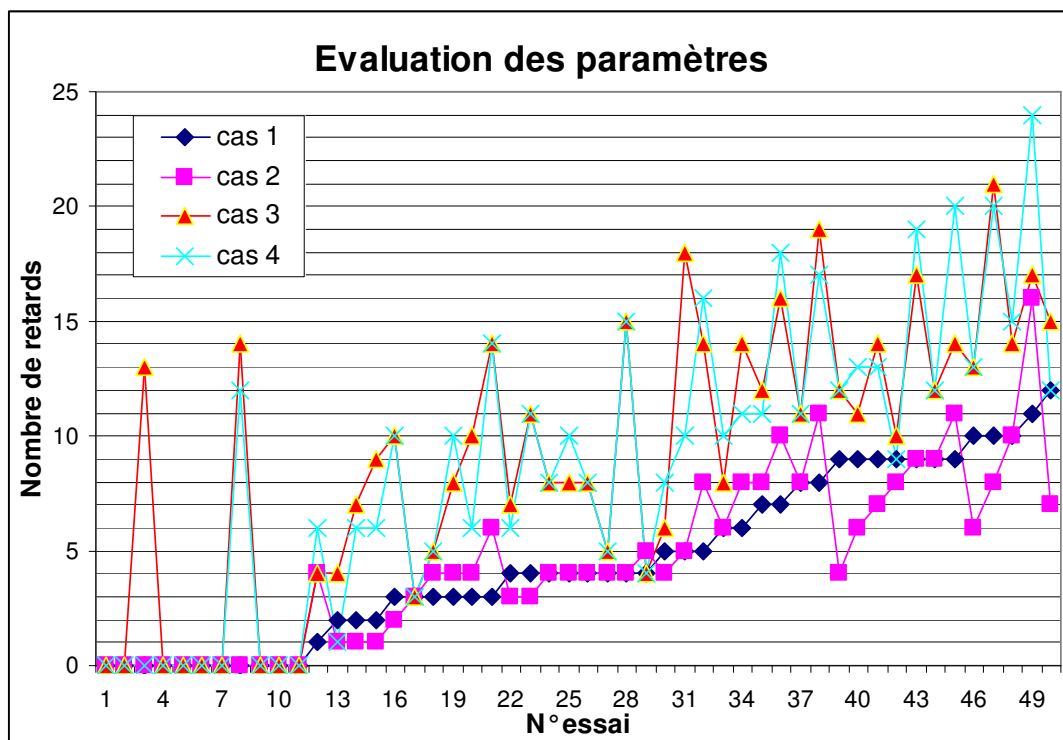
### c Combinaison de méta heuristiques

Un certain nombre de recherches est orienté sur la combinaison de ces méta heuristiques. Dans [Thangiah et al. 1993] ils combinent algorithme génétique, recuit simulé, et recherche tabou.

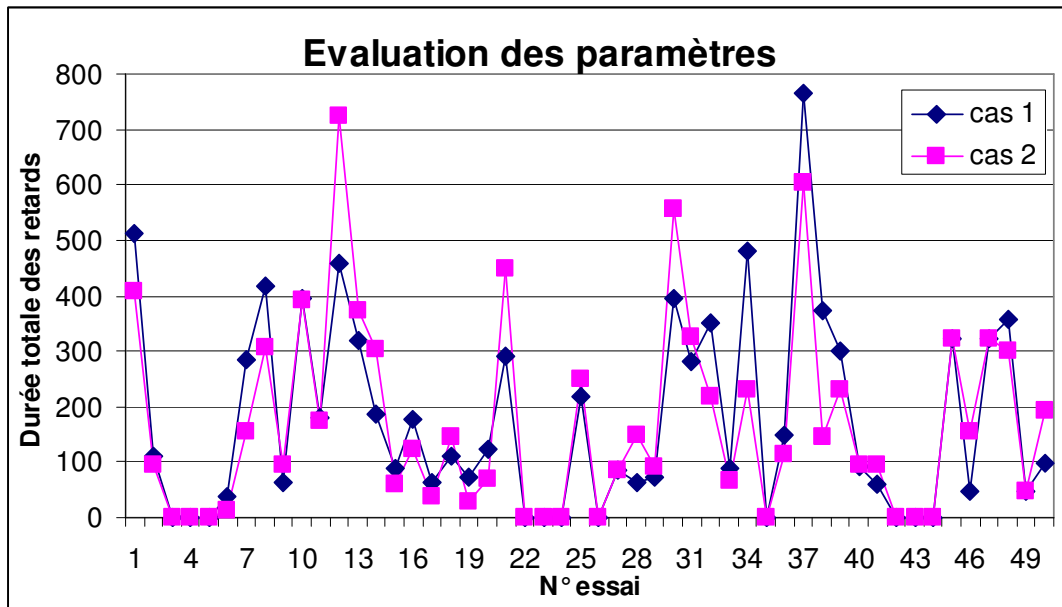
En résumé, les méta heuristiques produisent des solutions d'excellente qualité, mais se heurtent souvent à deux problèmes : elles nécessitent des temps d'exécution assez longs, et la fonction permettant le passage d'une solution réalisable à une autre solution réalisable, n'est pas toujours triviale. En fait, toute opération sur l'ordre de parcours affecte le moment d'arrivée chez le client et cause facilement des retards.

## 9 - 10 Evaluations des paramètres

Ces tests correspondent au paramétrage des critères locaux de la maquette.



Sur les 50 essais réalisés, les configurations cas 1 et cas 2 améliorent toujours le nombre de retards par rapport aux cas 3 et cas 4. Nous allons donc analyser uniquement les cas 1 et cas 2 sur la durée totale des retards.



L'analyse du critère secondaire d'optimisation, soit la durée totale des retards, montre que le cas 1 donne les meilleurs résultats d'optimisation globaux.

Les valeurs numériques sont les suivantes :

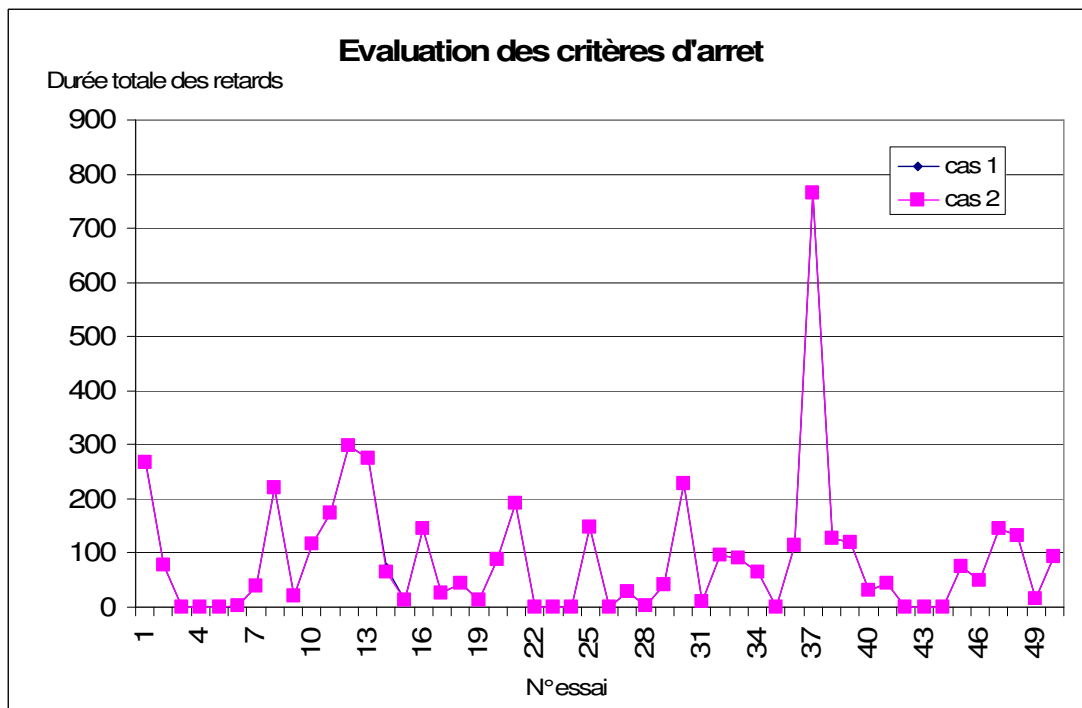
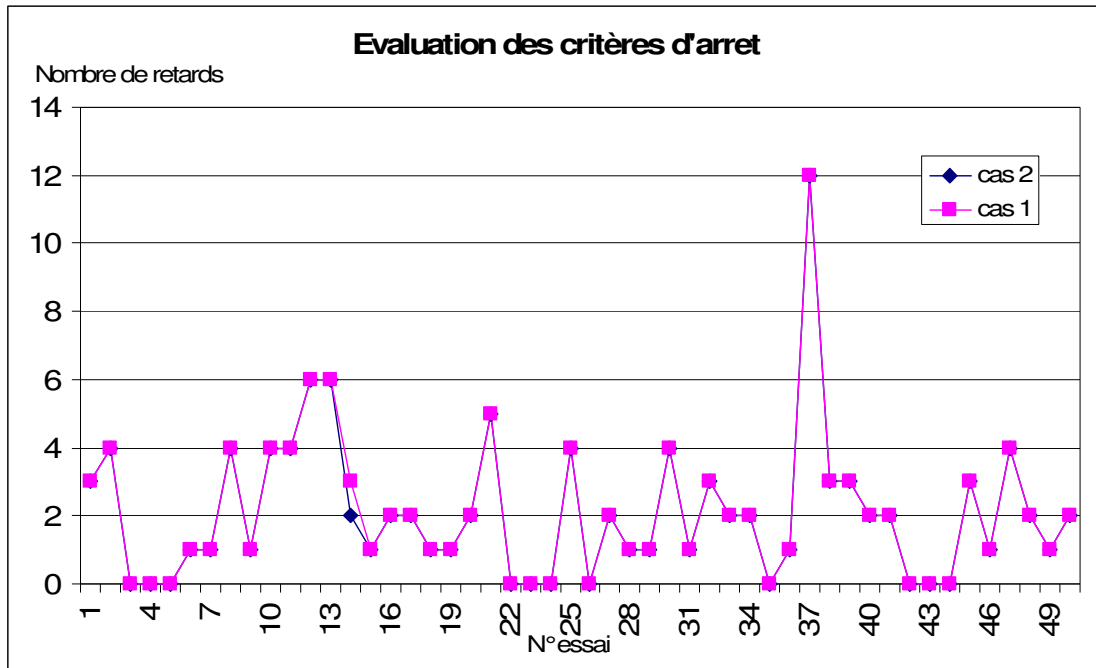
## Chapitre 9. Annexes

Nb Total	CAS 1		CAS 2		CAS 3		CAS 4	
	Initialisation = Marge de réalisation		Initialisation = Fin de service		Initialisation = Marge de réalisation		Initialisation = Fin de service	
	Construction = Fin service		Construction = Fin service		Construction = Marge de réalisation		Construction = Marge de réalisation	
	Nb	Durée Totale	Nb	Durée Totale	Nb	Durée Totale	Nb	Durée Totale
25	10	512	8	407	21	1870	20	2183
16	5	112	4	96	6	124	8	177
12	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	13	564	0	0
14	2	39	1	12	4	52	1	4
31	10	284	6	154	13	428	13	428
23	9	418	9	308	17	730	19	1761
14	3	62	4	94	5	145	5	182
24	8	394	11	393	19	1232	17	923
17	4	179	4	175	8	341	8	341
27	11	457	16	725	17	900	24	3393
19	7	318	8	374	12	562	11	543
26	5	186	8	303	14	561	16	596
15	3	88	3	60	3	98	3	70
17	3	178	2	124	10	543	10	440
16	4	63	4	39	8	349	10	878
18	4	111	5	145	4	197	4	197
17	2	72	1	28	7	224	6	143
17	4	124	3	69	7	168	6	113
29	7	291	10	450	16	609	18	1175
17	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0
20	6	219	6	251	8	289	10	391
17	0	0	0	0	0	0	0	0
26	5	86	5	86	18	1463	10	274
38	3	62	4	148	8	268	10	382
18	4	73	4	92	8	166	8	185
28	9	394	11	557	14	1019	20	1170
21	6	283	8	325	14	603	11	511
30	10	350	10	218	14	498	15	464
19	4	87	3	65	11	404	11	440
23	9	481	7	232	14	876	13	821
20	0	0	0	0	14	899	12	722
17	2	148	1	115	9	446	6	339
23	12	765	7	605	15	934	12	828
19	9	372	4	145	12	677	12	662
20	9	299	8	232	10	699	9	652
18	4	93	4	94	5	166	5	141
21	3	61	4	95	10	289	6	116
18	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0
21	9	323	9	323	12	649	12	649
17	1	49	4	155	4	120	6	192
22	8	322	8	324	11	507	11	507
19	9	357	6	299	11	464	13	664
21	4	46	4	46	15	804	15	504
20	3	98	6	192	14	363	14	363

## 9 - 11 Evaluation des critères d'arrêt

Ces tests correspondent à l'évaluation des résultats globaux d'optimisation compte tenu des stratégies de sélection possibles.





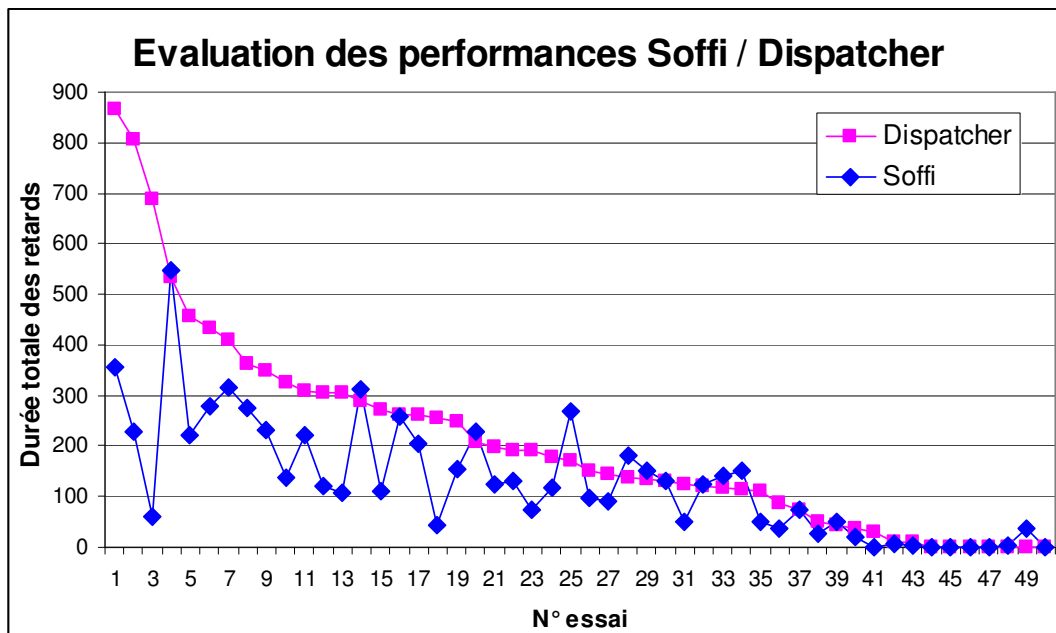
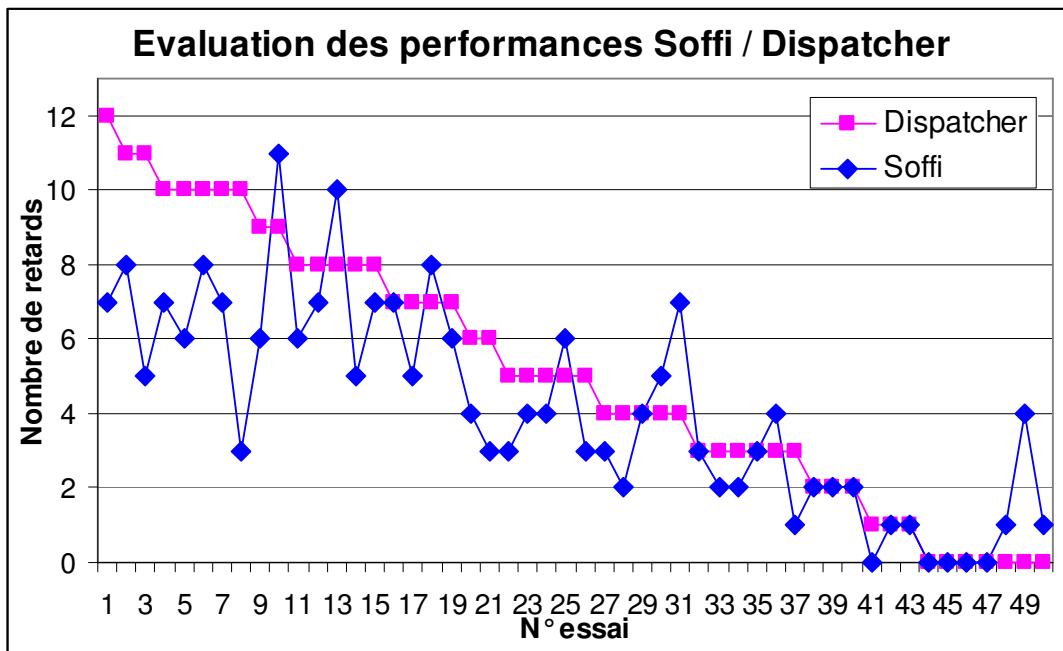
Sur les 50 essais réalisés, nous remarquons que les solutions générées donnent des résultats d'optimisation sensiblement égaux. Le cas 2, cependant, donne les résultats d'optimisation globaux meilleurs. Les valeurs numériques sont les suivantes :

Chapitre 9. Annexes

DATE	POSTE		CAS 1		CAS 2	
		Procédure 2-opt	Première amélioration		Première amélioration	
		Procédure échange	Première amélioration		Meilleure amélioration	
		Nb Total	Nb	Durée Totale	Nb	Durée Totale
20/2/03	1	25	3	271	3	267
	2	16	4	78	4	78
28/3/03	2	12	0	0	0	0
19/1/04	1	13	0	0	0	0
	2	24	0	0	0	0
20/1/04	1	14	1	2	1	2
9/2/04	2	31	1	39	1	39
10/2/04	1	23	4	221	4	221
	2	14	1	20	1	20
	3	24	4	117	4	117
11/2/04	1	17	4	175	4	175
	3	27	6	299	6	299
12/2/04	1	19	6	276	6	276
	2	26	3	73	2	64
	3	15	1	13	1	13
13/2/04	1	17	2	144	2	144
14/2/04	2	16	2	27	2	27
	3	18	1	45	1	45
16/2/04	2	17	1	14	1	14
	3	17	2	89	2	89
17/2/04	1	29	5	192	5	192
	2	17	0	0	0	0
	3	16	0	0	0	0
18/2/04	1	16	0	0	0	0
	2	20	4	149	4	149
	3	17	0	0	0	0
20/2/04	3	26	2	28	2	28
21/2/04	1	38	1	2	1	2
	2	18	1	42	1	42
	3	28	4	229	4	229
22/2/04	1	21	1	10	1	10
	2	30	3	97	3	97
23/2/04	1	19	2	90	2	90
	2	23	2	64	2	64
	3	20	0	0	0	0
24/2/04	2	17	1	115	1	115
	3	23	12	765	12	765
25/2/04	1	19	3	126	3	126
	2	20	3	120	3	120
	3	18	2	32	2	32
26/2/04	1	21	2	44	2	44
	3	18	0	0	0	0
27/2/04	1	25	0	0	0	0
	2	18	0	0	0	0
	3	21	3	76	3	76
28/2/04	1	17	1	49	1	49
	2	22	4	144	4	144
	3	19	2	133	2	133
29/2/04	1	21	1	15	1	15
	2	20	2	94	2	94

## 9 - 12 Evaluation des performances

Ces tests correspondent aux taux de satisfactions client obtenus par le dispatcher et par la maquette SOFFI.

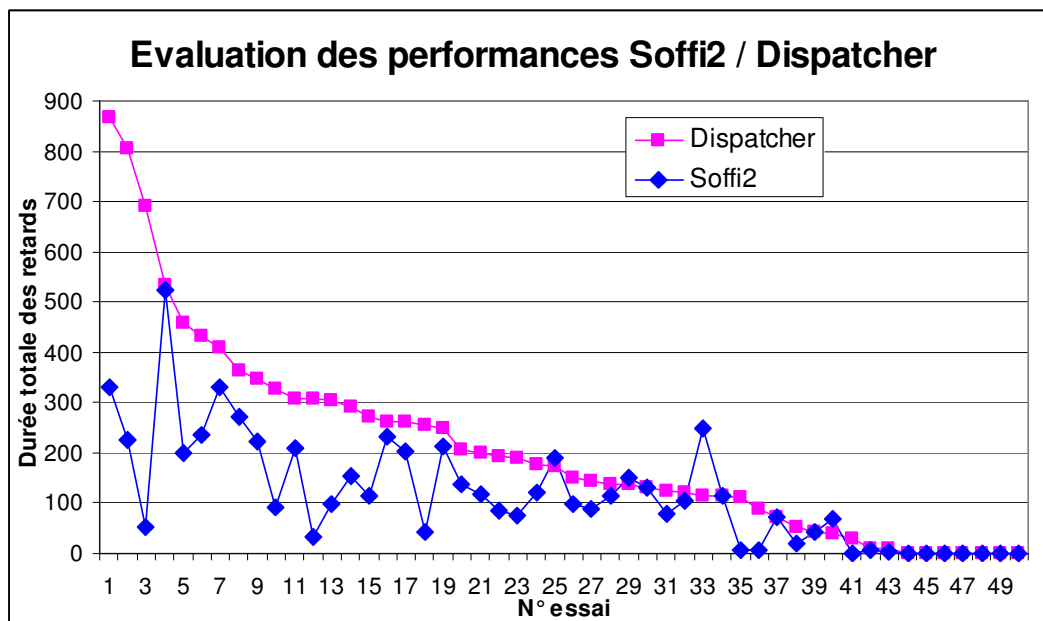
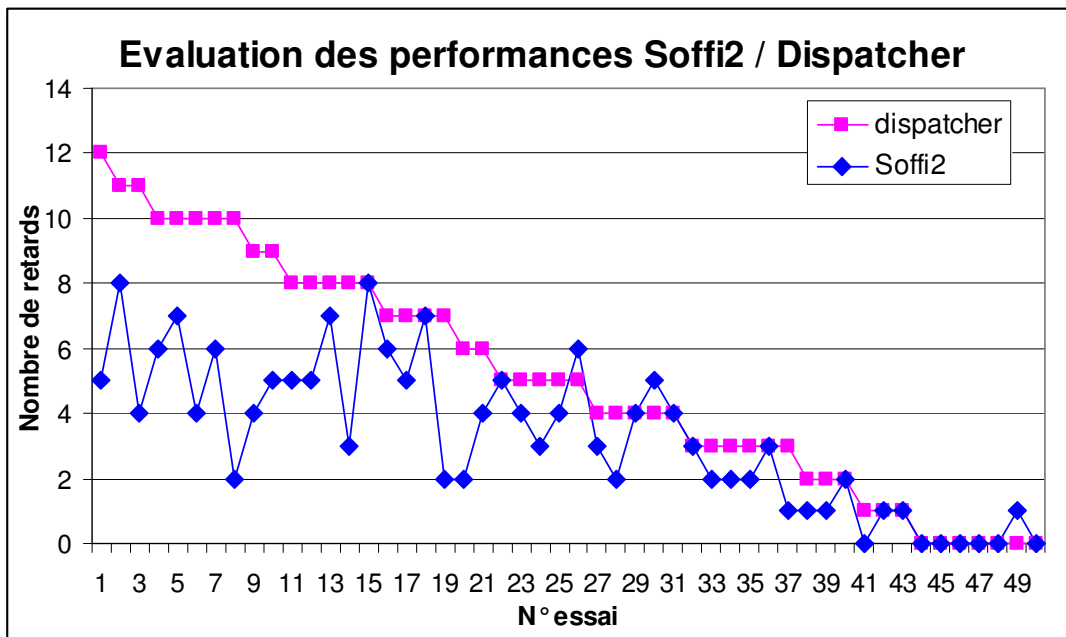


Chapitre 9. Annexes

DATE	POSTE	DISPATCHER			SOFFI		DISPATCHER	SOFFI
		Nord			Nord		% de satisfaction client	% de satisfaction client
		Nb	Nb Total	Durée Totale	Nb	Durée Totale		
20/02/03	1	8	25	364	6	274	68	76
	2	7	16	207	7	227	56	56
28/03/03	2	1	12	30	0	0	92	100
19/01/04	1	0	13	0	0	0	100	100
	2	4	24	191	3	74	83	88
20/01/04	1	0	14	0	0	0	100	100
09/02/04	2	4	31	152	2	98	87	94
10/02/04	1	11	23	262	8	204	52	65
	2	0	14	0	0	0	100	100
	3	7	24	198	5	123	71	79
11/02/04	1	11	17	457	5	220	35	71
	3	8	27	348	7	231	70	74
12/02/04	1	10	19	867	7	355	47	63
	2	8	26	805	10	230	69	62
	3	0	15	0	0	0	100	100
13/02/04	1	4	17	248	4	153	76	76
14/02/04	2	3	16	43	3	51	81	81
	3	5	18	116	3	141	72	83
16/02/04	2	0	17	0	1	2	100	94
	3	3	17	136	2	152	82	88
17/02/04	1	12	29	432	7	278	59	76
	2	0	17	0	4	36	100	76
	3	2	16	51	2	27	88	88
18/02/04	1	0	16	0	1	1	100	94
	2	5	20	304	4	107	75	80
	3	1	17	10	1	3	94	94
20/02/04	3	10	26	271	6	111	62	77
21/02/04	1	3	38	38	2	20	92	95
	2	2	18	112	2	50	89	89
	3	10	28	409	8	314	64	71
22/02/04	1	10	21	192	7	130	52	67
	2	5	30	145	4	91	83	87
23/02/04	1	7	19	172	8	270	63	58
	2	6	23	256	4	42	74	83
	3	3	20	87	3	37	85	85
24/02/04	2	9	17	309	6	223	47	65
	3	4	23	535	5	547	83	78
25/02/04	1	4	19	115	7	152	79	63
	2	9	20	290	11	312	55	45
	3	5	18	138	6	181	72	67
26/02/04	1	8	21	690	5	60	62	76
	3	5	18	125	3	49	72	83
27/02/04	1	7	25	306	6	121	72	76
	2	3	18	120	4	124	83	78
	3	10	21	326	3	139	52	86
28/02/04	1	1	17	73	1	73	94	94
	2	8	22	263	7	259	64	68
	3	2	19	132	2	132	89	89
29/02/04	1	3	21	11	1	7	86	95
	2	6	20	177	3	119	70	85

## 9 - 13 Evaluations des anticipations

Ces tests correspondent aux taux de satisfactions client obtenus par le dispatcher (colonne n° 11) et par la maquette SOFFI avec une anticipation de 10 minutes sur les soumissions des EBF (colonne n° 10) et avec une anticipation sur la date de début au plus tôt des EBF (colonne n° 12).



## Chapitre 9. Annexes

DATE	POSTE	DISPATCHER			SOFFI		Soffi2		DISPATCHER % de satisfaction client	Soffi2 % de satisfaction client
		Nord			Nord		Nord			
		Nb	Nb Total	Durée Totale	Nb	Durée Totale	Nb	Durée Totale		
20 février 2003	1	8	25	364	6	274	5	273	68	80
	2	7	16	207	7	227	6	139	56	63
28 mars 2003	2	1	12	30	0	0	0	0	92	100
19 janvier 2004	1	0	13	0	0	0	0	0	100	100
	2	4	24	191	3	74	3	74	83	88
20 janvier 2004	1	0	14	0	0	0	0	0	100	100
9 février 2004	2	4	31	152	2	98	2	98	87	94
10 février 2004	1	11	23	262	8	204	8	203	52	65
	2	0	14	0	0	0	0	0	100	100
	3	7	24	198	5	123	5	117	71	79
11 février 2004	1	11	17	457	5	220	4	200	35	76
	3	8	27	348	7	231	5	224	70	81
12 février 2004	1	10	19	867	7	355	6	330	47	68
	2	8	26	805	10	230	7	226	69	73
	3	0	15	0	0	0	0	0	100	100
13 février 2004	1	4	17	248	4	153	4	212	76	76
14 février 2004	2	3	16	43	3	51	3	42	81	81
	3	5	18	116	3	141	5	250	72	72
16 février 2004	2	0	17	0	1	2	0	0	100	100
	3	3	17	136	2	152	2	152	82	88
17 février 2004	1	12	29	432	7	278	5	236	59	83
	2	0	17	0	4	36	1	1	100	94
	3	2	16	51	2	27	1	20	88	94
18 février 2004	1	0	16	0	1	1	0	0	100	100
	2	5	20	304	4	107	4	97	75	80
	3	1	17	10	1	3	1	3	94	94
20 février 2004	3	10	26	271	6	111	7	115	62	73
21 février 2004	1	3	38	38	2	20	2	68	92	95
	2	2	18	112	2	50	1	5	89	94
	3	10	28	409	8	314	4	331	64	86
22 février 2004	1	10	21	192	7	130	6	86	52	71
	2	5	30	145	4	91	3	89	83	90
23 février 2004	1	7	19	172	8	270	7	190	63	63
	2	6	23	256	4	42	2	44	74	91
	3	3	20	87	3	37	2	6	85	90
24 février 2004	2	9	17	309	6	223	4	210	47	76
	3	4	23	535	5	547	5	525	83	78
25 février 2004	1	4	19	115	7	152	4	116	79	79
	2	9	20	290	11	312	5	154	55	75
	3	5	18	138	6	181	4	116	72	78
26 février 2004	1	8	21	690	5	60	3	52	62	86
	3	5	18	125	3	49	6	77	72	67
	1	7	25	306	6	121	2	34	72	92
27 février 2004	2	3	18	120	4	124	3	106	83	83
	3	10	21	326	3	139	2	92	52	90
28 février 2004	1	1	17	73	1	73	1	73	94	94
	2	8	22	263	7	259	8	234	64	64
	3	2	19	132	2	132	2	132	89	89
29 février 2004	1	3	21	11	1	7	1	7	86	95
	2	6	20	177	3	119	4	120	70	80

## 9 - 14 Fonctionnalités du système d'information

### 9 - 14.1 Présentation générale

L'application SOFFI est composée de trois profils utilisateurs : administrateur Mouvement, dispatcher du secteur Nord, et dispatcher du secteur Sud.

Le profil administrateur qui est dédié au responsable du service Mouvement, permet le paramétrage de l'application. Il peut modifier ou supprimer toute information d'une manœuvre (code affaire et code poste affaire) sur son retard maximal admissible, sa durée de réalisation, sa manœuvre de précedence. L'ensemble des autres informations relatives aux EBF sont modifiables par le dispatcher depuis l'application SIMPLUS.

Chaque dispatcher va disposer d'un numéro identifiant et d'un mot de passe pour se connecter à l'application. Elle sera donc redémarrée et réinitialisée à chaque nouveau poste de travail. Le dispatcher pourra gérer toutes ses EBF (prévision d'exécution, saisies des réalisations), ses locotracteurs (positionnement, mise en ou hors service), et lancer l'optimisation du système.

## 9 - 14.2 Fonctionnalités de l'IHM

Nous allons présenter dans cette section, les développements en cours de construction de l'interface utilisateur qui sera mise en exploitation, et la méthodologie d'utilisation de la maquette. Certaines informations visibles sur les images écran sont liées uniquement à ces développements.

Chaque dispatcher doit s'identifier à chaque nouvelle connexion (Cf. Figure 82) selon son identifiant et son mot de passe personnel. Nous souhaitons pouvoir évaluer les prestations réalisées par chaque opérateur.

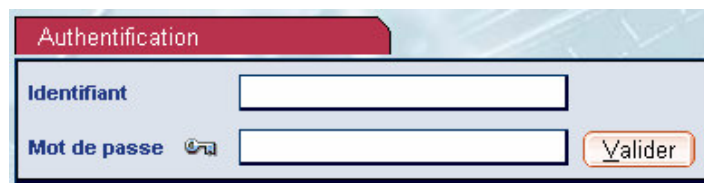


Figure 82 : Authentification de l'utilisateur

Après identification de l'utilisateur, nous avons accès à la page général des fonctionnalités (Cf. Figure 83). Nous avons la possibilité de gérer les EBF et les modifier si besoin est, de gérer les locotracteurs, d'afficher le planning sous forme de liste ou de diagramme de Gantt. Il est à noter que les fonctionnalités associées au profil administrateur ne seront pas accessibles aux dispatchers. L'administrateur a la possibilité de gérer les types EBF, la matrice des temps de haut le pied et la nomenclature des caractéristiques des manœuvres. Le bouton d'action « commencer le processus d'ordonnancement » survole l'ensemble de ces opérations qui sont présentées à chaque fois dans un onglet de visualisation spécifique.



Figure 83 : Sommaire de l'application

Dans un premier temps le dispatcher initialise géographiquement et temporellement ses ressources locotracteurs (Cf. Figure 84). Pour cela, il va sélectionner les locotracteurs en service lors de son poste de travail puis, les positionner géographiquement à leur prochain atelier de destination et enfin, renseigner la durée restante avant qu'ils soient disponibles. Par la suite, ces informations seront mises à jour automatiquement par le système lors du déroulement du planning réalisé. Par défaut, les locotracteurs sont positionnés à l'atelier VMTA pour le secteur Nord et FTRI pour le secteur Sud. Ces ateliers sont les vestiaires des équipes où ils effectuent les relèves de poste. Par exemple, le locotracteur nommé FG 01, est disponible immédiatement à l'atelier WAGO.

gestion des Locos			
Nom	Position	Etat	Dispo
FG01	WAGO	dispo	0
FG02	WAGO	dispo	0
FG03	WAGO	dispo	0
FG04	WAGO	dispo	0
FG05	WAGO	dispo	0
FG06	WAGO	dispo	0
FG07	WAGO	dispo	0
FG08	WAGO	dispo	0
FG09	WAGO	dispo	0
FG10	WAGO	dispo	0

Sauvegarder

Figure 84 : Initialisation des ressources locotracteurs



Une fois cette phase d'initialisation des ressources validée, il a accès à la liste de toutes les EBF en attente de réalisation (Cf. Figure 85). Chaque nouvelle arrivée de demande est notifiée à l'écran et par une alerte sonore. On retrouve les informations qui caractérisent les EBF : code affaire, code poste affaire, type EBF, date au plus tôt, date au plus tard. Une mise à jour soit par le système, soit par le dispatcher, renseigne les dates de prévision d'exécution, et les dates de réalisations des EBF.

Manoeuvre	Type	date Déb Client	date Fin Client	date PE Deb	date PE Fin	date début SR
710-33	M	29/02/2004 17:00	29/02/2004 17:30			
714-01	M	29/02/2004 17:20	29/02/2004 17:50			
710-01	M	29/02/2004 17:21	29/02/2004 17:51			
714-33	M	29/02/2004 17:22	29/02/2004 18:22			
720-33	M	29/02/2004 17:28	29/02/2004 18:28			
723-01	M	29/02/2004 18:00	29/02/2004 19:30			
714-01	M	29/02/2004 18:16	29/02/2004 18:46			
714-33	M	29/02/2004 18:16	29/02/2004 18:55			
720-01	M	29/02/2004 19:30	29/02/2004 20:30			
714-33	M	29/02/2004 20:15	29/02/2004 20:45			

Buttons: Edit, Suspendre, Ordonnance, Mise a jour OG

Figure 85 : Liste des EBF à ordonnancer

A partir de cet écran, le dispatcher va gérer les demandes EBF (Cf. Figure 86). Par le bouton « Edit », il peut consulter, modifier et renseigner les informations concernant chaque EBF : code affaire, code poste affaire, saisies manuelles des dates de prévision d'exécution, saisies des dates de réalisations, choix du code de non-respect s'il existe, saisie du numéro du locotracteur qui a effectué la manœuvre, saisie d'observations éventuelles.

**Modification d'un EBF**

Identifiant OG	FFLUB98191322		
Aff.	00722		
PostAff.	01		
Type	M		
date Déb Client	10/07/1998 23:30		
date Fin Client	11/07/1998 00:30		
date PE Deb	10/07/1998 23:30		
date PE Fin	11/07/1998 21:00		
date début SR		Heure Système	
date fin SR		Heure Système	
code de Non Respect	-		
Engin	FG51		
Informations Wagons	• T080 : 1		
Observations Client	...TOMBEREAU VOIE 13TCC A SORTIR ET PESER .....MERCI		
Observations Dispatcher			
<b>Sauvegarder</b>			

Figure 86 : Caractéristiques de l'EBF

Par le bouton « Suspendre » il peut désactiver temporairement une EBF de la liste, dans le cas de regroupement de manœuvres (Cf. Figure 87). La désactivation est indiquée par une zone grisée sur l'interface graphique (par exemple, la manœuvre 714-01), et l'EBF n'est pas prise en compte dans l'ordonnancement. Cependant, elle est conservée jusqu'à ce que la manœuvre de regroupement soit réalisée. Le dispatcher saisit alors des dates de réalisation identiques pour ces EBF.

**Gestion des EBFS**

	Manoeuvre	Type	date Déb Client	date Fin Client	date PE Deb	date PE Fin	date début SR
<input type="radio"/>	720-01	M	29/02/2004 13:30	29/02/2004 14:00			
<input type="radio"/>	714-01	M	29/02/2004 12:41	29/02/2004 13:11			
<input type="radio"/>	714-33	M	29/02/2004 20:15	29/02/2004 20:45			
<b>Edit</b>		<b>Suspendre</b>		<b>Ordonnance</b>		<b>Mise a jour OG</b>	

Figure 87 : Désactivation d'une EBF

Et, par le bouton « Ordonnance », le dispatcher exécute l'optimisation du système compte tenu des informations dont il dispose (Cf. Figure 88). Le résultat de l'ordonnancement est affiché sous forme d'un planning prévisionnel de charge avec l'affichage des dates prévisionnelles de réalisation de chaque EBF. Par exemple, le locotracteur FG 07, doit effectuer la manœuvre 720-01, de type M, prévue en réalisation le 03/08/2004 de 16 h 24 à 16 h 43, suivie de la manœuvre 714-33 de type M, prévue en réalisation de 16 h 43 à 17 h 02.

**TIXIS SYSTEMS**  
Arcelor Group

**FONFEC** [Sommaire](#) [Aide](#) [Plan du site](#) [Quitter](#)

Mardi 3 août 2004 16:08:14 **affichage du planning** anonymous

[Sommaire](#) > [Manoeuvres](#) > [Affichage planning](#)

**gestion des manoeuvres**

FG07				
affaire/posteA	Type	Début PE		Fin PE
720-01	M	03/08/2004	16:24	03/08/2004 16:43
714-33	M	03/08/2004	16:43	03/08/2004 17:02

FG01				
affaire/posteA	Type	Début PE		Fin PE
714-01	M	03/08/2004	16:29	03/08/2004 16:45
720-33	M	03/08/2004	16:45	03/08/2004 17:02

FG09				
affaire/posteA	Type	Début PE		Fin PE
705-33	M	03/08/2004	16:09	03/08/2004 16:32
710-01	M	03/08/2004	16:32	03/08/2004 16:52

FG04				
affaire/posteA	Type	Début PE		Fin PE
710-01	M	03/08/2004	16:24	03/08/2004 16:45
710-33	M	03/08/2004	16:45	03/08/2004 17:05

FG05				
affaire/posteA	Type	Début PE		Fin PE
714-33	M	03/08/2004	16:24	03/08/2004 16:38
723-01	M	03/08/2004	16:43	03/08/2004 17:02

Figure 88 : Planning prévisionnel de charge

Dans le cas où la solution fournie par le système ne conviendrait pas au dispatcher, il a la possibilité de forcer une EBF de la liste et de saisir la prévision d'exécution (Cf. Figure 89). De la même manière, il peut renseigner les dates de réalisation de la manœuvre.

**Edition d'un EBF**

Manoeuvre	<input type="text" value="710-01"/>
Type	<input type="text" value="M"/>
date Déb Client	29/02/2004 15:00
date Fin Client	29/02/2004 15:30
date PE Deb	<input type="text"/>
date PE Fin	<input type="text"/>
date début SR	<input type="text"/> <input type="text" value="Heure Système"/>
date fin SR	<input type="text"/> <input type="text" value="Heure Système"/>
<input type="button" value="Sauvegarder"/>	

Figure 89 : Saisie manuelle des prévisions d'exécution et des réalisations

Il a également la possibilité de voir le planning prévisionnel sous forme d'un diagramme de Gantt (Cf. Figure 90). Celui-ci met en évidence sur un premier rectangle (rouge) les temps d'occupation globaux des locotracteurs (haut le pied plus durée), et sur un deuxième (bleu), les temps propres de transport (durée). Cette représentation permet d'avoir une vision graphique de la répartition de la charge de travail des locotracteurs.

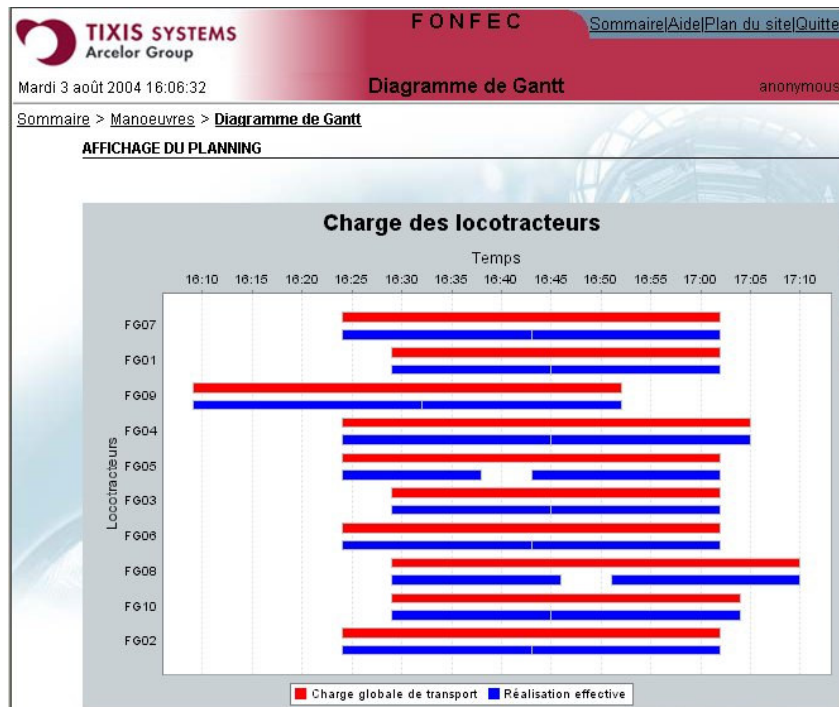


Figure 90 : Diagramme de Gantt

## 9 - 15 GLOSSAIRE

- Aciérie = Lieu de fabrication de l'acier. En sortie des Aciéries de Dunkerque (Coulée Continue n° 24 pour l'Aciérie secondaire, et Coulées Continues n° 21, 22 et 23 pour l'Aciérie principale). Les semi-produits obtenus sont des brames
- Atelier = Client réparti en zones de stockage ou de production qui émet des EBF
- Brame = Première étape de solidification de l'acier. L'acier refroidi est découpé en parallélépipèdes rectangles à la sortie des Coulées Continues. Propriétés : longueur de 5 à 10 mètres, largeur de 1 à 2 mètres, épaisseur de 20 à 300 millimètres, poids de 20 à 32 tonnes
- Bobine = Produit fini de l'acier. Brame amincie à l'épaisseur d'une feuille de papier qui peut mesurer jusqu'à 1 kilomètre de long
- Code affaire = Code d'une EBF qui spécifie le type de produit transporté et les ateliers entre lesquels a lieu le déplacement
- Code poste affaire = Code d'une EBF qui définit l'orientation du déplacement entre les ateliers
- Convoi = Groupe de wagons entraînés par un locotracteur
- Dispatcher = Personne qui assure la régulation du trafic ferroviaire sur le site Dunkerque
- Dispatching = Zone de travail des dispatchers
- EBF ou Expression Besoin Ferroviaire = Demande de mouvement émise par les ateliers pour l'évacuation ou l'acheminement de rames chargées ou vides vers un atelier
- Haut le pied = Déplacement d'un locotracteur sans wagon entre deux ateliers
- Locotracteur = Engin de traction sur rail actionné par un moteur thermique de faible puissance

- Manœuvre = Déplacement orienté d'un convoi (locotracteur avec wagons) entre deux ateliers suite à une demande d'EBF. Un mouvement est caractérisé par un code affaire et un code poste affaire qui définit son orientation
- PTV ou Problème de Tournées de Véhicules
- PVC ou Problème du Voyageur de Commerce
- Rames = Groupe de wagons manœuvrant ensemble
- SIMPLUS ou Système Informatique du Mouvement Pour la Logistique du Site. Application qui permet la réception, l'émission, et la transmission d'EBF. Elle constitue également la base de données des prestations ferroviaires
- SOFFI ou Système d'Optimisation de Flux Ferroviaires Industriels = Dénomination de notre projet
- TCC ou Train Continu à Chaud = Installation qui réduit progressivement l'épaisseur d'une brame
- VRPTW ou Vehicle Routing Problem with Time Windows