RÉPUBLIQUE DU SÉNÉGAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE THIÈS

PROJET DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME D'INGÉNIEUR DE CONCEPTION

TITRE OPTIMISATION DES CONVOIS FERROVIAIRES

AUTEUR : MODOU DIOUF
DIRECTEUR : J.C. WARMOES
CO-DIRECTEUR :

DATE : JUIN 86

A ma mère.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier très sincèrement mon directeur de projet, Mr Jean Claude WARMOES qui n'a ménagé aucun effort pour m'assister aussi efficacement.

Mes remerciements vont également aux MM. PICHON et GIOAN de la Direction des Etudes Générales à la R.C.F.S, à Mr Souleymane DIOME, ingénieur polytechnicien à la R.C.F.S et à tous les agents de la D.E.G pour leur disponibilité et la documentation fournie,

A l'élève ingénieur Abdoul Aziz Gueye pour son soutien constant tout au long de cette étude,

A mes camarades de promotion pour leur compréhension sans faille et leur soutien moral indispensable à l'élaboration de ce projet.

TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE

Notre étude a pour objectif de permettre à la R.C.F.S. de gérer d'une manière optimale ses ressources.
Ce qui va lui permettre de contribuer à un certain effort d'autofinancement. Pour y parvenir nous nous proposons de passer par une minimisation des pertes de puissance qui ont toujours eu lieu lors du déplacement d'un train donné. Autrement dit pour une locomotive donnée, nous voulons éviter la sous-utilisation de sa puissance, en trouvant le nombre de wagons optimal qu'elle doit remorquer. Pour atteindre cet objectif nous adopterons le plan d'étude suivant :

INTRODUCTION

La regie des chemins de fer du Sénégal (R.C.F.S) établissement public à caractère industriel et commercial constitue un maillon important de la chaine économique du pays. Et comme toutes les entreprises locales, elle n'est pas sans difficultés ; difficultés dues d'une part à la conjoncture : crise économique mondiale et conditions climatiques défavorables (serié d'années de sécheresse) et d'autre part à ses structures internes même (gestion plus ou moins opérationnelle de ses ressources)

Cette deuxième categories de difficultés n'est pas insurmontable, bien au contraire.

Ainsi la R.C.F.S a-t-elle entrepris plusieurs actions qu'on peut trouver dans le "plan de relance de l'exploitation du chemin de fer" de 1984-1985. Elle s'adresse également à des structures externes pour que ces dernières mènent des études en vue d'une amélioration de la gestion de ses ressources. C'est ainsi donc que cette présente étude fait partie d'une serie d'études menées à l'Ecole Polytechnique de Thiès; études ayant pour but l'obtention d'un systeme de gestion opérationnelle des ressources disponibles au niveau de la R.C.F.S.

Chapitre I. DESCRIPTION DE LA SITUATION DE LA REGIE DES CHEMINS DE FER ET POSITION DU PROBLEME

1.1 Description de la situation de la R.C.F.S.

Comme nous l'avons déjà annoncé, la R.C.F.S constitue un élément important dans le développement industriel du Sénégal. Sa principale mission est d'assurer le transport des biens et personnes, aussi bien à l'intérieur du pays qu'à l'extérieur (Ex transport effectué en direction du Mali)

Le diagnostic publié dans le "septième plan national de développement 1985-1989" reflète assez bien la situation de la regie. En effet, la R.C.F.S. est confrontée à des difficultés, comme toutes les autres entreprises d'ailleurs ; difficultés qui se situent à plusieurs niveaux:

1.1.1 Au niveau de son fonctionnement.

La mauvaise situation de la trésorerie, les lourdeurs administratives caractéristiques des établissements publics et la diversité de statuts au niveau du personnel entravent son bon fonctionnement.

1.1.2 Au niveau de son materiel.

La R.C.F.S. est un héritage colonial, et le materiel qui y est laissé se remplace par compte goutte. La mauvaise qualité de la voie, l'insuffisance et la vétusté du materiel roulant confirment ce que nous venons de dire. A tous ces facteurs s'ajoute le bas niveau permanent des stocks de pièces de rechange; et tout cela n'est pas sans effet néfaste sur le trafic.

1.1.3. Au niveau du financement.

A ce niveau, il y a des blocages causés principalement par certains facteurs dont voici quelques uns :

- Une lenteur dans la mise en place des financements internationaux.
- Une insuffisance de la participation de la régie aux négociations des conditions de financements qui la concernent.
- Une insuffisance de fonds propres.

1.1.4 Niveau externe

Le parallélisme entre la route et le rail accentue la concurrence entre les trafics routier et ferroviaire. Cela n'arrange pas bien sûr la R.C.F.S qui y perd d'ailleurs énormément. La principale explication que nous pouvons donner à ce phénomène, quand on sait que le train est de loin moins cher que l'auto, est que le client n'y trouve pas le standard dont il a besoin.

Une bonne politique ferroviaire nationale pourrait certainement trouver des remèdes à cette situation.

A tous ces problèmes, s'ajoute un autre qui, à notre avis, est moins préoccupant parce que pouvant être résolu rapidement, sans dépenses supplémentaires : c'est la mauvaise utilisation des ressources disponibles. Aussi notre étude aura-t-elle accès sur une meilleure utilisation de ces ressources.

1.2 Position du problème.

Comme précédemment annoncé, notre objectif est de trouver un système de gestion optimale des ressources de la R.C.F.S. Pour y parvenir, nous passerons par une minimisation de la puissance perdue lors du transport des différents produits : il y a perte de puissance si la puissance utilisée pour effectuer un transport donné est supérieure à celle dont on avait réellement besoin.

Soit T_D la charge démarrable de l'ensemble des locomotives utilisées pour transporter les produits au mois de Septembre, T_u : la charge tirée réellement par les locomotives, la différence $T_D - T_u$ est la puissance perdue durant ce transport ; et le but de notre étude est de rendre minimum cette puissance perdue. Nous réussirons cette épreuve en trouvant un système permettant une utilisation quasi maximale de la puissance des différentes locomotives, en tenant compte bien sûr de certaines contraintes parmi lesquelles nous pourrons citer :

- <u>celles relatives au marché</u>

  - tonnage maximum demandé pour un produit
  - Capacité de stockage des stations (gares)

- <u>Celles relatives aux capacités du matériel roulant</u>

  a) ne pas dépasser la puissance des locomotives,

  b) ne pas dépasser la capacité des wagons

- <u>Celles relatives aux priorités définies par les pouvoirs publics</u>

a) maintien du trafic-voyageur sur certaines lignes réputées déficitaires.

b) priorité absolue au transport de l'aide alimentaire en direction de la République du Mali.

c) priorité absolue au transport du matériel de construction destiné au barrage de manantali.

Nous essayerons de trouver une fonction économique soumise à ces différentes contraintes (programmation linéaire) et nous utiliserons la méthode du simplexe pour trouver la solution optimale.

Ch II MODÉLISATION DU PROBLÈME

2.1 FONCTION ECONOMIQUE

Notre analyse est basée sur une période d'un mois, ce mois pouvant être choisi au hasard parmi les douze mois de l'exercice. C'est pour cette raison que les formules que nous allons développer ici seront d'une application générale et pourront être utilisées pour n'importe quel mois de l'exercice.

La différence entre T_D et T_u (voir chap I) constitue notre fonction objective à minimiser.

Soit $\min z = T_D - T_u$

avec $T_D = \sum_{i=1}^{m} d_i P_i y_i$

et $T_u = \sum_{j=1}^{m} \sum_{i=1}^{k} a_{ij} x_{ij}$

Donc $$\boxed{z = \sum_{i=1}^{m} d_i P_i y_i - \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{k} a_{ij} x_{ij}}$$

m : nombre de locomotives existant à la régie

P_i : puissance d'une locomotive i, d_i : disponibilité

y_i : facteur qui tient compte du taux de rotation et du taux en opération périodique de la locomotive i

a_{ij} : facteur qui tient compte du taux de rotation des wagons transportant la marchandise j, remorqué par la locomotive i,

$a_{ij} = w_{ij} \times T_{ij} \times d_{ij}$

avec w_{ij} = poids total (tare + capacité) d'un wagon transportant la marchandise j, remorqué par la locomotive i.

T_{ij} : Taux de rotation d'un wagon transportant la marchandise j, remorqué par la locomotive i.

d_{ij} : taux de disponibilité d'une locomotive i transportant la marchandise j.

x_{ij} : nombre de wagons transportant la marchandise j, remorqués par la locomotive i.

2.2. Contraintes

* contraintes liées aux nombres de wagons disponibles

Pour un type de wagons donnés, le nbre total affecté aux différentes locomotives ne peut pas dépasser le nombre disponible.

Soit un nombre de wagons L donné : N_L

on a $$\sum_{\alpha=1}^{m} x_{\alpha L} \leq N_L$$

$x_{\alpha L}$: nombre de wagons L affectés à la locomotive α.

Les mêmes contraintes sont appliquées aux wagons de type K+KV, LH, H, T...etc.

* Contraintes liées à la puissance des locomotives
Le nombre total de wagons pleins (tare + capacité) ne peut pas avoir un poids supérieur à la force de traction de la locomotive utilisée

Soit E_c : effort au crochet = force de traction

on a $\sum_{i=1}^{n} (w+t)_i \, x_i \leq E_c$

w_i : capacité du wagon de type i
t_i : tare du wagon de type i
x_i : nombre de wagons de type i

* Contraintes liées au tonnage mensuel.
En connaissant le nombre de wagons nécessaires pour transporter le tonnage d'un mois donné (nombre de wagons réels x taux de rotation), nous pouvons calculer la force de traction nécessaire (poids total de toutes les marchandises transportées + poids à vide de tous les wagons utilisés durant ce mois).
Cette force de traction doit être inférieure ou égale à la force nécessaire pour tirer tous les wagons utilisés durant ce mois et qui seraient à pleine charge ; puisque rien ne nous précise que tous les wagons étaient à pleine capacité durant tout le transport des marchandises. Nous formulons cette contrainte de la

manière suivante.

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{k} a_{ij}\, x_{ij} \geq Q_{tr}$$

a_{ij} : défini précédemment (dans la fonction économiques)

Q_{tr} : force totale de traction nécessaire.

* Contraintes liées à la puissance disponible durant le mois :

$$\sum_{i=1}^{m} d_i P_i y_i \geq Q_{tr}$$

$\sum_{i=1}^{m} d_i P_i y_i$: voir la fonction économique.

* Contraintes liées à la quantité de produits que peut recevoir une ville donnée.

Le tonnage total transporté dans cette ville ne doit pas être supérieur à la capacité d'accueil ; mais nous ne disposons pas de données pour cette capacité.

$$\sum_{j=1}^{k} Q_j \leq A_a$$

Q_j : quantité transportée de la marchandise j.

A_a : capacité d'accueil de la ville a.

N.B . Il est à noter que nous ne parlons ici que de trafic-marchandises ; le trafic-voyageurs ne dispose pas en effet, de données statistiques et nous avons jugé, de plus, qu'il est plus intéressant de faire une étude sur le trafic-marchandises, qui, de loin, est le plus important.

~ o ~

Ch III. ACQUISITION DES DONNÉES ET ESTIMATION DES PARAMÈTRES

3.1 Principales gares et leurs codes

Gares principales	Codes
Dakar	0000
Rufisque	0029
Thiès	0070
Guinguineo	0204
Kaffrine	0252
Kounguel	0336
Tambacounda	0465
Kidira	0643
Lam-Lam	2013
Tivaouane	2022
Kaolack	5022

le premier chiffre à partir de la gauche indique la ville d'origine

0 ⟶ Dakar

2 ⟶ Thiès

5 ⟶ Guinguineo

Les trois derniers chiffres indiquent la distance séparant l'origine de la gare citée.

La longueur de l'ensemble des voies principales de la régie des chemins de fer de Sénégal (R.C.F.S.) s'élève à 906 km dont 70 km de double voie de Dakar à Thiès. Les voies secondaires ont une longueur de 151,8 km.

- Axe principal de Dakar à Kidira (644,6 km) traversant le Sénégal de l'ouest à l'Est et qui se prolonge au delà de la frontière malienne vers Bamako et Koulikoro.

3.2 Marchandises transportées et prévisions

(Ref : plan de relance 1985-1986)

En national

Produits	Prévisions (tonnes)
Phosphates de taïba	1.300.000
Phosphates de Lam.Lam	350.000
Hydrocarbures	30.000
Arachides	57 000
Coton-fibre	4500
Divers	négligeable

En international

Produits	Prévisions
Sel	40 000
Engrais	12000
Denrées alimentaires	16 000
Ciment	20 000

3.2.a TABLEAU DES PRODUITS ET DES MOYENS PAR LESQUELS ILS SONT TRANSPORTÉS

TRAFIC	PRODUITS	L	T	K+KV	H	LH
NATIONAL	1 Hydrocarbures				+	
	2 Divers			+		
INTERNATIONAL	3 Sel			+		
	4 Engrais			+		
	5 Denrées alimentaires			+		
	6 Ciment			+		
	7 Fers et tôles	+	+			
	8 Véhicules et Engins	+				
	9 Conteneurs	+				
	10 Hydrocarbures				+	
	11 Céréales			+		
	12 Divers			+		
MANANTALI	13 Ciment					+
	14 Hydrocarbures				+	
	15 Divers			+		

Données fournies par la direction commerciale

Fers et tôles	16000
Véhicules et engins	4000
Conteneurs	4000
Hydrocarbures	57000
Divers	16000
Céréales	40000

Barrage de Manantali

Produits	Prévisions (tonnes)
Ciment	75000
Hydrocarbures	12000
Divers	15000

3.3 Parc du matériel roulant

3.3.1 Matériel-moteur

locomotives	Puissance (CV)
6 BB 1100	1050
5 BB 1200	1100
10 BB 1600	1500
2 CC 2475	2200
3 CC 1700	1650

Ici nous connaissons la puissance de chaque type de locomotive, mais nous ne connaissons pas encore la charge

avec laquelle la locomotive peut demarrer (charge démarrable)
Les formules ci-dessous nous permettrons de trouver cette charge demarrable.

Formule de la puissance $P = \frac{Ec \cdot V}{270}$ (cv)

V (km/hr) : vitesse moyenne du train

Ec (kf) : effort au crochet

Pour qu'il y ait traction, il faut que

$$Ec \geq T \times \left(RA + i + \frac{500}{R} \right)$$

T : tonnage du train (en tonnes) = charge remorquable

R.A. : résistance à l'avancement dans le plan

i : rampe (mm/m) (°/oo)

R : Rayon de la courbure de la ligne (en m

(en général $R = \infty$)

on a $Ec = \frac{P \times 270}{V}$

et la charge remorquable : $\boxed{Tr \leq \frac{Ec}{RA + i}}$ en t

. Charge démarrable $\boxed{Td = \frac{Ec}{i + 4{,}4}}$ en t

Formule de RA (voir annexes)

i varie suivant la ligne empruntée par le train

Ex :

ligne	Pente (mm/m)
Pout-Thiès	9
(Dakar-Thiès et ailleurs	7
Thiès-Hombole	4

Pour les autres lignes on peut considérer le réseau comme étant plat, le pays est en effet d'un relief peu accidenté
Calculons maintenant la charge remorquable et la charge démarrable pour chaque type de train

Exemple de calcul :

Pour le train BB 1100, $P = 1050$ cv, $V_{moy} : 50$ km/h

on a $P = \frac{Ec.V}{270} \Rightarrow Ec = \frac{P \times 270}{V} = \frac{1050 \times 270}{50} = 5670$ kgf

$T_R = \frac{Ec}{RA + i}$ avec $RA = 2{,}2 + \frac{V^2}{2000}$ (formule d'ALSTHOM)

pour RA nous avons utilisé la formule d'ALSTHOM qui est la plus utilisée dans ces calculs. Ainsi $RA = 2{,}2 + \frac{50^2}{2000}$

$RA = 3{,}45$, nous prenons $i = 4$ mm (voir l'explication plus loin)

Donc $T_R = \frac{5670}{3{,}45 + 4} = 761{,}07$ tonnes

$T_d = \frac{Ec}{i + 4{,}4} = \frac{5670}{4 + 4{,}4} = 675$ tonnes

On doit toujours avoir $T_R > T_d$
Ici nous avons calculé la charge remorquable et la charge "démarrable" pour pouvoir faire la distinction entre les deux notions, mais seule la charge "démarrable" nous sera utile réellement. La vitesse moyenne que nous avons utilisée est de 50 km/h (donné par la R.C.F.S. pour les trains de marchandises)

Pour ce qui est des pentes, compte tenu de la formule qui donne la charge remorquable et la charge démarrable (ie : $T_R = \frac{Ec}{RA+i}$ et $T_D = \frac{Ec}{i+4,4}$), on voit que cette charge diminue quand la pente augmente ; on souhaiterait donc aborder des pentes plus petites. Mais en abordant des pentes élevées, le train aura tendance à ralentir (ce qui fait que dans certaines parties de la ligne il y a une vitesse limite. Le ralentissement du train augmentera l'effort au crochet ($Ec = \frac{P \times 270}{V}$)

A la suite de cette analyse, nous pouvons donc dire qu'il y a augmentation de l'effort au crochet quand la pente augmente ; et de la relation $T = \frac{Ec}{RA+i}$, nous pouvons conclure que $T \simeq$ cte quand i et Ec augmente. Aussi avons-nous pris une pente moyenne de 4 mm/m sur l'ensemble du réseau.

Le tableau de la page suivante nous donne la charge "démarrable" et la charge remorquable pour chaque type de train.

3.3.1.a Tableau des charges remorquables et démarrable

locomotive	P(cv)	Ec (kgf)	RA	T_R (t)	T_D (t)
BB 1100	1050	5670	3,45	761,07	675
BB 1200	1100	5940	3,45	797,31	707,14
BB 1600	1500	8100	3,45	1087,25	964,28
CC 2475	2200	11880	3,45	1594,63	1414,28
CC 1700	1650	8910	3,45	1195,97	1060,71

3.3.2 Materiel remorqué

Ici nous ne tiendrons compte que du matériel remorqué en international, faute de données concernant le matériel utilisé en national. En effet, nous ne disposons que des données pour l'arachide, mais d'après des sources de la régie, l'arachide n'est plus transportée par voie ferroviaire voilà bientôt 2 ans, ce qui fait donc qu'il n'y a plus de données qui peuvent intéressées à notre étude, en national.

(voir tableau du matériel remorqué en international : 3.3.2.a)

3.3.2 a) Matériel remorqué en international

Type de wagon	H	LH	K + KV	T	L
Sénégal	75	50	278	68	37
Mali	51	10	151	23	31
Total	126	60	429	91	68
taux de rotation	1,567	3,885	1,760	1,150	1,20
disponibilité	0,85	0,90	0,85	0,80	0,80
Charge par wagon (t)	35	35	30	30	30

H : citernes - hydrocarbures

LH : citernes - ciment en vrac

K : wagons couverts

KV : wagons couverts - vracs

T : Tombereaux

L : Plate-formes

3.3.3. Représentation graphique - Produits (t), en fonction des mois

Après le recensement des marchandises transportées et des moyens utilisés pour effectuer ce transport, nous partirons maintenant de l'exercice 1984-1985 et nous essayerons de voir, grâce à une représentation graphique des quantités transportées en fonction du mois, les marchandises dominant le transport aussi bien national qu'international. Cela va nous permettre de pouvoir négliger un certain nombre de marchandises au profit d'autres et de déterminer la puissance requise en un moment donné de l'année (Ex pour un mois donné); ce qui nous permettra de trouver le nombre et le type de locomotives et de wagons nécessaires pour le transport de ces marchandises. Ainsi la R.C.F.S pourra-t-elle demander à son service d'entretien de lui fournir tant de locomotives à telle ou telle période de l'année. Autrement dit, le service d'entretien maintiendra le taux de disponibilité des locomotives et des wagons à un niveau conforme aux besoins de la R.C.F.S.

Nous tenons à souligner que nous avons écarté le transport des phosphates (Taïba et Lam-Lam) de notre analyse, plus précisément de notre étude pour la simple raison que Taïba a ses propres wagons et ne fait que louer les locomotives de la régie ; Lam-Lam également a ses wagons et loue et des wagons et des locomotives de la R.C.F.S. Ainsi avons-nous jugé que l'optimisation de ces convois n'est pas une affaire concernant la régie.

Partant donc des marchandises qui restent, nous avons fait une représentation graphique du tonnage en fonction du mois et cela nous a permis de voir l'influence de chaque produit sur le total transporté (voir représentation graphique).

Il faut noter que nous n'avons pas fait la représentation graphique de certains produits tels que les conteneurs, les véhicules et engins, les hydrocarbures de manantali et les autres marchandises du trafic national pour éviter de nous retrouver avec un graphique rébarbatif parce que trop chargé ; seulement après observation des quantités, nous avons constaté que ces courbes se trouveraient dans l'intervalle formé par les courbes (7) et (10). Nous avons donc fait la représentation graphique des marchandises suivantes :

(1) Céréales (trafic international)
(2) Ciment (manantali)
(3) hydrocarbures (trafic international)
(4) hydrocarbures (trafic national)
(5) Divers (manantali)
(6) Divers (trafic international)
(7) Sels
(8) Denrées alimentaires
(9) Engrais
(10) Ciment (international)
(11) Fers et tôles
(12) Total transporté.

333a EXERCICE 1984-1985

TRAFIC INTERNATIONAL TONNAGES PAR PRODUITS (t) - et NATIONAL

	07	08	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	TOTAL
Montée													
Ciment	965	685	169	689	217	100	30	0	60	40	41	-	2996
Engrais	1475	1.113	100	760	1430	1560	562	1.178	490	-	510	-	9.178
Céréales	13.720	11.924	10.007	10.474	9.112	8.746	10.418	6.523	10.457	7.208	10.761	11974	121.324
Denrées alimentaires	1919	388	2113	2073	591	923	340	487	2530	1100	1328	788	14.580
Fers et tôles	663	484	940	848	1057	773	1.614	755	1.185	850	1.108	1037	11.314
Sels	2610	2835	3510	3.315	3.590	3.815	3.240	2.365	3.920	3.115	1.755	1805	35.875
Conteneurs	-	-	797	738	1.028	1.266	1.231	674	783	1.249	1485	807	10.058
Divers	1660	3750	1061	2409	3098	3.231	3.544	2.948	1.640	2.297	1.455	1945	29.038
Véhicules et engins	-	266	127	47	367	146	169	60	138	8	37	66	1431
Hydrocarbures	6186	4504	5302	5.598	6.474	7.415	6.075	5.878	5.832	7295	5.036	5292	70.887
MANANTALI													
Ciment	6.347	6.660	4.275	6.290	8.235	7020	7.525	6.150	7.915	8140	7.635	5.450	81642
Hydrocarbures	418	838	720	765	1025	505	809	704	1386	675	1.278	353	9.476
Divers	1.238	1.164	1.800	2.242	1520	1.671	1.400	1.420	1209	1.388	1005	1098	17.145
Descente	1.705	1.603	1.611	1.774	1.749	2.803	2.526	2907	4004	2351	3.467	2589	29.089
TOTAL INTERNATIONAL	38906	36.204	32.532	38.022	39493	39.974	39483	32.049	41.549	35.716	36.901	33.204	444.033
NATIONAL													
Hydrocarbures	1952	2393	2735	2506	2999	3732	2074	2445	3548	3017	2263	1681	31345
Divers	860	566	46	242	416	46	757	912	630	431	203	91	5200
TOTAL GENERAL	41.718	39.163	35.313	40.770	42.908	43.752	42.314	47.360	45.727	39.164	39.367	34.976	492.532

REPRÉSENTATION GRAPHIQUE - Quantité du produit = f (mois)

24

REPRÉSENTATION GRAPHIQUE - Quantité totale transportée = f(mois)

N.B. les chiffres des mois utilisés pour la représentation graphique correspondent aux mois de l'exercice, dans leur ordre chronologique.

Ex 1 → Juillet
2 → Août
etc.

Une analyse des courbes nous montre déjà que les marchandises qui dominent le trafic sont les céréales (trafic international), le ciment (manantali) et les hydrocarbures (trafic international). Toutes les marchandises qui restent sont à importance égale. Aussi, devons-nous nous attendre à un nombre plus important de wagons de céréales, de ciment et d'hydrocarbures. Mais n'allons pas trop vite en besogne, essayons d'abord de voir pour chaque marchandise, le type de wagons qui la transportent, la capacité de ces wagons, leur disponibilité, leur taux de rotation et leur poids à vide (tare).

A partir des tableaux 3,2a, 3.3.2a et 3.3.3a, nous essayerons de trouver pour chaque mois, le nombre de wagons nécessaires pour le transport de telle ou telle marchandise, ce qui va nous permettre de trouver le mois pendant lequel la régie aura besoin d'un nombre plus important de wagons (voir tableau 3.3.3.b)

Ce même tableau nous montre qu'en international, le

3.3.3 b Nombre de wagons par produit et par mois

(INTERNATIONAL et NATIONAL)
(EXERCICE 1984/85)

	07	08	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	TOTAL
NATIONAL													
hydrocarbures	42	51	59	54	64	80	45	52	76	65	49	36	673
Divers	19	13	1	6	10	1	19	23	16	11	5	2	126
INTERNATIONAL													
ciment	22	5	4	15	5	2	1	0	2	1	1	0	58
Engrais	33	25	2	17	32	35	13	26	11	0	11	0	205
Céréales	305	266	223	233	203	195	232	145	233	161	240	267	2703
Denrées alimentaires	43	9	47	46	13	21	8	11	56	25	30	18	327
Fers et tôles	20	18	34	31	38	28	58	27	43	31	40	38	406
Sel	58	63	78	74	80	85	72	53	87	69	39	40	798
Conteneur	0	0	28	26	36	44	43	23	27	43	52	28	350
Divers	37	84	24	54	69	72	79	66	37	51	32	43	648
Vehicules et engins	0	9	5	2	13	5	6	2	5	1	1	2	51
Hydrocarbures	132	97	114	120	139	159	130	126	125	157	108	144	1551
MANANTALI													
Ciment	52	54	35	51	67	57	62	50	65	67	62	45	667
Hydrocarbures	9	18	16	17	22	11	17	15	30	15	27	8	205
Divers	28	26	46	50	34	37	31	32	27	31	22	24	382

nombre maximum de wagons toutes catégories confondues (Mali + Sénégal), que la régie a utilisés (exercice 1984-1985) est de 752 wagons pour le mois de Janvier, donc on devrait avoir une plus grande disponibilité de wagons durant cette période.

D'autre part si nous prenons un mois de l'exercice par hasard (Ex mois de septembre), nous voyons que pour le transport des marchandises, aussi bien en national qu'en international (national + international), il faut une force de traction de 53.310 tonnes durant cette période. (cette quantité est obtenue en faisant la somme des tares de toutes les catégories de wagons de ce mois : tableau 3.3.3.b, plus le tonnage du mois). Cela veut dire que la R.C.F.S doit disposer pour ce mois-là un nombre de locomotives telles que leur charge "démarrable" totale soit supérieure à 53.310 tonnes, tout en étant à peu près égale pour qu'il n'y ait pas de gaspillage de puissance. Nous entendons par gaspillage de puissance la sous-utilisation d'une locomotive donnée

Ex Une locomotive d'une puissance de 1100 cv, d'une capacité de traction de 707 t sera sous-utilisée si elle est employée pour le transport de 100 t !!! cela équivaut à une perte d'une capacité de traction de 607 t. Nous cherchons donc des méthodes pour résoudre ce problème de perte de puissance dans le chapitre qui va suivre. Ces méthodes donneront des solutions pour une utilisation rationnelle des ressources existant à la regie des chemins de fer du Sénégal.

Chapitre IV

OBTENTION D'UNE SOLUTION OPTIMALE

4.1 Rappel sur la programmation linéaire

La programmation linéaire peut se définir comme un outil mathématique qui permet d'analyser des problèmes dans lesquels nous retrouvons une fonction linéaire d'un certain nombre de variables, appelée fonction économique, que l'on désire maximiser ou minimiser; ces variables sont soumises à des restrictions imposées par la situation physique, pratique ou économique du problème. Ces restrictions qui sont imposées prennent forme d'équations ou d'inéquations linéaires dans la formulation d'un modèle de programmation linéaire.

4.1.1 Formulation mathématique d'un programme linéaire

La formulation mathématique d'un programme linéaire a la forme suivante :

Maximiser ou minimiser :

$$Z = c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 + \dots + c_n x_n$$

avec les contraintes

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \dots + a_{1n}x_n \ (\leq, =, \geq)\ b_1,$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + \dots + a_{2n}x_n \ (\leq, = \geq)\ b_2$$

$$- - - \qquad\qquad - - -$$

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + a_{m3}x_3 + \dots + a_{mn}x_n \ (\leq, =, \geq)\ b_m,$$

et les contraintes de non-négativité

$$x_j \geq 0 \ , \ j = 1, \dots, n.$$

où Z représente la valeur de la fonction économique ;
$c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$ les coefficients des variables de la fonction économique ;
$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ les variables (inconnues) du modèle ;
$a_{11}, a_{12}, \dots a_{mn}$ les coefficients des variables pour les différentes contraintes ayant l'un ou l'autre des trois signes mentionnés ci-dessus
$b_1, b_2, \dots b_m$ les quantités disponibles de chaque ressource.

Donc résoudre un problème de programmation linéaire, c'est déterminer la valeur des variables x_j soumises aux contraintes du genre de celles citées ci-dessus et rendant optimale la fonction économique.

4.1.2 Les différentes phases d'une étude de recherche opérationnelle

1- Formulation du problème ;
2- Construction du modèle mathématique ;
3- Obtention d'une solution à partir du modèle ;
4- Vérification du modèle et de la solution ;
5- Etablissement de contrôles sur la solution ;
6- Implantation de la solution.

La construction du modèle mathématique d'un problème de programmation linéaire s'obtient en :

a) Identifiant les variables qui sont associées au problème. Une définition claire et précise de ces variables peut faciliter de beaucoup la formulation du modèle linéaire.

b) Formulant les contraintes qui délimitent les valeurs que peuvent prendre les variables.

c) Formulant la mesure d'efficacité associée aux variables ; cette mesure d'efficacité se traduira en une fonction linéaire dite fonction économique.

4.1.3 Méthode du simplexe

– Pour la résolution du programme linéaire que nous allons établir, nous utiliserons la méthode du simplexe dont la théorie convient d'être rappelée ici.

Soit donc à maximiser ou à minimiser la fonction économique $Z = \sum_{j=1}^{n} c_j x_j$

avec les contraintes

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j \ (\leq, =, \geq) \ b_i, \quad i = 1, \ldots, m$$

$$x_j \geq 0, \quad j = 1, \ldots, n.$$

La résolution d'un tel programme consiste à déterminer le vecteur X satisfaisant les contraintes ci-dessus et optimisant la fonction économique, où

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

Et sous forme matricielle, on écrit :

maximiser ou minimiser

$$Z = CX$$

avec les contraintes $AX \ (\leq, =, \geq) \ b$

$$X \geq 0$$

où C est un vecteur-ligne à n composantes, X un vecteur-colonne à n composantes, A la matrice des coefficients d'ordre $m \times n$ et b un vecteur-colonne à

m composantes.

– Il y a ensuite les variables d'écart qu'on utilise pour transformer un système d'inéquations en un système d'équations. Soit une contrainte de la forme :

$$a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n \leq b_i,$$

elle s'écrira désormais :

$$a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n + x_{n+i} = b_i$$

où $x_{n+i} \geq 0$.

Un système de m contraintes ayant la forme suivante

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &\leq b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &\leq b_2 \\ \vdots \qquad\qquad & \quad \vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &\leq b_m \end{aligned}$$

S'écrit, en introduisant m variables d'écart toutes non négatives,

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n + x_{n+1} &= b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots a_{2n}x_n + x_{n+2} &= b_2 \\ \vdots \qquad\qquad & \quad \vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n + x_{n+m} &= b_m \end{aligned}$$

Il en est de même pour une contrainte de la forme

$$a_{l1}x_1 + a_{l2}x_2 + \dots a_{ln}x_n \geq b_l.$$

On soustrait dans ce cas une variable d'écart et on ajoute en même temps une variable dite artificielle pour pouvoir retrouver après la matrice identité.

Soit donc la contrainte suivante.

$$a_{l1}x_1 + a_{l2}x_2 + \dots + a_{ln}x_n \geq b_l ,$$

elle s'écrira désormais

$$a_{l1}x_1 + a_{l2}x_2 + \dots + a_{ln}x_n - x_{n+l} + y_l = b_l$$

avec $x_{n+l} \geq 0$, y_l : variable artificielle.

Les variables d'écart jouent un rôle très important dans la résolution d'un programme linéaire puisque la méthode du simplexe s'applique seulement à un système de contraintes sous forme d'équations. De plus, les variables d'écart ont une interprétation physique pour chacune des contraintes où elles sont introduites. La variable d'écart aura la même unité de mesure que la ressource de la contrainte où elle est introduite. Lorsque le programme linéaire est écrit sous la forme standard, les variables d'écart constituent la solution de base.

Pour éliminer les variables artificielles avant l'optimisation, on emploie la méthode des deux phases.

Soit la fonction $Z' = \sum_{j=1}^{n} a_{ij}x_j - \sum_{j=1}^{n} y_j = Z - \sum_{j=1}^{n} y_j$

Phase I

On cherche à minimiser $\sum_{j=1}^{n} y_i$ dans une première étape en utilisant la méthode du simplexe.

Phase II

Une fois la solution optimale obtenue dans la phase I, on remplace dans le tableau final, la fonction objective par celle du problème initial, c'est à dire Z. Ensuite on réoptimise par la méthode du simplexe.

Si parmi les autres variables il en existe qui ont des coefficients négatifs dans la dernière rangée, il faut choisir la variable hors base ayant le plus petit coefficient pour le faire entrer dans la base : c'est le premier critère ou critère d'entrée de la méthode du simplexe. Si tous les coefficients sont positifs ou nuls, alors la solution est optimale.

Le deuxième critère ou critère de sortie consiste à calculer les rapports entre les coefficients du deuxième membre et ceux correspondants de la variable entrante, x_q, b_i/a_{iq}; le plus petit rapport, b_p/a_{pq}, indique la variable qui doit sortir de la base, x_p. On procède alors à l'opération de pivotage qui consiste à intervertir x_p et x_q ; ceci amène des modifications sur tout le tableau ; un a_{ij} quelconque devient : $a^*_{ij} = a_{ij} - (a_{pj}) \times (a_{iq}/a_{pq})$ et tous les a_{pj} deviennent :

$$a^*_{pj} = a_{pj}/a_{pq}.$$

Après l'opération de pivotage, on commence de nouveau le processus d'itérations jusqu'à l'obtention d'une solution optimale. Il arrive quelque fois que la solution obtenue ne soit pas réalisable ; cette situation se présente quand tous les c_j sont positifs ou nuls (solution optimale), où il existe un $b_i < 0$, au moins (solution impossible)

Il faut noté qu'il est également possible d'utiliser une autre méthode pour résoudre un programme ayant des variables artificielles : c'est la méthode du "grand" M "the big M méthode". On l'appelle également méthode de Charnes ou méthode des pénalités qui consiste à infliger une pénalité M aux coefficients des variables artificielles dans la fonction économique.

- Pour un problème de maximisation, on spécifie un coefficient très faible $-M$, $M > 0$.
- Pour un problème de minimisation, on spécifie un coefficient très élevé $+M$, $M > 0$

Nous rappelons ici également un aspect très important de la programmation linéaire : le concept de dualité. En effet à tout problème de programmation linéaire est associé un autre problème appelé le problème dual. La dualité a une importance très significative concernant les relations mathématiques qui existent entre les deux problèmes ; de plus, le problème dual a une interprétation économique très utile face à certains problèmes d'expansion.

Considérons le programme linéaire suivant :

maximiser $Z = C_1x_1 + C_2x_2 + \dots + C_nx_n$

avec les contraintes

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2$$

$$\vdots \qquad \vdots \qquad \vdots \qquad \vdots$$

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m$$

$$x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0$$

Appelons ce problème, primal.

Le problème dual sera :

minimiser $W = b_1 y_1 + b_2 y_2 + \dots + b_m y_m$

avec les contraintes

$$a_{11}y_1 + a_{21}y_2 + \dots + a_{m1}y_m \geq C_1$$

$$a_{12}y_1 + a_{22}y_2 + \dots + a_{m2}y_m \geq C_2$$

$$\vdots \qquad \vdots \qquad \vdots \qquad \vdots$$

$$a_{1n}y_1 + a_{2n}y_2 + \dots + a_{mn}y_m \geq C_n$$

$$y_1, y_2, \dots y_m \geq 0.$$

les variables x_j sont les variables primales et les variables y_i sont les variables duales.

En écriture matricielle, les deux problèmes sont :

Primal :

$$\max Z = CX, \quad AX \leq b, \quad X \geq 0$$

Dual :

$\min W = Yb$, $YA \geq C$, $Y \geq 0$, et la procédure d'optimisation est l'inverse de celle du simplexe.

4.1.4. Analyse de sensibilité.

Tout problème d'optimisation doit être accompagné d'une analyse post-optimale ou sensibilité des résultats. Il est certain que la direction de l'entreprise aimerait obtenir des réponses concrètes quant à la sensibilité de la solution optimale face à certains changements qui pourraient se produire sur les coefficients de la fonction économique, sur les ressources disponibles ou encore examiner la possibilité d'ajouter à la production un nouveau produit.

Cette analyse permettra de présenter différentes solutions optimales pour différentes valeurs possibles des paramètres du modèle et d'obtenir, à la fois, une évaluation de la précision des paramètres

4.1.4 a Modification des coefficients C_j

Deux questions peuvent se poser concernant un changement dans la valeur d'un coefficient de la fonction économique :

1- Est-ce que la solution optimale demeure la même si un coefficient économique d'une variable hors base passe de C_j à C_j' ?

2- Quelle en sera l'influence si cette variable est dans la base ?

4.1.4.b Modification du vecteur ressource.

Certaines ressources qui avaient une imputation de valeurs à un niveau positif peuvent voir cette imputation réduite à zéro si une augmentation ou diminution de ces ressources se fait au-delà de certaines valeurs.

Une variation de ressources affecte les valeurs des variables qui sont dans la base optimale et la valeur de la fonction économique puisque $X_B = B^{-1}b$ et $Z = C_B X_B$. La modification du vecteur ressource implique que l'on doit se préoccuper non pas de l'optimalité de la solution mais plutôt de s'assurer que la nouvelle solution soit réalisable. Si une solution est non réalisable, la méthode duale du simplexe peut être utilisée pour la résoudre, c'est à dire la rendre réalisable.

4.2 Programme linéaire à résoudre.

Soit a_{ij} le poids du type de wagon (en charge),

x_{ij} le nombre de wagons qui transportent la marchandise j et qui sont tirés par la locomotive i.

($i = 1, 2, \ldots 22$, puisqu'on a enlevé 2 locomotives qui sont affectées à Lam-Lam) ; $j = 1, 2, \ldots, 15$.

donc on a :

$$\min Z = \sum_{i=1}^{22} d_i P_i y_i - \sum_{i=1}^{22} \sum_{j=1}^{15} a_{ij} x_{ij}$$

avec

$$\sum_{i=1}^{22} d_i P_i y_i = 398{,}25\,(y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6) + 297\,(y_7 + y_8 + y_9 + y_{10}) + 675\,(y_{11} + y_{12} + y_{13} + y_{14} + y_{15} + y_{16} + y_{17} + y_{18} + y_{19}) + 1007{,}67\,(y_{20} + y_{21} + y_{22})$$

N.B. Il serait trop fastidieux de vouloir écrire tous les termes composant $\sum_{i=1}^{22}\sum_{j=1}^{15} a_{ij} x_{ij}$ quand on sait qu'on a un total de $15 \times 22 = 330$ variables à écrire !!! L'essentiel est qu'en observant les contraintes, on peut voir de quelles variables il s'agit.

contraintes :

$$52x_1^1 + 47x_1^2 + 47x_1^3 + 47x_1^4 + 47x_1^5 + 47x_1^6 + 45x_1^7 + 43{,}5x_1^8 + 43{,}5x_1^9 + 52x_1^{10} + 47x_1^{11} + 47x_1^{12} + 52x_1^{13} + 52x_1^{14} + 47x_1^{15} \leq 675$$

$$52x_2^1 + 47x_2^2 + 47x_2^3 + 47x_2^4 + 47x_2^5 + 47x_2^6 + 45x_2^7 + 43{,}5x_2^8 + 43{,}5x_2^9 + 52x_2^{10} + 47x_2^{11} + 47x_2^{12} + 52x_2^{13} + 52x_2^{14} + 47x_2^{15} \leq 675$$

$$52x_3^1 + 47x_3^2 + 47x_3^3 + \cdots + 47x_3^{15} \leq 675$$

$$\vdots \qquad\qquad \vdots$$

$$52x_6^1 + 47x_6^2 + 47x_6^3 + \cdots + 47x_6^{15} \leq 675$$

$$52x_7^1 + 47x_7^2 + 47x_7^3 + 47x_7^4 + 47x_7^5 + 47x_7^6 + 45x_7^7 + 43{,}5x_7^8 + 43{,}5x_7^9 + 52x_7^{10} + 47x_7^{11} + 47x_7^{12} + 52x_7^{13} + 52x_7^{14} + 47x_7^{15} \leq 707{,}14$$

$$52x_8^1 + 47x_8^2 + 47x_8^3 + \cdots + 47x_8^{15} \leq 707{,}14$$

$$52x_9^1 + 47x_9^2 + 47x_9^3 + \dots + 47x_9^{15} \leq 707{,}14$$

$$52x_{10}^1 + 47x_{10}^2 + 47x_{10}^3 + \dots + 47x_{10}^{15} \leq 707{,}14$$

$$52x_{11}^1 + 47x_{11}^2 + 47x_{11}^3 + 47x_{11}^4 + 47x_{11}^5 + 47x_{11}^6 + 45x_{11}^7 + 43{,}5x_{11}^8 + 43{,}5x_{11}^9 + 52x_{11}^{10} + 47x_{11}^{11} + 47x_{11}^{12} + 52x_{11}^{13} + 52x_{11}^{14} + 47x_{11}^{15} \leq 964{,}28$$

$$52x_{12}^1 + 47x_{12}^2 + 47x_{12}^3 + \dots + 47x_{12}^{15} \leq 964{,}28$$

$$\vdots \qquad\qquad\qquad \vdots$$

$$52x_{19}^1 + 47x_{19}^2 + 47x_{19}^3 + \dots + 47x_{19}^{15} \leq 964{,}28$$

$$52x_{20}^1 + 47x_{20}^2 + 47x_{20}^3 + 47x_{20}^4 + 47x_{20}^5 + 47x_{20}^6 + 45x_{20}^7 + 43{,}5x_{20}^8 + 43{,}5x_{20}^9 + 52x_{20}^{10} + 47x_{20}^{11} + 47x_{20}^{12} + 52x_{20}^{13} + 52x_{20}^{14} + 47x_{20}^{15} \leq 1060{,}71$$

$$52x_{21}^1 + 47x_{21}^2 + 47x_{21}^3 + \dots + 47x_{21}^{15} \leq 1060{,}71$$

$$52x_{22}^1 + 47x_{22}^2 + 47x_{22}^3 + \dots + 47x_{22}^{15} \leq 1060{,}71$$

$$53{,}77(x_1^1 + x_2^1 + \dots + x_{22}^1 + x_1^{10} + x_2^{10} + \dots + x_{22}^{10} + x_1^{13} + x_2^{13} + \dots + x_{22}^{13} + x_1^{14} + x_2^{14} + \dots + x_{22}^{14}) + 54{,}59(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_{22}^2 + x_1^3 + x_2^3 + \dots + x_{22}^3 + x_1^4 + x_2^4 + \dots + x_{22}^4 + x_1^5 + x_2^5 + \dots + x_{22}^5 + x_1^6 + x_2^6 + \dots + x_{22}^6 + x_1^{11} + x_2^{11} + \dots + x_{22}^{11} + x_1^{12} + x_2^{12} + \dots + x_{22}^{12} + x_1^{15} + x_2^{15} + \dots + x_{22}^{15}) + 34{,}15(x_1^7 + x_2^7 + \dots + x_{22}^7) + 34{,}45(x_1^8 + x_2^8 + \dots + x_{22}^8 + x_1^9 + x_2^9 + \dots + x_{22}^9) \geq 51699$$

$$x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + \dots + x_{22}^2 + x_1^3 + x_2^3 + \dots + x_{22}^3 + x_1^4 + x_2^4 + \dots + x_{22}^4$$
$$+ x_1^5 + x_2^5 + \dots + x_{22}^5 + x_1^{11} + x_2^{11} + \dots + x_{22}^{11} + x_1^{12} + x_2^{12} + \dots + x_{22}^{12}$$
$$+ x_1^{15} + x_2^{15} + \dots + x_{22}^{15} \leq 429$$

$$x_1^8 + x_2^8 + x_3^8 + \dots + x_{22}^8 + x_1^9 + x_2^9 + \dots + x_{22}^9 \leq 68$$

$$x_1^7 + x_2^7 + \dots + x_{22}^7 \leq 91$$

$$x_1^{13} + x_2^{13} + x_3^{13} + \dots + x_{22}^{13} \leq 60$$

$$x_1^1 + x_2^1 + \dots + x_{22}^1 + x_1^{10} + x_2^{10} + \dots + x_{22}^{10} + x_1^{14} + x_2^{14} + \dots + x_{22}^{14}$$
$$\leq 126$$

$$398{,}25\,(y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6) + 297\,(y_7 + y_8 + y_9 + y_{10})$$
$$+ 675\,(y_{11} + y_{12} + y_{13} + y_{14} + y_{15} + y_{16} + y_{17} + y_{18} + y_{19})$$
$$+ 1007{,}67\,(y_{20} + y_{21} + y_{22}) \geq 51699$$

$$x_{ij} \geq 0 \qquad i = 1, 2, \dots, 22$$
$$j = 1, 2, \dots, 15$$

$$0 < y_i \leq 6$$

N.B. Nous avons pris une disponibilité moyenne de 0,66 pour l'ensemble des locomotives

51699 : poids total de tous les wagons en charge utilisés durant le 3e mois de l'exercice (i.e septembre 1984)

Comme on peut le constater, le programme linéaire ainsi écrit comporte plus de 350 variables; il est donc clair que les ordinateurs disponibles à l'E.P.T ne peuvent pas résoudre un tel programme linéaire. Il serait donc intéressant de voir au niveau de la régie si la résolution ne serait pas possible.

Cependant nous allons aborder le problème d'une autre manière, c'est-à-dire trouver une autre modélisation qui consisterait à faire les suppositions suivantes:

- On considère que toutes les locomotives d'un même type (Ex BB 1100) auront le même nombre de wagons à remorquer avec la même combinaison; ce qui revient donc à considérer par type de locomotives.
- Au lieu de considérer par marchandise, nous prendrons par type de wagons.

Donc toutes les locomotives et tous les wagons de même type seront régis par les mêmes lois.

Ces hypothèses nous amènent donc à un total de 5 types de wagons et 4 types de locomotives. Ceci nous a donné un total de moins de 30 variables, programme que peut bien résoudre l'ordinateur de l'E.P.T.

La différence entre ces deux considérations est que la première donne le tonnage pour chaque marchandise, tandis que la deuxième ne donne que le nombre de wagons d'un type donné sans préciser le tonnage des produits. Nous nous contenterons cependant de la résolution de cette dernière.

Soit donc :

x_1^1 : nombre de wagons de type L que doit remorquer la locomotive BB1100.

x_1^2 : nbre de wagons de type T que doit remorquer la BB1100

x_1^3 " " " K+KV " " " " "

x_1^4 " " " LH " " " " "

x_1^5 " " " H " " " " "

ainsi on a les x_{ij} avec

i : 1 ⟶ L

2 ⟶ T

3 ⟶ K+KV

4 ⟶ LH

5 ⟶ H

j : 1 ⟶ BB1100

2 ⟶ BB1200

3 ⟶ BB1600

4 ⟶ CC1700

Ce qui nous donne le programme linéaire suivant avec les mêmes limitations que précédemment au niveau des contraintes.

$$z = 2389{,}5\, y_1 + 1187{,}99\, y_2 + 6074{,}9\, y_3 + 3023{,}02\, y_4 -$$

$$\left(184{,}8\,x_{11} + 183{,}2\,x_{21} + 292{,}83\,x_{31} + 715{,}15\,x_{41} + 288{,}44\,x_{51} \right.$$
$$+ 87{,}69\,x_{12} + 86{,}94\,x_{22} + 138{,}97\,x_{32} + 339{,}39\,x_{42}$$
$$+ 136{,}88\,x_{52} + 328{,}86\,x_{13} + 326{,}02\,x_{23} + 521{,}13\,x_{33}$$
$$+ 1272{,}72\,x_{43} + 513{,}32\,x_{53} + 148{,}77\,x_{14} + 147{,}49\,x_{24}$$
$$\left. + 235{,}75\,x_{34} + 575{,}76\,x_{44} + 232{,}22\,x_{54} \right)$$

Sous contraintes

$$6x_{11} + 4x_{12} + 9x_{13} + 3x_{14} \leq 54$$
$$6x_{21} + 4x_{22} + 9x_{23} + 3x_{24} \leq 72$$
$$6x_{31} + 4x_{32} + 9x_{33} + 3x_{34} \leq 364$$
$$6x_{41} + 4x_{42} + 9x_{43} + 3x_{44} \leq 54$$
$$6x_{51} + 4x_{52} + 9x_{53} + 3x_{54} \leq 107$$
$$43{,}5\,x_{11} + 45\,x_{21} + 47\,x_{31} + 52\,x_{41} + 52\,x_{51} \leq 675$$
$$43{,}5\,x_{12} + 45\,x_{22} + 47\,x_{32} + 52\,x_{42} + 52\,x_{52} \leq 707{,}14$$
$$43{,}5\,x_{13} + 45\,x_{23} + 47\,x_{33} + 52\,x_{43} + 52\,x_{53} \leq 964{,}28$$
$$43{,}5\,x_{14} + 45\,x_{24} + 47\,x_{34} + 52\,x_{44} + 52\,x_{54} \leq 1060{,}71$$
$$184{,}8\,x_{11} + 183{,}2\,x_{21} + 292{,}83\,x_{31} + 715{,}15\,x_{41} + 288{,}44\,x_{51}$$
$$+ 87{,}69\,x_{12} + 86{,}94\,x_{22} + 138{,}97\,x_{32} + 339{,}39\,x_{42} + 136{,}88\,x_{52}$$
$$+ 328{,}86\,x_{13} + 326{,}02\,x_{23} + 521{,}13\,x_{33} + 1272{,}72\,x_{43} +$$
$$513{,}32\,x_{53} + 148{,}77\,x_{14} + 147{,}49\,x_{24} + 235{,}75\,x_{34}$$
$$+ 575{,}76\,x_{44} + 232{,}22\,x_{54} \geq A$$
$$2389{,}5\,y_1 + 1187{,}99\,y_2 + 6074{,}9\,y_3 + 3023{,}02\,y_4 \geq A$$
$$127{,}44\,x_{11} + 60{,}48\,x_{12} + 226{,}8\,x_{13} + 102{,}6\,x_{14} + 122{,}13\,x_{21}$$
$$+ 57{,}96\,x_{22} + 217{,}35\,x_{23} + 98{,}32\,x_{24} + 186{,}91\,x_{31} + 88{,}70\,x_{32} +$$

$$332{,}64\,x_{33} + 150{,}48\,x_{34} + 481{,}35\,x_{41} + 228{,}44\,x_{42}$$
$$+\ 856{,}64\,x_{43} + 387{,}53\,x_{44} + 194{,}15\,x_{51} + 92{,}14\,x_{52}$$
$$+\ 345{,}52\,x_{53} + 156{,}31\,x_{54} \geqq T$$

$$1 \leq y_i \leq 15 \qquad i = 1, 2, \ldots 4$$

$$x_{ij} \geq 0$$

<u>N.B</u> 1) 54 = nombre de wagons x disponibilité : 68 x 0,80

72 = " " " " = 91 x 0,80

364 = " " " " = 429 x 0,85

54 = " " " " = 60 x 0,90

107 = " " " " = 126 x 0,85

$\Big\}$ disponibilité moyenne par type de wagon

2) A : poids total <u>à déplacer</u> durant un mois donné par toutes les locomotives disponibles au cours de ce mois.

T : tonnage de toutes les marchandises à transporter durant ce mois.

$y_i \leq 15$: nous avons considéré le fait que y_i dépend du taux de rotation et du taux en opération périodique de la locomotive i : $y_i = TR_i \times TOP_i$. et en prenant TR_i et TOP_i maximum possibles, on ne peut pas dépasser une certaine valeur pour y_i soit $TR_i = 30$/mois et $TOP = 50\%$, $y_i = 15$ que nous avons supposé étant la valeur maximum.

chap V ANALYSE DES RÉSULTATS

Pour suivre le plan d'étude annoncé dans le sommaire, nous avons conservé ce chapitre "analyse des résultats". En effet il n'y a pas de résultats obtenus dans cette phase de l'étude. Nous avons fait notre modélisation du problème en fonction des prévisions des marchandises que la régie doit transporter en tonnage, durant une période donnée. Donc non seulement nous n'avions pas le temps de trouver des résultats (faute de logiciels adéquats, et du fait que l'étude était limitée par le temps) mais également ces résultats allaient varier en fonction de la prévision.

Nous souhaitons que la régie se procure de logiciels, l'ordinateur étant déjà disponible, afin de pouvoir se servir d'un tel programme linéaire pour faire le "dispatching" optimal de ses ressources.

chap VI

RECOMMANDATIONS

A la suite de l'étude que nous avons mené, nous nous proposons de dégager quelques recommadations qui peuvent se situer à deux niveaux :

5.1 Au niveau de la collecte des données :

Le problème principal qui se pose au niveau de la Régie, pour une étude donnée, c'est l'obtention des renseignements nécessaires : données exactement utiles pour la réussite de l'étude. Aussi suggérons-nous fortement la création d'une banque de données, et n'entreront dans cette banque que les données jugées fiables !

C'est une voie qui permettra aussi de gagner beaucoup de temps dans la collecte des données.

5.2 Au niveau du service d'entretien et de maintenance.

Si nous nous référons aux taux de disponibilité des wagons et des locomotives qui du reste, demeurent très faibles (en moyenne 0,70), nous pouvons dire, et d'une manière très objective, qu'il y a des améliorations à ~~apporter~~ à ce niveau.

Un faible taux de disponibilité d'un wagon ou d'une locomotive veut dire que ce wagon ou cette locomotive passe la plus grande partie de son temps à la réparation. Il faut donc accélérer le rythme des travaux au niveau de l'entretien.

Cependant il y a un autre facteur que nous n'avons pas oublié et qui peut affecter d'une manière directe le service de l'entretien : c'est le problème de stocks. Une mauvaise politique de gestion des stocks paralyse les travaux d'entretien du matériel concerné et par conséquent les services que devrait rendre ce dernier : tout engin dont les pièces de rechange ne sont pas disponibles au niveau des stocks sera hors service, en cas de panne ; ne serait-ce que pour longtemps.

Donc nous pouvons dire qu'une bonne politique de gestion des stocks et un rythme accru des travaux d'entretien contribueront à l'amélioration du taux de disponibilité des wagons et locomotives.

Nous souhaitons vivement qu'une telle politique soit adoptée afin qu'il y ait suffisamment de wagons et d'engins disponibles ; ce qui pourra permettre l'utilisation d'un nombre maximal de wagons, suivant la capacité d'une locomotive donnée. Ainsi aura-t-on minimiser les pertes de puissance.

CH VII Conclusion

L'étude que nous venons de mener nous a permis de faire une analyse globale au sein de la R.C.F.S. Bien qu'elle ne considère qu'une fraction du trafic, c'est-à-dire le trafic marchandise uniquement, nous pouvons en tirer des renseignements divers parmi lésquels le faible taux de disponibilité des wagons et locomotives, le faible taux en opération périodique des engins etc.
Ces facteurs affectent directement le trafic et peuvent contribuer à sa nette diminution.
L'analyse que nous avons faite au cours de notre étude pourra être un élément de support pour une eventuelle affectation optimale des équipements. Bien qu'elle soit basée sur des données peu fiables, nous avons jugé qu'elle a atteint son objectif qui était de trouver un modèle d'optimisation de l'utilisation des ressources disponibles au niveau de la régie des chemins de fer du Sénégal. Le problème qui se pose maintenant, et que nous laisserons entre les mains des agents de la R.C.F.S., est de trouver des données exactes pour pouvoir se servir du modèle. La création d'une banque de données, comme nous l'avons suggéré pourrait être un outil puissant pour surmonter ce problème.

Chap — VIII

ANNEXES.

TAUX DE DISPONIBILITÉ DES ENGINS (Locomotives)

(EXERCICE 84-85)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Moy. par série
BB1100	47%	58%	59%	54%	62%	61%	59%	58%	71%	69%	82%	77%	63%
BB1200	51%	55%	42%	37%	36%	31%	41%	38,5%	34%	39%	22,5%	26%	38%
BB1600	58%	66%	70%	70%	81%	71%	69%	69%	75%	73%	73,5%	79%	71%
CC 1700	99%	97%	95%	100%	97%	100%	97%	93%	97%	97%	100%	93%	97%
Moyenne Par mois	63,7%	69%	66,5%	65,2%	69%	65%	81,3%	64%	69%	69%	69%	68,7%	67%

Poids à vide des différents wagons:

wagon de type L : tare : 13,5 t

wagon de type T : tare : 15 t

wagon de type K+KV : tare : 17t

Wagon de type LH : tare 17t

wagon de type H : tare : 17t

Différentes formules pour le calcul des charges remarquables et démarrable.

Puissance $P = \frac{Ec.V}{270}$

V (km/hr), Ec (kf)

Pour qu'il y ait traction il faut que:

$$Ec \geq T \times (RA + i + \frac{500}{R})$$

T : tonnage du train (en tonnes)

RA : résistance à l'avancement dans le plan.

i : rampe (mm/m) ; R : le rayon de la courbure

de ligne empruntée par le train (en m);
en général, on prend $R = \infty$.
Td : charge démarrable $= \frac{Ec}{RA + i}$ (de 0 à x km avec une accélération constante.
T_R : charge remorquable $= \frac{Ec}{i + 4,4}$.

La résistance à l'avancement (RA) nous est donnée par différentes formules parmi lesquelles on a :
- Formule d'ALSTHOM : $RA = 2,2 + \frac{V^2}{2000}$ (train en marche)
c'est la formule que nous avons utilisé dans notre calcul.
- Formule générale de Davis : pour les trains très lourds (Ex train de minerai) et wagons de fortes charges à l'essieu :

$$RA = 0,65 + \frac{13,5}{p} + 0,009V + 0,0045\frac{SV^2}{P}$$

p : poids par essieu de wagon.

P : poids total du train

S : section du train (m^2 = Largeur d'1 wagon x sa hauteur)
V : vitesse du convoi.
- Formule SNCF : SOFERAIL

$$RA = 1 + 0,01V + 0,00019V^2$$ pour essieu à 17t

Il faut noter que toutes ces formules sont empiriques exceptée celle de la puissance qui est une formule mécanique.

<u>Calcul du taux de rotation des wagons</u>.

D'habitude le taux de rotation des wagons se donne en jours (Ex wagons de type K+KV : taux de rotation ≃ 17 jours) donc par mois, il faut chercher le nombre de fois que ces wagons ont fait le trajet aller - retour. Nous avons fait $\frac{30}{17} = 1{,}76$ fois. Ainsi le taux de rotation mensuelle des K+KV = 1,76 ; nous avons procédé ainsi pour tous les types de wagons.

Les formules servant au calcul de la RA utilisée dans nos calculs nous ont été données par la D.E.G. de la R.C.F.S.

CH IX BIBLIOGRAPHIE

Alain MARTEL
" Technique et application de la recherche opérationnelle"
Gaëtan Morin

. Régie des Chemins de Fer du Sénégal (R.C.F.S.)
" Plan de relance de l'exploitation du chemin de Fer" 1984 - 1986
Dossier de référence

R.C.F.S.
" Programme d'action . Exercice 1984 - 1985"

HARVEY M. WAGNER
" Principles of opérations research"
Second Edition
Prentice - Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey

GÉRALD BAILLARGEON
" Programmation linéaire"
Université du Quebec à Trois - Rivières, les Editions SMG.

Jean Claude WARMOES (Professeur à l'E.P.T.)

"Notes de cours : MATH 4.11"

1984-1985