Approvisionnement en charbon d'importation des centrales thermiques de la Basse-Seine

Jean-Pierre Dupuy, Michel Horps

▶ **To cite this version:**

Jean-Pierre Dupuy, Michel Horps. Approvisionnement en charbon d'importation des centrales thermiques de la Basse-Seine. Sciences de l'ingénieur [physics]. 1966. hal-01910053

HAL Id: hal-01910053

https://minesparis-psl.hal.science/hal-01910053

Submitted on 31 Oct 2018

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.

L' APPROVISIONNEMENT

EN CHARBON D'IMPORTATION

DES CENTRALES THERMIQUES DE LA BASSE-SEINE

[12]

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES
Bibliothèque
N°
IE 1

JUIN 1966

J.P. DUPUY
M. HORPS

LECTURE DU RAPPORT

Il suffit de lire les chapitres I et II pour avoir une idée suffisante de la nature du problème posé, de la démarche suivie pour le résoudre, et des résultats obtenus.

Les justifications sont données en Annexes : le chapitre IV décrit le modèle théorique utilisé et les chapitres III, V, VI fournissent des précisions sur les données qui ont été retenues.

Un trait vertical dans la marge indique que l'on peut, dans une première lecture, ignorer les paragraphes correspondants.

P L A N

CHAPITRE I : Présentation du problème

A - Le problème posé

B - Formulation du problème

CHAPITRE II : Résultats et conclusions

A - Résultats

B - Conclusions

A N N E X E S

CHAPITRE III : Consommations et importations de charbon

A - Consommations de charbon dans les centrales

B - Importations de charbon

CHAPITRE IV : Le modèle

A - Acheminement optimal du charbon avec les installations existantes

B - Développement des installations - Investissements optimaux

C - Régimes permanents à horizon limité

D - Complexité du problème étudié

CHAPITRE V : Application au problème

A - Réseau de transport et équations du problème

B - Analyse détaillée

C - Choix des paramètres

CHAPITRE VI : Coûts

A - Généralités

B - Analyse détaillée

C - Etudes particulières

CHAPITRE VII : Obtention des résultats

A - Généralités

B - Exemples de dépouillement de résultats

C - Analyse sommaire des résultats.

B - Formulation du problème

1 - Hypothèses de travail

a) Elimination des incertitudes par introduction de paramètres adéquats

b) Les paramètres de consommation de charbon

c) Les paramètres d'importation de charbon

d) Un résumé des facteurs extérieurs du problème

2 - L'optimum recherché

a) Objectif de l'étude

b) Le critère du choix : optimum pour la collectivité

c) Le modèle utilisé

3 - Utilité de l'étude

a) Evaluation des conséquences d'une politique

b) Recensement des politiques justifiant un investissement.

C H A P I T R E I

PRESENTATION DU PROBLEME

A - LE PROBLEME POSE.

1 - La situation à la fin de l'année I965.

a) Les pays fournisseurs de charbon vapeur et les contrats.

Les pays fournissuers envisageables actuellement, (en raison du prix rendu) sont les U.S.A. d'une part, la Pologne et l'U.R.S.S. d'autre part.

Les contrats conclus portent sur les tonnages suivants : pour les U.S.A. 0,7 à I MT, par année, de I967 à I969. Pour l'U.R.S.S., 0,I MT an uellement de I967 à I969. (voir les détails des contrats et les options en III B 1).

b) Les transports maritimes.

Un minéralier de 85.000 T sera affecté dès Janvier I967 au courant américain, et rendra caducs les minéraliers de I8.000 T antérieurement utilisés.

Ce navire devra évidemment être déchargé au Havre.

Les navires de I8.000 T seront reportés sur les courants polonais et russe. Les tirants d'eau des ports de chargement limiteront jusqu'en I970 le tonnage embarqué.

.../...

à I7,000 T. Ces navires peuvent remonter la Seine jusqu'à Rouen, sauf lorsque les marées sont particulièrement faibles (cf V A 1).

c) Les installations de manutentions portuaires.

Elles se composent :

- Au Havre, d'un poste minéralier moderne (I96I) de capacité importante, dépendant du Port Autonome du Havre (cf, V A 2),
- à Rouen, des installations de la Compagnie Rouennaise de Déchargement (C.R.D.), plus anciennes (I956) et nettement moins puissantes (cf, V A 3).

d) les modes de transport intérieurs.

A partir des ports du Havre et de Rouen, on peut utiliser :

- soit la S.N.C.F., en faisant le transport par trains complets (cf, V A 4)
- soit la voie d'eau, en utilisant des convois poussés (cf, V A 5).

e) Les centrales thermiques concernées.

Il est apparu que le charbon d'importation entrant en France par le Havre ou par Rouen, ne remonterait jamais plus haut que la Région Parisienne ; ceci a permis de limiter l'étude aux centrales suivantes :

- Le Havre, en cours de construction
- Porcheville I, existante
- Champagne-sur-Oise, existante
- Vitry, en cours de construction

(cf, V A 6).

2 - Les incertitudes

a) Les besoins d'électricité de la France.

Les prévisions de consommation d'électricité (incluant les pertes) ne sont pas rigoureusement certaines, puisque, pour I970 par exemple, elles s'étagent entre I47 TWh et I5I TWh, ce qui correspond à une différence d'environ I,5 MTec.

.../...

b) La production hydraulique.

Si l'évolution de la production hydraulique moyenne est bien connue, il n'en subsiste pas moins un aléa climatique d'hydraulicité, qui peut conduire à une sous-consommation ou une sur-consommation annuelles de I,5 MTec.

c) la production nucléaire.

Les prévisions de l'E.D.F. sur la production nucléaire se présentent sous la forme de fourchettes très larges, au moins après I975 : I0 TWh en I970, de 24 à 27 TWh en I975, de 56 à 97 TWh en I980.

d) l'écoulement de la production française de charbon.

La baisse de la production des Houillères prévue par le Vème Plan est "susceptible d'ajustements au cours des années futures" : il n'est pas certain que cette production baisse effectivement de 5 MT en 5 ans.

Ceci rejaillit sur E.D.F. par l'intermédiaire d'un protocole signé récemment avec Charbonnages de France et Covesar, aux termes duquel E.D.F. s'est engagée à enlever jusqu'à I2 MT en I970, et jusqu'à I5 MT en I975.

Les tonnages à enlever sont fixés pour les 5 années suivantes par les producteurs, et susceptibles de révision (moyennant certaines règles) année par année. Une baisse moins rapide de la production ou des difficultés d'écoulement se traduiront donc pour E.D.F. par une obligation d'enlever le tonnage maximum autorisé.

e) Détermination du "complément" et répartition entre hydrocarbure et charbon importé.

Les aléas climatiques étant provisoirement laissés de côté, il convient de compléter la production jusqu'à obtenir le chiffre retenu de consommation + pertes, pour I970 par exemple.

Dans ce complément, divers postes sont connus avec une quasi-certitude : c'est la production thermique des tiers, la production thermique "prioritaire" d'E.D.F. (lignite, gaz naturel, gaz de haut-fourneau) et les importations nettes. Ces postes, joints à la production hydraulique, constituent

.../...

la"production nationale de base".

Si l'on envisage différentes possibilités de tonnage à enlever conformément au protocole E.D.F. - Charbonnages, et ceci en moyenne conjoncture (I47 TWh) et en haute conjoncture (I5I TWh), on obtient dans chaque cas la production complémentaire à répartir entre fuel-oil et charbon importé.

Dans chaque cas, E.D.F. aura alors le choix entre diverses politiques de répartition, selon qu'elle convertit ou non certaines centrales existantes au fuel-oil et selon qu'elle fait ou non marcher au fuel-oil les centrales mixtes du Havre et de Vitry. Le tableau suivant donne, de manière approchée, les fourchettes correspondantes pour le charbon importé.

I970	Cons. + Pertes (TWh)	Production Nat. de base (TWh)	Nucléaire (TWh)	Charbon Protocol MTec	TWh	Prod. Complém. (TWh)	Charbon importé MTec Min.	Max.
Moyenne Conjoncture	I47	79,3	I0,4	I2,0	32,6	24,7	0	2,3
				I0,4	28,0	29,3	0	4,0
				9,2	24,8	32,5	I,2	5,6
Haute Conjoncture	I5I	79,3	I0,4	I2,0	32,6	28,7	0	3,8
				I0,4	28,0	33,3	I,5	5,5
				9,2	24,8	36,5	2,7	7,I

TABLEAU I A 2e

La politique suivie par E.D.F. peut dépendre, a priori, de divers facteurs :

- Le degré de vraisemblance attaché à chacune des 6 éventualités du tableau.
- Les prix comparés du Fuel-Oil (ou du gaz naturel) et du charbon importé.
- Le fait que, pour le charbon importé, de bas prix rendus

.../...

ne peuvent être obtenus que moyennant des contrats de longue durée, à la fois pour l'achat et pour le transport maritime.

D'ores et déjà, en raison des contrats passés, certaines politiques ont été éliminées.

Enfin, les aléas climatiques donneront lieu, en cas de sur-consommation, à des options dans le cadre des contrats d'importation de charbon (ou de fuel).

f) La répartition des achats de charbon importé.

A l'incertitude sur le volume global de l'importation se surajoute une nouvelle inconnue : la répartition des achats entre l'EST et les U.S.A. Il est évident qu'elle résulte en partie d'accords commerciaux et d'options à caractère politique, qui sont difficilement prévisibles.

3 - Les choix à effectuer

a) La concurrence entre transport fluvial et transport ferroviaire.

On voudrait savoir si, du point de vue de l'intérêt général, il y a avantage à utiliser la voie d'eau ou le chemin de fer comme mode d'acheminement du charbon importé, depuis les ports français jusqu'aux Centrales.

b) Les investissements de manutention et de transport.

Corrélativement, on voudrait savoir si, du point de vue de l'intérêt général, il y a avantage à investir :

- en installations de manutention au port du Havre
- en installations de manutention au port de Rouen
- en barges et en pousseurs
- en installations de déchargement dans les Centrales.

Il serait intéressant de dégager la nature et la taille des investissements souhaitables, ainsi que la date souhaitable de leur mise en service.

../....

B - FORMULATION DU PROBLEME

La démarche suivie pour formuler le problème a consisté essentiellement à en résumer les facteurs extérieurs à l'aide de paramètres, de manière à pouvoir le traiter comme un problème de transport.

1 - Hypothèses de travail.

a) Elimination des incertitudes par introduction de paramètres adéquats.

Les descriptions du paragr. I A 2 montrent que la plupart des incertitudes rencontrées ont une influence sur un terme de bouclage qui est le volume global de charbon importé. A cela s'ajoute l'incertitude sur l'origine de ce charbon (cf I A 2 f).

On peut remarquer sur le tableau I A 2 e, établi pour 1970, que des circonstances diverses, touchant aussi bien la conjoncture que les facilités d'écoulement du charbon français, peuvent se traduire pour E.D.F. par des politiques identiques d'importation charbonnière. A fortiori pour la période ultérieure, avec l'introduction de la marge de manoeuvre apportée par le secteur nucléaire, E.D.F. disposera d'une souplesse d'action croissante.

Dans ces conditions, il est naturel de considérer comme "variable indépendante" la politique d'importation d'E.D.F., ce qui engendrera un premier ensemble de paramètres (voir par. c) ci-dessous).

Cependant les incertitudes décrites en I A 2 ne sont pas éliminées pour autant. Leur incidence sur le problème étudié réside en ceci : la répartition (optimale) du charbon importé entre les centrales concernées dépend de la consommation totale de charbon (importé ou français) de ces centrales, c'est à dire du choix : marche au charbon ou marche au fuel, effectué pour chacune d'elles. Or, ce choix résulte de la consommation totale de fuel par E.D.F., donc, à volume de charbon importé fixé, du volume de la "production complémentaire" (fuel ou charbon importé), lequel dérive des incertitudes rencontrées. (voir tableau I A 2 e).

../.....

Il convient donc de considérer un deuxième ensemble de paramètres, à savoir la consommation totale annuelle de charbon, pour chacune des centrales concernées.

b) Les paramètres de consommation de charbon.

Pour un grouoe donné d'une centrale, fonctionnant au charbon, la consommation spécifique et la durée annuelle de fonctionnement sont connus de manière assez précise en fonction de l'âge. Si en plus on connaît la date de mise en service, l'évolution complète de la consommation de charbon est connue. (cf III A 1)

Ainsi, il est possible, entre I966 et I980, d'évaluer les consommations des groupes ou centrales suivantes :

Porcheville
Champagne sur Oise
Vitry groupes I et II
Le Havre " I et II (cf III A 2 en annexe)

Un problème ne se pose que pour les derniers groupes de Vitry et du Havre, qui ne seront mis en service qu'après I970.

A priori, il semble nécessaire d'envisager tous les cas possibles, selon que ces groupes supplémentaires marcheront au charbon ou au fuel. Cependant, lorsque seront construits les deux derniers groupes de la centrale de Vitry, il paraîtra sans doute plus prudent de les faire au charbon, pour éviter d'avoir éventuellement à envoyer sur la centrale du Havre des quantités trop importantes de charbon français.

Nous nous bornerons donc à ne considérer que les deux cas suivants :

- Le Havre III et IV au charbon (cf III A 2)
- Le Havre III et IV au fuel

c) Les posamètres d'importation de charbon.

Le premier facteur à considérer est le volume global J de charbon importé annuellement. Pour l'année I970, les limites effectives différent cependant des chiffres que l'on pourrait tirer des tableaux I A 2 e, à savoir :

pour I970 : $0 < J < 7,I$ MTec

../.....

Tout d'abord, la centrale du Havre a été prévue pour être alimentée uniquement par des produits d'importation (charbon et éventuellement fuel) et n'est pas raccordée au réseau S.N.C.F. D'ailleurs, l'éloighement des bassins miniers de cette centrale rendrait peu défendable son alimentation en charbon français. La limite inférieure de J sera donc prise égale à la consommation de charbon du Havre.

Cette limite inférieure variera donc avec les années, et selon que l'on fait marcher au fuel ou au charbon les groupes de la centrale du Havre.

Ensuite, il est peu vraisemblable que du charbon importé puisse alimenter d'autres centrales que les 4 qui ont été retenues : il semble en effet qu'on admettrait difficilement que cette alimentation ne soit pas faite avec du charbon français. Ceci ramène à 4,6 MTec les limites supérieures du Tableau I A 2e qui dépassaient ce chiffre.

Le deuxième facteur est la répartition par origine. Le bas fret sur le courant américain ne peut être obtenu qu'avec un superminéralier amenant environ I MT par an, et à la condition d'assurer le maintien de ce trafic sur une assez longue période - ce qui paraît exclure la possibilité de mettre en service plus de 3 navires. Nous aurons donc les cas :

US = I MT US = 2 MT US = 3 MT

et, pour chacun d'eux, on complétera par du charbon d'origine polonaise ou russe jusqu'à atteindre le volume d'importation J étudié.

d) Un résumé des facteurs extérieurs du problème.

Il est aisé de se convaincre que toute situation concrète déterminée, caractérisée par l'évolution du secteur nucléaire, la politique suivie par les Charbonnages, l'évolution des prix respectifs du fuel et du charbon importé, les échanges commerciaux avec les pays de l'EST, etc.., est résumée - en ce qui concerne le problème étudié - par des valeurs données aux paramètres ci-dessus décrits.

Quelle que soit cette situation, l'acheminement optimal du charbon et les investissements souhaitables ne dépendront que des valeurs prises par ces paramètres.

../.....

2 - L'optimum recherché

a) Objectif de l'étude.

Si l'on considère un "cas"déterminé , un cas étant constitué par la combinaison d'une hypothèse sur la consommation du charbon et d'une hypothèse sur la politique d'importation, on s'efforcera de parvenir à deux types de résultats :

Iº/- L'affectation optimale du charbon d'importation aux quatre centrales considérées, le complément étant constitué par du charbon français.

- Les modes de transport optimaux pour le charbon d'importation.

2º/ Les investissements souhaitables en infrastructures de transport, caractérisés par leur capacité et leur coût, avec une idée de la date souhaitable de mise en service.

b) Le critère du choix : optimum pour la collectivité.

Comment comparer deux politiques d'acheminement, deux politiques d'investissements en infrastructures ?

Nous prendrons comme critère les dépenses actualisées de l'opération "approvisionnement en charbon des centrales" en considérant comme dépenses de la collectivité :

- les investissements en infrastructures spécialement réservées à cet usage.
- les frais fixes[x] des infrastructures réservées à cet usage, existantes ou créées dans la période considérée.
- les coûts d'exploitation des installations de manutention, existantes ou créées.
- Les frais fixes et les coûts d'exploitation des services de transport utilisés.
- la location des infrastructures non réservées à cet usage (sous forme de droits de port par exemple).

Nous appellerons "optimum pour la collectivité" la politique conduisant au minimum de ces dépenses actualisées.

c) Le modèle utilisé.

Le modèle utilisé est pour l'essentiel un réseau de transport. Mais certaines contraintes, dues à la nature

../.....

du problème (proportionnalité de trafics, par exemple) ne rentrent pas dans le formalisme des réseaux de transport.

En outre, l'intérêt de la paramétrisation est évident, puisqu'il s'agit d'explorer un grand nombre de cas (cf, par. I B 1 b et c) et d'années.

Ces deux raisons expliquent que nous ayons eu recours à un programme linéaire paramétrique, malgré la lourdeur mathématique d'un tel outil.

Le modèle est présenté en détail en Annexe (cf. - chap. IV), ainsi que son application au problème (cf ch. V).

3 - Utilité de l'étude

a) Evaluation des conséquences d'une politique.

Pour le centre de décision placé devant différentes politiques possibles de consommation totale de charbon (c'est à dire de marche au charbon ou au fuel) et de contrats d'importation, il sera possible :

- de pouvoir associer à chaque politique l'infrastructure (optimale) de transport à réaliser.
- de connaître, pour chaque politique, le mode d'acheminement optimal du charbon d'importation, donc le coût (optimal) de transport intérieur.
- de mesurer, à ces deux points de vue, l'incidence de changements de pays fournisseurs pour un même volume global d'importation.

b) Recensement des politiques justifiant un investissement.

Si l'on s'intéresse à un investissement particulier (développement d'un poste minéralier, par exemple), il sera possible de recenser, parmi les politiques passées en revue, celles qui justifient cet investissement. Si l'on a une idée des chances de réalisation de ces politiques, on aura du même coup une idée des chances qu'il y a pour que cet investissement soit réellement utile.

C H A P I T R E I I

RESULTATS ET CONCLUSIONS

P L A N

A - RESULTATS : LES MECANISMES DE REPARTITION

1 - Mode d'acheminement

2 - Acheminement du charbon américain

3 - Acheminement du charbon polonais et russe - Investissements.

B - CONCLUSIONS

1 - Limites de validité

a) Limites dues au modèle

b) Limites dues aux données

c) Caractère théorique de l'étude

2 - Conclusions de l'étude

a) Acheminement du charbon d'importation

b) Concurrence eau - S.N.C.F.

c) Investissements souhaitables

3 - Prolongements de l'étude.

Le modèle, une fois mis au point, a été utilisé pour traiter une douzaine de "cas" différents, chaque cas étant caractérisé par une hypothèse d'importation de charbon américain, et de consommation de charbon dans chacune des centrales : nous avons ensuite fait croître le volume de charbon polonais de 0 à 5 MT, en suivant à chaque instant les modifications de l'acheminement optimal qui se produisaient.

L'ensemble des calculs a été effectué par un ordinateur I.B.M. 7094.

De la masse des résultats obtenus, nous avons pu dégager

- des mécanismes généraux de répartition du charbon importé entre les centrales,
- des conclusions valables pour l'ensemble des cas envisagés.

A - RESULTATS : LES MECANISMES DE REPARTITION -

Ce paragraphe ne constitue qu'un résumé sommaire des résultats énoncés au chapitre VII : pour comprendre parfaitement, en effet, la nature des clés de répartition auxquelles nous sommes parvenus, il est nécessaire d'avoir étudié les caractéristiques et le fonctionnement du modèle que nous avons utilisé (chapitre IV et suivants).

Nous pouvons seulement dire ceci : nous avons pu dégager des mécanismes de répartition généraux qui permettent, pour un cas donné, c'est-à-dire pour un ensemble de valeurs d'entrées (quantités importées pour chaque type de charbon) et de sorties (consommation des centrales), de prévoir, sans avoir à traiter ce cas particulier sur machine, quelles seront les caractéristiques essentielles de l'acheminement optimal. On voit l'intérêt de cette clé de répartition, que nous exposons sommairement ci-dessous.

.../...

1. Mode d'acheminement

Sauf si l'on admet que les coûts de la S.N.C.F. sont inférieurs à la moitié des tarifs pratiqués, il faut conclure que l'acheminement par voie d'eau est préférable à l'acheminement par voie ferrée, compte tenu évidemment des investissements nécessaires pour réaliser ce transport fluvial et les manutentions correspondantes, et ceci pour toutes les centrales.

2. Acheminement du charbon américain

Le charbon américain doit être affecté en priorité aux trois centrales de Vitry, Champagne et Porcheville. Corollairement, la centrale du Havre doit être approvisionnée en premier par du charbon polonais et russe.

3. Acheminement du charbon polonais et russe - Investissements

Le mécanisme des priorités est le suivant :

- le charbon polonais et russe doit se diriger d'abord, comme nous venons de le voir, vers la centrale du Havre, jusqu'à une limite qui correspond soit aux besoins de cette centrale, soit à la saturation du port du Havre (voir chapitre VII)
- il approvisionne ensuite les trois autres centrales en passant par le port de Rouen, jusqu'à une limite voisine de 540.000 tonnes,
- il emprunte ensuite le port du Havre, jusqu'à saturation de celui-ci (4.000.000 tonnes),
- il revient ensuite au port de Rouen, jusqu'à saturation de celui-ci (1.350.000 tonnes environ),
- le supplément de charbon polonais ou russe, s'il existe, passe par le port du Havre, que l'on développe d'autant.

Cet ordre des priorités doit cependant être complété et tempéré par des remarques et exceptions que nous exposons au chapitre VII.

.../...

B - CONCLUSIONS -

1. Limites de validité de l'étude

Il est important de ne pas perdre de vue un certain nombre de limites de validité de l'étude, dues au modèle employé lui-même, aux données utilisées, et enfin au caractère théorique de l'étude.

a) Limites dues au modèle

Le modèle qui a été employé est un programme linéaire (cf. chapitre IV) : ceci implique d'une part que certaines "contraintes" ne sont traduites qu'approximativement, et que la réalité peut être schématisée d'une façon qui peut paraître grossière. Ainsi, par exemple, nous avons dû éliminer, des politiques de transport envisagées, celle qui aurait consisté à n'utiliser certains navires sur le courant Pologne/Rouen que pendant les périodes de grandes marées, et donc avec un chargement maximum.

De même, un programme linéaire ne peut prendre en compte des fonctions de coût qui correspondent à des installations dont le rendement croît avec la quantité. Or, c'est le cas par exemple pour les installations de manutention de Rouen (voir paragraphe VI 3 b), pour lesquelles nous avons dû nous résoudre à une approximation linéaire.

Nous avons dû, d'autre part, faire l'hypothèse que les investissements et développements que nous considérions (au Havre, à Rouen, pour les installations de déchargement, etc ..) étaient susceptibles de variations continues, ce qui a souvent constitué une approximation.

Il faut noter cependant que de telles approximations ne peuvent avoir de conséquences importantes sur les résultats de l'étude, tout au moins pour des tonnages point trop éloignés des tonnages actuels.

b) Limites dues aux données

Ne disposant que d'un temps limité, nous n'avons pu effectuer nous-mêmes les dix ou douze études économiques qui auraient été nécessaires pour reprendre complètement des questions telles que le coût du poussage sur les voies navigables, le coût de manutention des installations exis-

.../...

tantes, l'affectation du coût d'entretien des ports et chenaux aux trafics utilisateurs, etc ... C'est pourquoi nous avons utilisé de façon systématique les études et les documents existants qui se rapportaient au sujet.

Dans les cas où elles traitaient de la même chose, les sources dont nous avons eu connaissance concordaient d'une manière générale. En d'autres cas, nous n'avons pas pu faire de recoupements, et il a fallu se fier au seul document existant.

Dans la mesure où la majorité de ces études et documents nous ont été confiés par les principales parties prenantes (A.T.I.C., E.D.F., G.D.F., Ports, etc ...), il est permis de penser que les erreurs ne peuvent être que minimes. Il reste cependant que l'utilisation de résultats d'une étude par d'autres personnes que ses auteurs est toujours délicate.

c) Caractère théorique de l'étude

Dans l'hypothèse où l'on voudrait bien passer outre aux limites décrites ci-dessus, d'autres difficultés naîtraient pour tirer de l'étude des directives d'action. En effet, les comparaisons de politiques qui ont été effectuées, ont retenu pour critère l'optimum pour la collectivité (voir les paragraphes I B 2 b et IV A 2). La politique la meilleure à ce point de vue implique une politique déterminée (d'investissements, de tarification ou de choix de mode de transport) pour chacune des parties prenantes, qui peut fort bien ne pas convenir à certaines d'entre elles. Mais il suffit qu'une seule abandonne cette politique pour qu'aussitôt l'on s'éloigne de l'optimum collectif.

On le voit, l'étude et ses conclusions présentent le caractère d'être, non pas irréalistes, mais du moins essentiellement théoriques, en ce sens qu'elles ne tiennent compte que des facteurs techniques et éconcomiques, et ceci au niveau national.

2. Conclusions de l'étude

En dehors des résultats complets et détaillés, du type de ceux qui sont exposés au chapitre VII de notre étude, et qui sont les plus intéressants lorsqu'on s'intéresse à un "cas" déterminé (les volumes des importations et des consommations de charbon dans les centrales étant fixés), il est possible de présenter des conclusions générales valables pour tous les cas.

.../...

a) Acheminement du charbon d'importation

Deux idées sont ici à retenir.

La première, c'est qu'il y a intérêt, lorsque c'est possible, à envoyer le charbon américain vers les centrales les plus lointaines, à cause de son pouvoir calorifique moyen plus élevé.

La deuxième concerne la comparaison des acheminements du charbon polonais ou russe avec manutention au Havre et à Rouen. Le mécanisme des priorités qui a été exposé en A, et que l'on trouvera expliqué de façon plus complète au chapitre VII, montre que le chemin optimal est sensible aux variations des paramètres : cela prouve que les coûts relatifs à l'acheminement par Rouen et par Le Havre respectivement sont voisins. Si l'on s'en tient cependant strictement aux priorités dégagées par l'étude, on constate que tant que l'importation totale de charbon ne dépasse pas environ 4,5 millions de tonnes, le tonnage passant à Rouen ne devrait pas dépasser 540.000 tonnes.

b) Concurrence eau-S.N.C.F.

Pour étudier cette concurrence, nous avons utilisé une possibilité offerte par le modèle, qui consistait à faire baisser dans une même proportion les coûts de certains acheminements élémentaires. Nous avons fait porter cette baisse sur tous les parcours par chemin de fer.

Le premier changement au profit de la S.N.C.F. dans le mode d'acheminement optimal se produit après une baisse d'environ 50 % par rapport aux tarifs actuels. Qui plus est, il n'est pas certain que ces tarifs de la S.N.C.F. tiennent compte des investissements éventuels à effectuer pour acheminer un trafic supplémentaire important de pondéreux, tandis que les coûts retenus pour le mode de transport concurrent en tenaient compte (voir chapitre VI Coûts).

Estimant peu vraisemblable que le coût réel de transport par chemin de fer, même pour certains trafics particuliers, soit d'environ la moitié des tarifs en vigueur, nous pouvons dire que l'acheminement du charbon à partir des ports de Rouen et du Havre doit se faire par voie fluviale ; ceci vaut en particulier pour la centrale de Champagne, qui ne se distingue pas des autres à ce point de vue.

.../...

c) Investissements souhaitables

Une conséquence de ce qui précède est que, quelle que soit la politique envisagée, il importe de réaliser les investissements qui lui sont adaptés pour effectuer le transport par voie fluviale : barges, pousseurs et installations de déchargement des barges dans les centrales.

Pour ce qui est de la manutention à Rouen, l'étude de coûts que nous avons menée (cf. paragraphe VI B 3 b) indique qu'il y aurait intérêt, dès lors que le tonnage manipulé dépasserait 300.000 tonnes pendant au moins quatre années, à remplacer les bennes actuelles par des bennes plus légères qui augmenteraient le rendement des portiques. Ce point devrait bien sûr être précisé par une étude particulière.

Mais en dehors de cette amélioration, aucun investissement ne semble s'imposer. En effet, à cause de l'équivalence entre les coûts d'acheminement par Rouen et Le Havre, on n'a pas intérêt à développer les installations de manutention existantes, aussi bien au Havre qu'à Rouen, tant qu'elles ne sont pas saturées toutes les deux. Ceci ne se produit, notons-le, que pour un volume global d'importations supérieur en gros à 5,5 MT.

En cas de saturation de ces installations, la question se pose de savoir s'il faudrait développer les installations de déchargement au Havre (les installations de rechargement, en effet, ne seront jamais saturées) ou les installations de rechargement à Rouen, c'est-à-dire le poste à péniches : celui-ci soulagerait d'autant les portiques actuels, puisque ceux-ci effectuent à la fois le déchargement et le rechargement.

Les deux coûts de développement correspondants, que nous avons calculés, sont assez voisins, mais, rappelons le, ils supposaient le caractère continu des investissements, au Havre comme à Rouen. C'est pourquoi, et malgré la supériorité du Havre, que notre étude a dégagée, il y a tout lieu de penser que pour un tonnage supplémentaire de l'ordre de 1 MT, c'est le poste à péniches qu'il faudrait réaliser.

La question de la rentabilité du deuxième poste minéralier du Havre mériterait une étude à part, dont les conclusions ne dépendraient d'ailleurs pas uniquement du charbon d'importation : nous montrons en effet au cours de notre

.../...

étude (voir VI B 2 c) que, dans la limite d'hypothèses raisonnables, le charbon d'importation peut difficilement, à lui seul, assurer la rentabilité du deuxième poste minéralier. L'augmentation du trafic de pondéreux autres que le charbon serait nécessaire à cette rentabilité.

De toute manière, rappelons ici encore que la question d'un investissement de développement ne devrait se poser que si le charbon importé dépassait quelque 5,5 millions de tonnes.

3. Prolongements de l'étude

Le modèle, tel qu'il est décrit au cours de notre étude, fonctionne. Dans le cadre du problème qui nous a été posé, il est susceptible de fournir des réponses à des questions autres que celles que nous avons traitées, moyennant des modifications et aménagements mineurs. Il est par exemple capable de traiter le problème particulier du deuxième poste minéralier du Havre, comme il est exposé en IV D 3.

Il peut, si l'on abandonne l'optique de l'intérêt général, déterminer l'acheminement optimal pour une structure de coûts correspondant non pas à cet intérêt général, mais à l'intérêt de telle ou telle partie prenante ...

Enfin, ce modèle constitue une méthode générale pour aborder tous les problèmes d'acheminement et d'implantation où les investissements possibles n'ont pas un caractère trop nettement discontinu, ce qui est le cas, pensons-nous, plus souvent qu'on ne le croit : il semble presque toujours possible d'envisager un programme d'investissement qui s'intercale entre deux autres programmes donnés à l'avance.

A N N E X E S

C H A P I T R E I I I

CONSOMMATIONS ET IMPORTATIONS DE CHARBON

P L A N

A - CONSOMMATIONS DE CHARBON DANS LES CENTRALES

1 - Hypothèse forte (pas de fuel)

a) Mode de calcul

b) Tableaux des résultats

2 - Hypothèse faible (certains groupes au fuel)

a) Détermination de l'hypothèse faible

b) Tableaux des résultats

B - IMPORTATIONS DE CHARBON

1 - Les contrats passés

a) Engagements fermes

b) Options et renouvellements

2 - Le domaine de variation des importations de charbon-vapeur

a) Volume global des importations

b) Répartition par origine des importations.

C H A P I T R E III

CONSOMMATIONS ET IMPORTATIONS DE CHARBON

A. - CONSOMMATIONS DE CHARBON DANS LES CENTRALES -

1. Hypothèse forte (pas de fuel)

Dans cette hypothèse, les centrales mixtes du Havre et de Vitry fonctionnent au charbon.

a) Mode de calcul

La consommation annuelle en millithermies (c'est à-dire en kcal) peut-être considérée comme le produit :

- de la consommation spécifique en mth/kwh
- par la puissance maximale nette continue
- par la durée d'utilisation annuelle de cette puissance

Les consommations spécifiques étaient en 1965 de 2300 mth/kwh et 2500 mth/kwh pour Champagne et Porcheville respectivement. Nous conserverons ces valeurs pour les années suivantes, et prendrons celle de 2300 mth/kwh pour Vitry et Le Havre.

Les puissances maximales nettes continues, ainsi que les dates constatées ou prévues de mise en service, sont données par le tableau suivant, dans lequel on a donné pour Porcheville la puissance totale, et la date moyenne d'entrée en service de ses quatre groupes

.../...

Centrales		Puissance (MW)	Date mise en service
PORCHEVILLE		468	1/1957
CHAMPAGNE	I	240	6/1961
	II	240	1/1965
VITRY	I	240	4/1966
	II	240	10/1966
	III	240	1/1970
	IV	240	1/1970
LE HAVRE	I	240	1/1968
	II	575	10/1968
	III	575	1/1973
	IV	575	1/1974

Pour les durées annuelles de fonctionnement nous retiendrons les valeurs suivantes :

- lère et 2ème année : mise en service - soit :

  lère année $\frac{32}{100}$ 6.800 = 2.200 heures

  2ème année $\frac{72}{100}$ 6.800 = 4.900 heures

- De la 3ème à la 7ème année incluse, palier d'utilisation maximum à 6.800 heures.
- A partir de la 8ème année, décroissance de l'utilisation (raisons économiques) de 15 % par an.

Une telle décroissance n'a pas encore été constatée pour Porcheville, bien que cette centrale soit entrée en service depuis plus de 7 ans. Ceci s'explique sans doute par le fait que le palier a été plus faible que 6.800 heures. Nous retiendrons pour cette centrale une décroissance linéraire (en deux tronçons) entre 1965 et 1975 :

1965 : 5.800 heures
1970 : 4.200 heures
1975 : 2.400 heures

puis une décroissance de 15 % par an après 1975.

.../...

Ces données permettent d'obtenir, année par année, la consommation totale en kTec (milliers de tonnes d'équivalent charbons) (1) pour chacun des groupes, dont il convient de retrancher 2 % correspondant à l'utilisation du fuel auxiliaire.

---

(1) 1 Tec correspond à du charbon dont le pouvoir calorifique supérieur est de 6,75 th/kg.

b) Tableaux des résultats

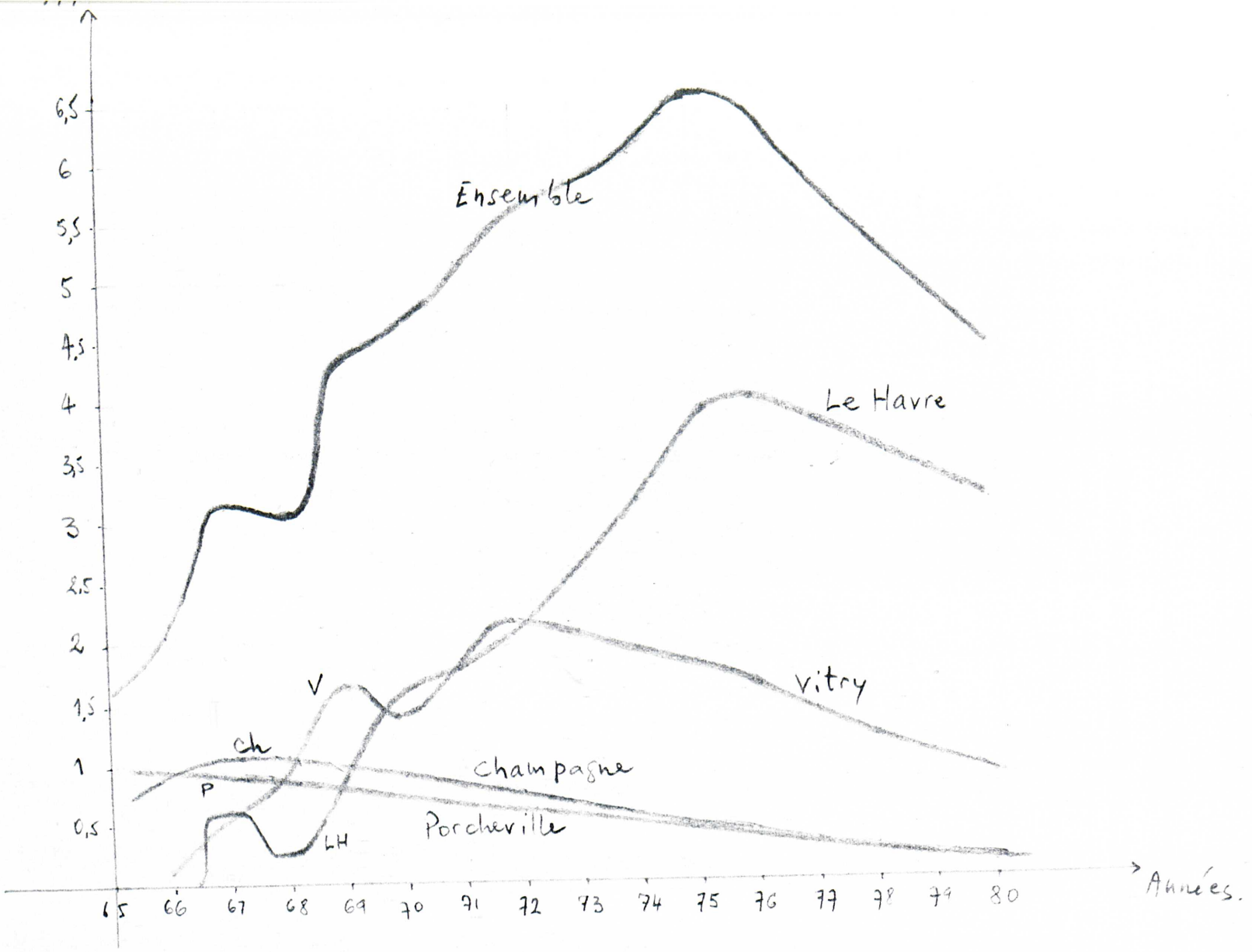
Tableau de calcul

CENTRALES GROUPES		66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
PORCHEVILLE																
	Total	940	885	825	770	710	650	595	535	480	420	360	305	260	210	180
	Charbon	921	867	809	755	696	637	583	524	470	412	352	299	255	206	176
CHAMPAGNE	I	555	555	510	435	370	315	270	230	195	165	140	120	100	85	70
	II	400	555	555	555	555	555	470	400	340	290	250	210	180	155	130
	Total	955	1.110	1.065	990	925	870	740	630	535	455	390	330	280	240	200
	Charbon	936	1.088	1.044	970	907	853	725	617	524	446	382	323	274	235	196
VITRY	I	130	330	510	555	555	555	555	500	425	360	305	260	220	190	160
	II	50	240	450	555	555	555	555	520	440	375	320	270	230	195	165
	III				300 *	180	400	555	555	555	555	555	470	400	340	290
	IV				300 *	180	400	555	555	555	555	555	470	400	340	290
	Total	180	570	960	1.710	1.470	1.910	2.220	2.130	1.975	1.845	1.735	1.470	1.250	1.065	905
	Charbon	176	559	941	1.688	1.451	1.872	2.176	2.087	1.935	1.808	1.700	1.441	1.225	1.044	887
LE HAVRE	I		300 *	180	400	555	555	555	555	555	470	400	340	290	250	210
	II		300 *	130	590	1.080	1.330	1.330	1.330	1.330	1.240	1.050	900	760	650	550
	III							300 *	430	970	1.330	1.330	1.330	1.330	1.330	1.130
	IV								300 *	430	970	1.330	1.330	1.330	1.330	1.330
	Total		600	310	990	1.635	1.885	2.185	2.615	3.285	4.010	4.110	3.900	3.710	3.560	3.220
	Charbon		600	248	970	1.602	1.847	2.147	2.569	3.219	3.930	4.028	3.822	3.636	3.489	3.156
ENSEMBLE CHARBON		2.033	3.104	3.042	4.383	4.645	5.209	5.631	5.798	6.150	6.595	6.463	5.885	5.390	4.974	4.415

* Constitution de stock

- CONSOMMATIONS EN CHARBON DANS L'HYPOTHESE FORTE -

CENTRALES	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
PORCHEVILLE	920	870	810	760	700	640	580	520	470	410	350	300	260	210	180
CHAMPAGNE	940	1.090	1.040	970	910	850	730	620	520	450	380	320	270	230	200
VITRY	180	560	940	1.690	1.450	1.870	2.180	2.090	1.940	1.810	1.700	1.440	1.230	1.040	890
LE HAVRE	-	600	250	970	1.600	1.850	2.150	2.570	3.220	3.930	4.030	3.820	3.640	3.490	3.160
ENSEMBLE	2.040	3.120	3.040	4.390	4.660	5.210	5.640	5.800	6.150	6.600	6.460	5.880	5.400	4.970	4.430



Consommations en charbon (Hypothèse forte)

A 6 bis

2. Hypothèse faible (certains groupes au fuel)

a) Détermination de l'hypothèse faible

Pour les raisons exposées en I B 1 b, nous n'envisagerons pas l'éventualité d'une marche au fuel des groupes III et IV de Vitry.

En ce qui concerne la centrale du Havre, nous n'envisagerons pas non plus l'éventualité où l'un des deux groupes III et IV serait au fuel, et l'autre au charbon : il semble probable, étant donné qu'ils seront construits en même temps, que ces deux groupes utiliseront le même combustible.

Enfin, la construction d'un éventuel groupe V au Havre est très aléatoire, et, de toute manière, assez éloignée dans le temps pour influer très peu sur l'étude.

Dans ces conditions, l'hypothèse faible se déduit de l'hypothèse forte par la suppression pure et simple des consommations des groupes III et IV du Havre.

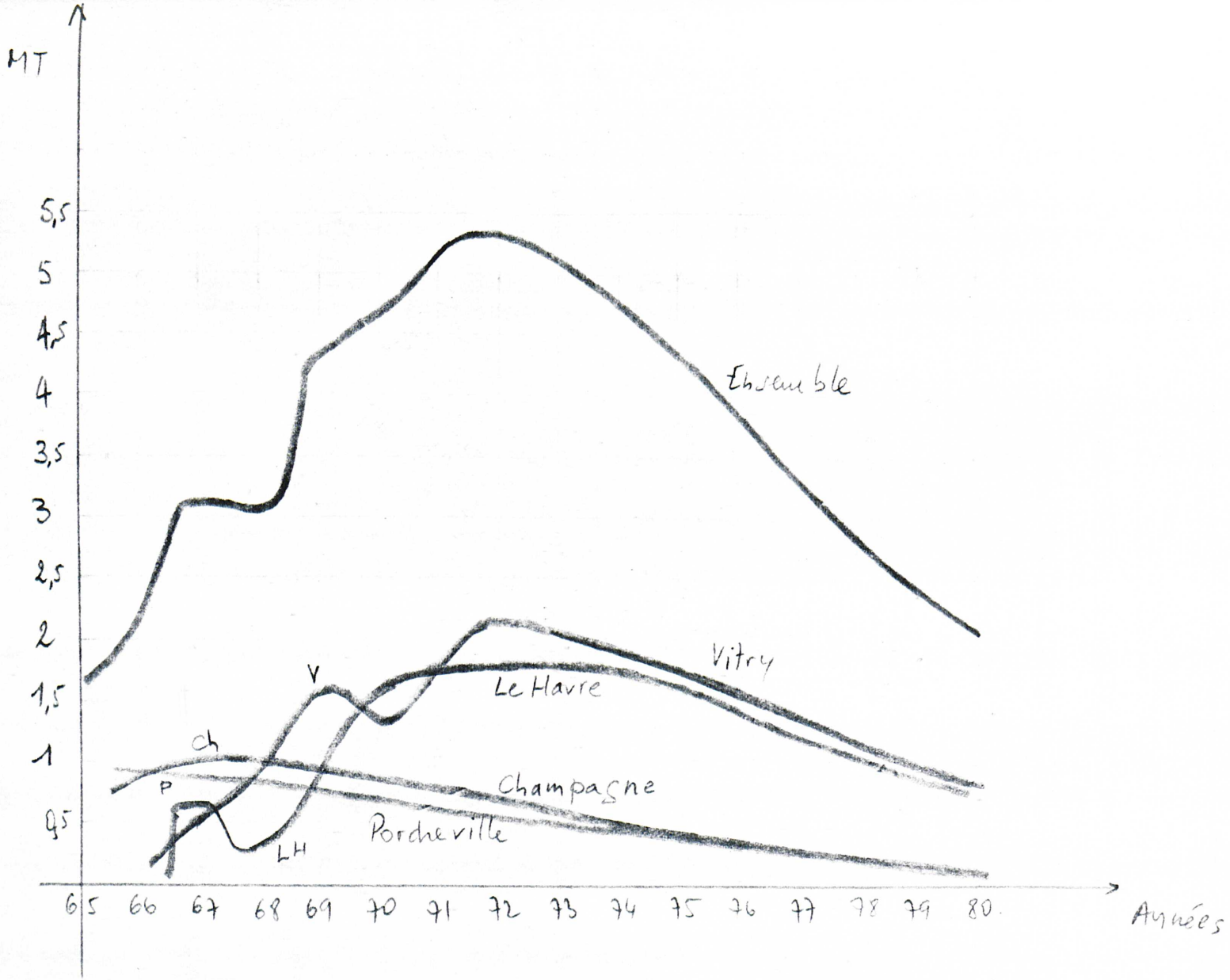
b) Tableaux de résultats

Compte tenu de ce qui précède, ils se déduisent aisément des tableaux de l'hypothèse forte.

.../...

CONSOMMATIONS EN CHARBON (HYPOTHESE FAIBLE)

CENTRALES	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
PORCHEVILLE	920	870	810	760	700	640	580	520	470	410	350	300	260	210	180
CHAMPAGNE	940	1.090	1.040	970	910	850	730	620	520	450	380	320	270	230	200
VITRY	180	560	940	1.690	1.450	1.870	2.180	2.090	1.940	1.810	1.700	1.440	1.230	1.040	890
LE HAVRE	-	600	250	970	1.600	1.850	1.850	1.850	1.850	1.680	1.420	1.220	1.030	880	750
ENSEMBLE	2.040	3.120	3.040	4.390	4.660	5.210	5.340	5.080	4.760	4.350	3.850	3.280	2.790	2.360	2.020



Consommations en charbon (Hypothèse faible)

B. - IMPORTATIONS DE CHARBON -

1. Les contrats passés

a) Engagements fermes

Ils sont résumés par le tableau suivant (en kT)

	1966	1967	1968	1969	1970	1971
U.S.A.	0	700	700	700	700	700
POLOGNE	400	500	600	700	R	R
U.R.S.S.	0	100	100	100	R	R

(R : renouvellement possible. Voir b) ci-dessous)

Les spécifications comportent en particulier la garantie d'un pouvoir calorifique supérieur (p.c.s.) égal à 6.800 kcal/kg pour le charbon polonais, et à 7.500 kcal/kg pour le charbon américain. En fait, on sait que le charbon polonais proviendra de deux mines selectionnées, ce qui lui assurera un p.c.s. constant de 7.100 kcal/kg.

b) Options et renouvellements

Les engagements fermes sont assortis d'options, qui portent respectivement sur les tonnages suivants :

- U.S.A. 300 kT, à demander en Juin
- Pologne + 50 % du tonnage de l'année, à demander en Juin
- U.R.S.S. + 33 kT, à demander avant Octobre.

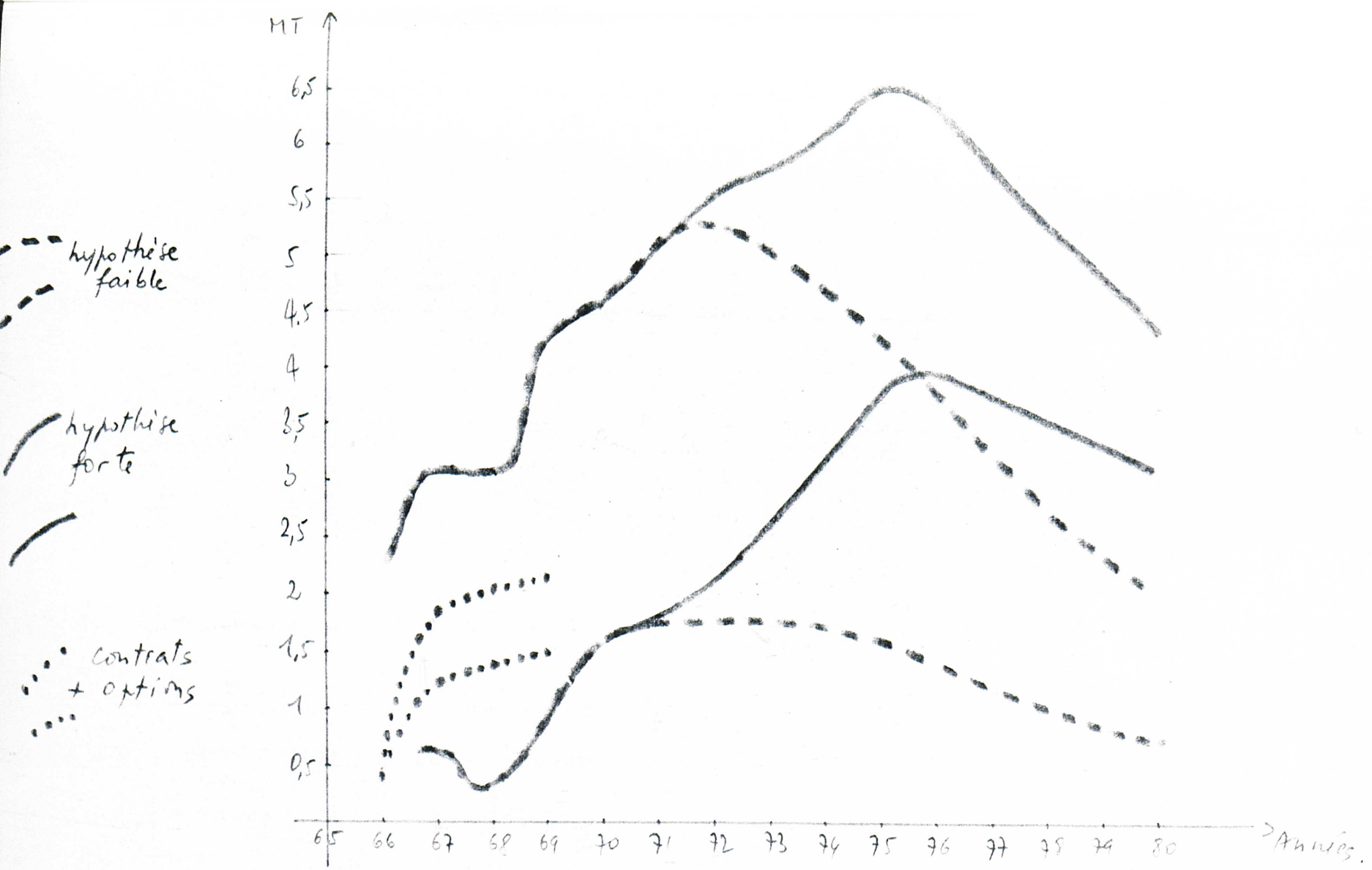
Les contrats avec les pays de l'Est se placent dans le cadre d'accords commerciaux, en particulier de l'accord commercial franco-polonais conclu récemment. En cas de reconduction de ces accords, ils sont susceptibles de renouvellement à partir de 1970. (Lettre "R" dans le tableau du paragraphe a)).

.../...

DOMAINES DES IMPORTATIONS CHARBONNIERES DESTINEES A E.D.F.

HYPOTHESES		66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
FORTE	Max.	2.040	3.120	3.040	4.390	4.660	5.210	5.640	5.800	6.150	6.600	6.460	5.880	5.400	4.970	4.430
	Min.	-	600	250	970	1.600	1.850	2.150	2.570	3.220	3.930	4.030	3.820	3.640	3.490	3.160
FAIBLE	Max.	2.040	3.120	3.040	4.390	4.660	5.210	5.340	5.080	4.760	4.350	3.850	3.280	2.790	2.360	2.020
	Min.	-	600	250	970	1.600	1.850	1.850	1.850	1.850	1.680	1.420	1.220	1.030	880	750
ENGAGEMENTS		400	1.300	1.400	1.500	1.500 ⁂	1.500 ⁂									
+ OPTIONS		+ 200	+ 583	+ 633	+ 683	+ 683	+ 683									

⁂ S'il y a renouvellement des contrats avec l'URSS et la Pologne



Domaines des importations charbonnières destinées à E.D.F

A 11 bis

C H A P I T R E I V

LE MODELE

P L A N

A - ACHEMINEMENT OPTIMAL DU CHARBON AVEC LES INSTALLATIONS EXISTANTES

1 - Le réseau de transport

2 - Les coûts et le problème de transport

a) La structure des coûts

b) Les frais fixes et l'optimum collectif

c) Conclusion

B - DEVELOPPEMENT DES INSTALLATIONS - INVESTISSEMENTS OPTIMAUX

1 - Formulation la plus générale

a) Généralité

b) Formulation

c) Résolution dans le cas général

d) Cas particulier des régimes permanents et des investissements continus

e) Conclusion

2 - Représentation du problème de développement en régime permanent infini, et dans le cas d'investissements continus, par un problème de transport.

a) La notion de coût de développement

b) Calcul du coût de développement dans le cas d'installations inélastiques.

.../...

c) Utilisation du coût de développement

d) Equivalence avec un problème de transport

e) Généralisation aux structures de coûts convexes

f) Conclusion

C - REGIMES PERMANENTS A HORIZON LIMITE

1 - Coût de développement et horizon n

2 - Cas particuliers

a) Problème des locations

b) Problème des renouvellements

D - COMPLEXITE DU PROBLEME ETUDIE

1 - Régime non permanent

2 - Etude de la sensibilité aux coûts

3 - Problème des investissements discrets

4 - Etude de la rentabilité propre des investissements

a) Cas des régimes permanents et investissements continus

b) Cas des investissements discrets

5 - Le modèle et les rendements croissants.

C H A P I T R E I V

LE MODELE

Le problème étudié est celui du transport optimal du charbon, d'importation et français, qui approvisionne les quatre centrales thermiques du Havre, de Porcheville, de Champagne et de Vitry. Par cela, nous entendons que nous recherchons l'ensemble le plus économique des opérations de manutention et de transport qui se situent entre l'instant où le charbon est à bord du navire, ce dernier étant à l'embouchure de la Seine - ou, dans le cas du charbon français, l'instant où le charbon est au jour - et celui où le charbon est stocké sur le parc de la centrale, compte tenu des installations ou moyens de transport et de manutention existants, et de leur développement possible -

Nous montrons dans ce chapitre qu'il est possible, moyennant certaines hypothèses et approximations raisonnables, de rechercher cet optimum - acheminement optimal et investissements de développement optimaux - en utilisant un programme linéaire, ce qui permet le traitement par ordinateur -

A Acheminement optimal du charbon avec les installations existantes

Dans cette première partie, nous n'envisageons pas la possibilité de développer les installations ou moyens existants (ou d'en créer de nouveaux).

1 - Le réseau de transport

Pour représenter l'ensemble de tous les acheminements possibles du charbon entre les deux instants considérés, il est commode de dessiner un réseau, c'est-à-dire un ensemble de sommets reliés ou non deux à deux par une ligne orientée, ou arc. L'ensemble des sommets et la relation binaire qui le structure et qui est représentée par l'ensemble des arcs, constituent le graphe du problème - Ici, les sommets représentent des étapes dans l'acheminement du charbon, les arcs les opérations de manutention et de transport nécessaires pour passer d'une étape à une autre - Sur la figure 1, on voit qu'il y a trois sources (la base du graphe) : le charbon américain, le charbon polonais et russe, le charbon français, et quatre puits (antibase du graphe) : les quatre centrales considérées - On voit aussi, par exemple, que le charbon américain ne peut que se rendre au port du Havre, et qu'ensuite il peut être déchargé soit sur train, soit sur engin de transport fluvial, soit encore aller directement à la centrale du Havre - Le réseau de la figure 1 est un réseau grossier, car il ne rentre pas dans le détail des opérations.

On appelle flot dans un graphe, une fonction des arcs telle que la loi de Kirchhoff s'applique pour tout sommet différent des sources et des puits. Un acheminement quelconque du charbon correspond donc à un flot dans le graphe du problème

Pour finir de décrire complètement le problème au moyen du réseau, il suffit maintenant :

- d'associer aux trois sources et aux trois puits les tonnages qui leur correspondent, et qui sont, rappelons-le, les paramètres du problème (reliés par la relation : somme des entrées = somme des sorties)
- d'associer à chaque arc, donc à chaque opération (ou ensemble d'opérations), une capacité, qui limite le flot, et qui correspond à la capacité des moyens ou installations relatives à l'opération en question.

Pour que le problème soit d'ordre économique, il reste à introduire la notion de coût.

.../...

2 - Les coûts et le problème de transport

Si, dans un réseau de transport, on associe à chaque arc i un "coût", c_i, et que l'on recherche le flot, c'est-à-dire l'ensemble des x_i, qui minimise le "coût total" :

$$\sum_i c_i(x_i) \quad ,$$

on a un problème de transport, problème classique que l'on sait résoudre.

Quelles conditions le problème réel doit-il remplir pour qu'un problème de transport puisse le représenter convenablement ?

a) La structure des coûts

L'optimum que l'on recherche est le minimum de la dépense totale actualisée - Admettons pour l'instant que l'on soit en régime permanent, et que les coûts ne se déforment pas en fonction du temps. Dans ces conditions, il suffit de considérer une année, et de rechercher le flot annuel optimal - Supposons que le réseau de transport soit assez fin pour que chaque arc i représente une seule opération i (Ce n'est pas le cas de la figure 1, mais on peut se reporter au chapitre V : application au problème) - Dans ces conditions, la part de la dépense totale que supporte l'arc i est :

$$F_i + \int_0^{x_i} c(x)\, dx \quad \text{avec } x_i \leq K_i$$

où : F_i représente les frais fixes de l'opération i

$c_i(x)$, le coût marginal à court terme, c'est-à-dire le supplément de dépenses (main d'oeuvre, énergie, fournitured, entretien) nécessaires pour satisfaire une augmentation de x de l unité, à capacité constante - L'intégrale représente le coût partiel.

x_i, le tonnage qui passe dans i

K_i, la capacité de l'arc i

Pour que l'on ait un problème de transport, il faut deux conditions :

1º) que $c(x)$ soit constant, pour $x \leq K$

Pour x nettement inférieur à la capacité, ceci est acceptable. Quand le tonnage se rapproche de la capacité, les phénomènes de saturation se font sentir, et c croît rapidement : on obtient une courbe de coût du type de la figure 2a - Dans le

.../...

cas d'installations "inélastiques", il est légitime d'approximer cette courbe par celle de la figure 2b), où :

$c(\ell) = c$ pour $\ell < K$
$c(\ell) = c'$ pour $\ell = K$

C'est ce que nous ferons.

2º) Les frais fixes ne doivent pas intervenir -

Que comprennent les frais fixe ?

- d'une part, des dépenses réelles, fixées à court terme, c'est-à-dire non affectées par une modification de la production (par exemple, les salaires du directeur et du veilleur de nuit, les loyers et les dépenses d'entretien des bâtiments)
- d'autre part, faut-il faire intervenir les amortissements et charges financières, ou tout au moins, la partie qui représente la baisse de valeur des équipements en dehors de tout usage ?

Il faut distinguer deux cas :

- on ne renouvellera pas l'installation considérée, une fois sa durée de vie écoulée : il ne faut pas alors compter l'amortissement et les charges financières, car, en faisant leur somme actualisée sur la durée de vie, on retrouve l'investissement initial, donc un coût passé, qui n'a plus à intervenir dans le choix - ("Seul compte l'avenir").
- L'installation est susceptible d'être renouvelée - Si on suppose le progrès technique nul, on doit alors considérer l'amortissement et les charges financières comme une provision pour renouvellement, ou comme un coût de renouvellement (de même que l'on parle de coût de développement, voir plus loin), et il faut les comptabiliser -

Nous allons montrer que les frais fixes ainsi définis n'interviennent pas, si l'on recherche l'optimum pour la collectivité.

b) les frais fixes et l'optimum collectif

Considérons le problème simplifié suivant : un tonnage T peut se rendre d'un état A à un état B, en empruntant soit un chemin (1) - un chemin étant un ensemble d'opérations de transport et de manutention -, soit un chemin (2), soit les deux .

.../...

Soient Q_1 et Q_2 les tonnages relatifs aux chemins (1) et (2).

La dépense totale est :

- pour le chemin (1) : $F_1 + \int_o^{q_1} c_1(Q_1)\, dQ_1$

- pour le chemin (2) : $F_2 + \int_o^{q_2} c_2(Q_2)\, dQ_2$

et l'on a $q_1 + q_2 = T$

L'optimum, c'est-à-dire le minimum de la dépense totale, s'écrit donc :

$$\text{Min } (F_1 + \int_o^{q_1} c_1(q_1)\, dq_1 + F_2 + \int_o^{q_2} c_2(q_2) dq_2) \quad (1)$$

avec $q_1 + q_2 = T$

on a, en différentiant : $c_1(q_1)\, dq_1 + c_2(q_2)\, dq_2 = 0$

$$dq_1 + dq_2 = 0$$

d'où $c_1(q_1) = c_2(q_2) = c_2(T - q_1)$

A l'optimum les deux coûts marginaux sont égaux. Comme on le voit sur la figure 3a, q_1 et q_2 s'obtiennent graphiquement par l'intersection de la courbe $c_1^2(q)$ avec la symétrique de la courbe $c_2(q)$ par rapport à la verticale d'abscisse $T/2$ -

Mais que se passe-t-il si, comme dans la figure 3b, ces deux courbes ne se coupent pas, ce qui se produira, en particulier, si, comme nous l'avons supposé, $c_1(q) = c_1$ et $c_2(q) = c_2$?

La solution est une des deux solutions extrêmes : $(q_1 = T ; q_2 = 0)$ ou $(q_2 = T ; q_1 = 0)$, mais laquelle ? La réponse dépend de la nature de l'optimum que l'on considère -

Plaçons nous dans les conditions suivantes, qui sont loin d'être irréalistes (en particulier, en ce qui concerne la concurrence Rouen-Le Havre, ou, pour un même port, la concurrence entre les installations de rechargement sur fer et sur eau) :

- Les deux chemins (1) et (2) ne peuvent être empruntés pratiquement que par le tonnage T considéré.

- On fait payer à l'usager les frais fixes des chemins qu'il emprunte (tarification au coût moyen).

Dans ces conditions, <u>l'optimum pour l'usager</u> s'écrit :

.../...

$$\text{Min} \left(F_1 \delta(q_1) + \int_0^{q_1} c_1(q_1)dq_1 + F_2\, \delta(q_2) + \int_0^{q_2} c_2(q_2)dq_2 \right) \quad [2]$$

$$\text{avec } q_1 + q_2 = T$$

$$\text{et } \delta(x) = \begin{cases} 1 \text{ pour } x \neq 0 \\ 0 \text{ pour } x = 0 \end{cases}$$

c'est-à-dire qu'on ne fait pas payer à l'usager les frais fixes d'un chemin qu'il n'emprunte pas.

L'optimum pour l'usager dépend alors de F_1, de F_2, et de T, comme on le voit sur l'exemple simple suivant :

chemin (1) $\quad 0 + cq_1$

chemin (2) $\quad F + kq_2 \qquad$ avec $c > k$

On trouve facilement que l'optimum est :

$$\begin{cases} q_1 = T \\ q_2 = 0 \end{cases} \quad \text{si } T < \frac{c - k}{F}$$

voir figure (4)

$$\text{et} \quad \begin{cases} q_1 = 0 \\ q_2 = T \end{cases} \quad \text{si } T > \frac{c - k}{F}$$

L'optimum pour l'usager correspond au coût moyen minimum.

Par contre, l'optimum pour la collectivité, c'est-à-dire le minimum de la dépense totale, s'écrit comme [1] :

$$\text{Min} \left(F_1 + \int_0^{q_1} c_1(q_1)dq_1 + F_2 + \int_0^{q_2} c_2(q_2)dq_2 \right) \quad [1]$$

$$\text{avec } q_1 + q_2 = T$$

c'est-à-dire qu'on comptabilise les frais fixes d'un chemin qui n'est pas emprunté, car, dans la mesure où cette vacance n'est pas définitive et où on n'a pas décidé de fermer les installations en question, les frais fixes représentent une dépense réelle pour la collectivité.

On voit que l'optimum [1] ne fait intervenir ni F_1 ni F_2, et ne varie pas en fonction de T, dans le cas simple où nous nous plaçons, où c_1 et c_2 sont constants : il faut prendre le chemin au coût marginal le plus faible .

.../...

c) conclusion

On voit donc que si l'on se place dans le cas d'installations inélastiques, dont le coût marginal à court terme est sensiblement constant, et si l'on considère l'optimum pour la collectivité, le problème de l'acheminement optimal dans le cadre d'installations existantes se ramène à un problème de transport, dans lequel on associe à chaque arc :

- une capacité, qui est la capacité de l'installation correspondante.
- un coût, qui est le coût marginal à court terme .

On cherche : Min $\sum_i c_i \varphi_i$,

Les φ_i étant liés par :

- autant d'équations de Kirchhoff que de sommets différents des sources et des puits.
- autant d'équations d'entrée que de sources, et d'équations de sortie que de puits
- autant d'inéquations relatives aux capacités que d'arcs.

Ces équations et inéquations étant linéaires, le problème est équivalent à un programme linéaire. Cette remarque est importante, car le problème réel, comme on le verra dans le chapitre suivant, comporte des équations (proportionnalité entre les flots de divers arcs) qui le font sortir du type "problème de transport" mais qui ne détruisent pas son caractère de programme linéaire.

Remarque : revenons sur l'hypothèse faite au début de cette partie, à savoir que les coûts, donc les coûts marginaux à court terme, ne se déforment pas en fonction du temps - Cette hypothèse est en contradiction avec la notion que nous avons introduite de durée de vie, car on sait et on démontrera plus loin (en C2) qu'il faut renouveler l'équipement lorsque la charge d'exploitation pendant un an de l'ancienne installation devient supérieure à la charge totale annuelle correspondant à une installation neuve, ce qui implique que la première croît en fonction du temps, par suite du vieillissement.

Pous sortir de cette difficulté, nous prendrons pour c_i un coût moyen sur la durée de vie de l'installation i, de façon à retrouver, pour cette durée, la dépense totale actualisée réelle.

.../...

B DEVELOPPEMENT DES INSTALLATIONS - INVESTISSEMENTS OPTIMAUX

Le réseau de transport que nous venons de définir comporte des capacités : il existe donc un flot maximum, qui correspond à la saturation d'un ou de plusieurs installations - Comme nous aurons à considérer des flots supérieurs à ce flot maximum, il est nécessaire d'introduire dans notre formulation la possibilité de développer les installations existantes, donc d'investir.

Les investissements que nous considérons dans cette étude sont des investissements de développement, c'est-à-dire que leur effet primordial est d'augmenter la capacité de l'installation correspondante, dans le but de traiter un tonnage accru - Il se peut qu'également ils introduisent un progrès dans l'exploitation, c'est-à-dire qu'ils aboutissent à une diminution du coût marginal à cou t terme, mais, bien que tenant compte de ce phénomène, nous n'étudierons pas leur rentabilité à ce point de vue. En d'autres termes, nous étudierons les rentabilités relatives des investissements les uns par rapport aux autres (faut-il mieux investir au Havre qu'à Rouen, par exemple), sans étudier leur rentabilité propre. Nous donnerons cependant le moyen d'étudier cette rentabilité propre, car il peut arriver que, deux investissements étant tels que l'un soit plus rentable que l'autre, aucun des deux cependant ne soit rentable.

1 - Formulation la plus générale

a) généralité

Soit une installation de capacité K_1 et de coût marginal à court terme C_1 - Il existe trois types différents d'investissements qui conduisent à une augmentation de capacité $(K_2 - K_1)$.

- 1º) on peut construire une nouvelle unité d'exploitation de capacité propre $(K_2 - K_1)$, de coût marginal C' (exemples : construction d'un deuxième poste minéralier au Havre - investissements en barges et pousseurs pour le transport fluvial) -

- 2º) on peut modifier certaines parties de l'installation, ou les remplacer par d'autres, ou créer de nouveaux équipements, de telle sorte que la capacité devienne K_2, sans que le flot supplémentaire $(K_2 - K_1)$ puisse être individualisé, comme en 1º). La nouvelle installation a une

.../...

capacité K_2, et un coût marginal égal à C_2 (exemples : amélioration des portiques à Rouen, construction d'un poste de péniches).

3º) on peut attendre la date optimale de renouvellement de l'installation (fin de sa durée de vie économique), et la remplacer par une installation de capacité supérieure K_2, de coût marginal C_2 -

Dans le cas (1º), le flot supplémentaire (K_2-K_1) est individualisé, alors que dans le cas (2º) et (3º) seul le flot total K_2 à un sens physique. Cependant, dans les cas 2º et 3º, il est possible conceptuellement de séparer le flot total Φ qui passe dans la nouvelle installation en deux parties : K_1 et $(\Phi - K_1)$, et d'associer au flot supplémentaire $(\Phi - K_1)$ un coût $C'(\Phi)$, comme en (1º), tel que :

Bl - 1 (voir fig. 5a)

$$\begin{cases} C'(\Phi) = \dfrac{C_2\Phi - C_1 K_1}{\Phi - K_1} \\ \text{et} \quad C' = \dfrac{C_2K_2 - C_1 K_1}{K_2 - K_1} \quad \text{pour } \Phi = K_2 \end{cases}$$

Comme en général, $C_2 < C_1$, on a $C' < C_2 < C_1$

De même, dans le cas (1º), il est possible de définir C_2, connaissant $\varphi\ (\varphi \leq K_1)$ qui passe dans l'ancienne installation, et $\Phi - \varphi$ dans la nouvelle :

Bl - 2 (voir fig. 5b)

$$\begin{cases} C_2(\Phi) = \dfrac{C_1\varphi + C'(\Phi - \varphi)}{\Phi} = \dfrac{C_1\varphi + C'\varphi'}{\Phi} \quad \text{avec } \varphi' = \Phi - \varphi \\ \text{et} \quad C_2 = \dfrac{C_1K_1 + C'(K_2-K_1)}{K_2} \quad \text{pour } \Phi = K_2 \end{cases}$$

b) formulation

L'optimum recherché est le minimum de la dépense totale actualisée sur l'horizon considéré N, que nous supposerons très grand par rapport aux durées de vie, ou ce qui revient au même (voir plus loin), égal à leur P.P.C.N.

Pour le type (1º), ceci se traduit par :

$$\text{Min} \sum_{\text{tous les arcs}} \left[\sum_{t=0}^{t=N} (F + C_1\varphi) + \left(\frac{I}{1+i}\right)^T + \sum_{t>T} (G + C'\varphi') \right] \quad \text{Bl -3a}$$

.../...

- 3

ou

$$\text{Min} \sum_{\substack{\text{tous les} \\ \text{arcs}}} \left[\sum_{t \leqslant T} (F + C_1 \varphi) + \frac{I}{(1+i)^T} + \sum_{t > T} (F + G + C_2 (\Phi) \Phi) \right] \quad \text{Bl - 3b}$$

où $\sum_t$ représente une somme actualisée sur le domaine de t considéré.

C_1, C', C_2, φ, φ', Φ ont les significations de Bl - 2

$\frac{I}{(1+i)^T}$ représente la valeur actualisée d'un investissement I à l'époque T (i = taux d'intérêt)

F représente les frais fixes des installations existantes à à l'instant 0

G représente les frais fixes des installations créées en T.

Pour les types (2º) et (3º), ceci devient :

Bl - 4

$$\text{Min} \sum_{\text{tous les arcs}} \left[\sum_{t \leqslant T} (F + C_1 \varphi) + \frac{I}{(1+i)^T} + \sum_{t > T} (F + G + C_2 \Phi) \right] \quad \text{Bl - 4a}$$

ou

$$\text{Min} \sum_{\text{tous les arcs}} \left[\sum_{t=0}^{t=N} (F + C_1 \varphi) + \frac{I}{(1+i)^T} + \sum_{t > T} (G + C' (\Phi) \varphi') \right] \quad \text{Bl - 4b}$$

où : φ représente le flot qui passe dans l'ancienne installation
pour $t \leqslant T$: c'est le flot réel
pour $t > T$: $\varphi = K_1$ si $\varphi' \neq 0$

$\varphi' = \Phi - \varphi$; donc $= \begin{cases} \Phi - K_1 \\ t > T, \text{ où } 0 \end{cases}$, puisque φ' n'existe que pour

G représente le supplément des frais fixes, par rapport à l'ancienne installation, supportée par la nouvelle (amortissements exclus)

T représente comme dans Bl - 3 la date de l'investissement

Dans le cas (3º), T représente la fin de la vie économique de l'installation existante.

I représente l'investissement de développement. Pour le cas (2º), c'est le coût des modifications, amélioration, créations apportées. Pour (3º), I est en fait un ΔI: c'est la différence entre le coût de la nouvelle installation de capacité

.../...

K_2 et le coût de l'ancienne, de capacité K_1 : supposons en effet qu'on ne développe pas : il faudrait alors renouveler, et on pourrait écrire la dépense totale : $\sum_{0}^{N} (F + C_1 \varphi)$

avec, dans F, les amortissements et charges financières, équivalents, en somme actualisée, au coût de renouvellement - Le coût supplémentaire, en cas de développement, est donc bien l'investissement supplémentaire auquel on doit consentir pour avoir une installation de plus grande capacité - Remarquons d'ailleurs que F, ou, ce qui est équivalent, le coût de renouvellement n'intervient pas dans l'optimum, puisque c'est une dépense de toute façon nécessaire pour la collectivité (si l'on n'a pas décidé d'arrêter l'exploitation en question).

Remarque : Dans les trois types étudiés, F doit comprendre les amortissements et charges financières, si l'on a l'intention de renouveler. Par contre, G ne comporte que les dépenses réelles fixes, puisque l'on comptabilise $\mathcal{I}$ directement.

Conclusion sur la formulation générale

Nous avons donc abouti à deux types de formulation différents suivant le genre de développement envisagé - Grâce aux relations Bl - 1 et Bl - 2, nous avons cependant pu mettre en évidence une similitude entre les deux formulations, mais ce n'est qu'une similitude - Bl - 4b ressemble à Bl - 3a, mais C'y dépend de Φ ; de même, Bl - 3b ressemble à Bl - 4a, mais C_2y dépend de Φ.

c) Résolution dans le cas général

Le minimum à rechercher, est un minimum par rapport aux flots φ (problème d'exploitation) et par rapport aux $\mathcal{I}$ (problème d'investissement)- On va procéder en deux étapes :

1º) On se donne d'abord une configuration possible des $\mathcal{I}$, et on cherche le minimum par rapport aux φ , d'où les φ^* optimaux : c'est là un problème de transport.

- Pour Bl - 4, ceci est évident : considérons en effet Bl - 4a. Les $\mathcal{I}$ étant donnés, les $\mathcal{I}$, F et G n'interviennent plus dans le problème - De plus, les coûts $C_1(t \leqslant T)$ et $C_2(t > T)$ sont indépendants du flot .

- Pour Bl - 3 : considérons Bl - 3a $\mathcal{I}$, F, et G n'interviennent pas, les $\mathcal{I}$ étant donnés. C_1 et $\mathcal{C}'$ sont constants. Mais on ne retrouve un problème de transport

.../...

pour $t \geq T$, qu'à la condition d'adjoindre à l'arc considéré, de coût C_1 et où passe $\mathcal{C}$, un arc supplémentaire, de coût C' et où passe $\mathcal{C}'$ (voir par. IV B 2 d)

2º) Ayant obtenu par ce moyen les $\mathcal{C}^*$ optimaux relatifs à une configuration des I, il reste à rechercher la meilleure de ces configurations, celle qui minimise la dépense totale actualisée - Si le nombre des configurations est important, ce problème peut évidemment devenir très complexe

d) Cas particulier des régimes permanents et des investissements continus.

Supposons que l'on soit en régime permanent de durée n, et que les investissements puissent varier de façon continue. Plaçons nous au début de ce régime permanent : on peut donner à priori deux sortes de résultats :

- S'il y a des investissements à faire, il faut évidemment les faire de suite.

- A l'optimum, les I et les $\mathcal{C}$ sont tels que la nouvelle capacité réalisée grâce à I est justement égale à $\mathcal{C}$: s'il n'en était pas ainsi, en effet, on pourrait réduire I, sans changer $\mathcal{C}$, donc réduire la dépense totale.

Donc dans ce cas particulier, les trois types de développement envisagés sont équivalents, et les quatre relations B1 - Ba et b, et B1 - 4a et b se ramènent à une seule, grâce aux relations :

$$\text{B1 - 5} \qquad \begin{cases} \text{si } I \text{ optimal} \neq 0 : & \Phi = K_2 \qquad \mathcal{C}' = K_2 - K_1 \\ & \mathcal{C} = K_1 \\ \text{et} & C_2 K_2 = C_1 K_1 + C'(K_2 - K_1) \end{cases}$$

e) Conclusion

Dans le cas général de régimes non permanents et d'investissements non continus, la méthode de résolution exposée peut conduire à des calculs inextricables- Elle se simplifie dans le cas particulier des régimes permanents et des investissements continus.

Nous allons maintenant exposer une méthode de résolution beaucoup plus simple, équivalente à la première dans le cas particulier envisagé, et pouvant constituer une approximation raisonnable de la réalité dans le cas général.

.../...

2 - Représentation du problème de développement en régime permanent infini, et dans le cas d'investissements continus, par un problème de transport.

Nous venons d'étudier le procédé le plus général qui conduise au minimum de la dépense actualisée, laquelle est une fonction $D(I, \Phi)$ de deux types de variables : les investissements I et les flots Φ ; nous nous sommes donné une configuration des I, et cherché les $\Phi^*(I)$ optimaux, ce qui est un problème de transport - Il faut alors minimiser par rapport à I : $D(I, \Phi^*(I))$; ce qui peut être un problème fort complexe.

Nous considérons maintenant un cas particulier, celui d'un régime permanent, avec des investissements continus. En procédant à l'inverse du cas général, c'est-à-dire en se donnant les Φ, et en leur associant les investissements optimaux, puis en minimisant $D(I^*(\Phi), \Phi)$ par rapport à Φ, nous montrerons que l'on aboutit à un simple problème de transport.

a) La notion de coût de développement *

Dans la théorie de la décision, on sait qu'il existe deux langages différents, qui peuvent être rendus équivalents, et qui conduisant à l'optimum : celui de la dépense actualisée, et celui de l' amortissement - Le paragraphe B1 utilisait le premier, nous allons maintenant employer le second -

Les conditions dans lesquelles nous nous plaçons sont les suivantes :

1º) nous considérons un régime permanent de durée illimitée.

2º) nous étudions un type d'installations pouvant varier de façon continue, chaque installation étant complètement définie par sa capacité K. Pour des capacités pas trop faibles, cette hypothèse est loin d'être irréaliste.

---

* Pour un exposé théorique complet sur la question, le lecteur pourra se reporter à l'article de M. Boiteux : "La tarification des demandes en pointe : application de la théorie de la vente au coût marginal", paru dans la Revue Générale de l'Electricité , août 1949, t.58. p:321-340, ou à l'ouvrage de J. Lesourne :"Technique économique et gestion industrielle", chapitre X -

.../...

3º) Le type de développement que nous considérons est le type nº (3º) du paragraphe précédent, c'est-à-dire qu'à la fin de la durée de vie d'une installation de capacité K_1, on la remplace par une installation de capacité $K_2 > K_1$. Cependant, nous nous sommes placés dans les conditions qui assurent l'équivalence des trois types de développement étudiés ; le formalisme auquel nous aboutirons sera donc toujours valable.

Considérons la courbe D(q,K), avec K donné, et q variable, représentant les dépenses totales annuelles relatives à une installation de capacité K pour un débit q (fig. ⑥)

Ces dépenses totales comprennent :

- les amortissements et charges financières (que l'on peut considérer comme des provisions pour renouvellement) = A(K)

- des dépenses réelles fixes = D_f (K)

- des dépenses variables = $\int_0^q C(K,q)dq$

avec C(K,q) = coût marginal à court terme de l'installation de capacité K, pour un débit q -

La grande critique faite d'habitude à la méthode que nous exposons maintenant est le fait que, puisque l'on veut raisonner sur une année et non sur la période totale, on est obligé d'amortir d'une manière tout à fait conventionnelle et certainement pas "optimale", à savoir par annuité constante - Si T est la durée de vie de l'installation, et $\mathcal{I}(K)$ son coût, on a :

$$\left.\begin{aligned} A(K) &= \mathcal{I}(K) \times \left(\frac{i}{1-(1+i)^{-T}}\right) \\ \text{qui est équivalent à :} \quad \mathcal{I}(K) &= \frac{A(K)}{1+i} + \ldots\ldots + \frac{A(K)}{(1+i)^T} \end{aligned}\right\} \quad B2 - 1$$

Nous verrons que cette critique n'a pas de poids en ce qui concerne le problème que nous traitons.

Considérons maintenant l'ensemble des courbes D(q,K) lorsque K varie : il admet une enveloppe (figure ⑥), qui touche chaque courbe D(q,K) en un point d'abscisse q_m - Nous souvenant que nous n'avons pas encore d'éfini la "capacité"K, nous prendrons $K = q_m$ - La courbe enveloppe a donc pour équation D(K,K).

.../...

Il résulte des propriétés de l'enveloppe qu'il est impossible de produire une quantité K en consentant des dépenses inférieures à D(K,K). De plus, les dépenses minimum sont obtenues lorsque l'on possède une installation de capacité K, c'est-à-dire une installation dont la capacité est exactement adaptée au niveau de production - La courbe enveloppe est donc la courbe représentative des dépenses lorsque l'on considère des installations de capacité variable et dont le niveau de production est égal à la capacité. La pente de cette droite se nomme : coût marginal à long terme ; il peut être de développement ou de régression suivant le sens dans lequel on se déplace sur la courbe. Nous ne considérons que des coûts de développement.

b) calcul du coût de développement dans le cas d'installations inélastiques

On a alors la figure (7). La courbe enveloppe des courbes D(q,K) est le lieu de leur point anguleux .

Considérons une zône où le coût de développement est sensiblement constant : La courbe enveloppe est linéaire - Si d est le coût de développement, on a par exemple :

$$d = \frac{OA_2 + C_2K_2 - (OA_1 + C_1K_1)}{K_2 - K_1}$$

or $OA(K) = F(K)$(frais fixes) $= A(K) + D_f(K)$

on peut donc écrire :

B2 - 2

$$\begin{cases} d = \dfrac{\Delta A(K) + \Delta D_f(K)}{\Delta K} + \dfrac{C_2K_2 - C_1K_1}{K_2 - K_1} \\ = \dfrac{\Delta F}{\Delta K} + C' \end{cases}$$

en appelant $\Delta K = K_2 - K_1$

c) utilisation du coût de développement

Nous disposons d'une installation de capacité K_1 - Nous voulons calculer quelles seront les dépenses annuelles optimales si nous voulons faire face à un flux $\Phi > K_1$ (figure (8))

En B2a, nous avons vu que pour faire face à Φ l'optimum consistait à avoir une installation de capacité Φ - Les nouvelles dépenses annuelles seront donc : $F(\Phi) + C(\Phi)\,\Phi$, soit la projection verticale de $OA(\Phi) + A(\Phi)\,B(\Phi)$, qui est égale

.../...

à la projection verticale de $\overrightarrow{OA_1} + \overrightarrow{A_1B_1} + \overrightarrow{B_1B(\Phi)}$. Les dépenses annuelles peuvent donc s'écrire :

$$\boxed{F_1 + C_1K_1 + d(\Phi - K_1)} \quad B2 - 3$$

et ceci à l'optimum d'investissement. (Pour un investissement optimum nul, on a $\Phi < K_1$, et la dépense annuelle est : $F_1 + C_1\Phi$) - B2 - 3, compte tenu de B2 - 2, s'écrit :

$$\text{dépense annuelle} = F_1 + C_1K_1 + \frac{F(\Phi) - F_1}{(\Phi - K_1)}(\Phi - K_2)$$

$$+ C'(\Phi - K_1) = F_1 + C_1K_1 + (F(\Phi) - F_1) + C'(\Phi - K_1)$$

or, $F(\Phi) - F_1$ représente

- $D_f(\Phi) - D_{f1}$, soit le supplément de dépenses fixes supportées par la nouvelle installation, donc G-
- Plus $(A(\Phi) - A_1)$; soit l'amortissement du supplément d'investissement à consentir pour construire l'installation de capacité Φ au lieu de renouveler celle de capacité 1, ceci dans le cas (3º), soit l'amortissement de l'investissement à réaliser pour passer d'une capacité 1 à une capacité Φ, ceci dans les cas (1º) et (2º) -

$$\text{donc : } A(\Phi) - A_1 = \frac{\Delta I \times i}{1 - (1 + i)^{-T}} \quad (3º)$$

$$\text{ou} = \frac{I \times i}{1 - (1 + i)^{-T}} \quad (1º) \text{ et } (2º)$$

En résumé, chaque année, la dépense optimale pour un flux Φ relative à l'installation considérée, s'écrit :

$$F_1 + C_1K_1 + I(\text{ou } \Delta I) \times \frac{i}{1 - (1 + i)^{-T}} + G + C'(\Phi - K_1)$$

pour $\Phi > K_1$

Considérons une période qui est un multiple quelconque commun de toutes les durées de vie du problème, et cherchons la dépense totale actualisée sur cette période - On retrouve la quantité à minimiser de la formulation générale du problème, telle qu'elle est exposée en B1 -a, compte tenu de B1 - 5 - Mais la démarche suivie est différente - En effet, nous avons une même quantité à minimiser, qui est une fonction de deux types de variables : les investissements I, et les flots Φ : $D(I, \Phi)$. En B1, nous

.../...

avons cherché les $\mathbb{I}^*(I)$ optimaux pour des I données, puis minimisé par rapport à I : $\text{Min}_I\ D(I, \mathbb{I}^*(I))$ - Ici, nous avons fait l'inverse : nous avons cherché les $I(\mathbb{I})$ optimaux pour des $\mathbb{I}$ donnés : il nous reste à minimiser : $\text{Min}_{\mathbb{I}}\ D(I^*(\mathbb{I}), \mathbb{I})$.

Dans ces conditions, on peut dire qu'en <u>régime permanent infini</u> (ou pendant un multiple commun de toutes les durées de vie), compte tenu des hypothèses faites, le problème général d'investissements optimaux et d'acheminement optimal <u>est équivalent à un simple problème d'acheminement optimal</u>, lequel peut s'écrire : trouver, pour n'importe quelle année, les $\mathbb{I}^*$ optimaux qui minimisent :

B2 - 4

$$\left\{ \sum_{\substack{\text{tous les arcs} \\ \text{où } \mathbb{I} < K_1}} (F_1 + C_1\,\mathbb{I}) \right.$$

$$\left. + \sum_{\substack{\text{tous les arcs} \\ \text{où } \mathbb{I} \geq K_1}} (F_1 + C_1 K_1 + d(\mathbb{I} - K_1)) \right.$$

Nous allons montrer que ce problème est équivalent à un problème de transport.

d) <u>Equilavence avec un problème de transport</u>

Reprenons le réseau de la partie A, et <u>dédoublons tous les arcs susceptibles d'être développés</u>. A chaque arc i, de capacité K_i et de coût C_i, nous faisons correspondre un arc de développement, (au moyen d'un sommet supplémentaire, en ce qui concerne le graphe) de capacité infinie, et de coût d_i égal au coût de développement (Fig. ⑨). Considérons le problème de transport correspondant, et montrons qu'il est équivalent au problème formulé en B2 - 4

Le problème de transport consiste à minimiser le coût total :

$$\sum C_i \epsilon_i + \sum d_i \epsilon'_i$$

en appelant ϵ'_i le <u>fret qui</u> passe dans l'arc de développement i. Or, on a $\boxed{C_i \leq d_i}$ *, car C_i a été pris égal à la moyenne sur la période T des coûts marginaux à court terme croissant avec le temps : donc C_i est inférieur au coût marginal à court terme de la dernière année de vie, lequel est inférieur ou égal au coût de renouvellement** (propriété de la durée de vie optimale : en voir la démonstration au par. IV C 2 b) - Dans le problème de transport, l'arc i devra donc être saturé

* Si l'on est en rendement décroissant

** Lequel est lui-même inférieur au coût de développement, si l'on est en rendement décroissant. (Voir Par. IV D5)../...

pour que son arc de développement commence à être parcouru : le coût relatif à l'installation i sera donc :

B2 - 5

$$\begin{cases} C\mathcal{C} = C\Phi & \text{pour } \Phi < K \\ CK + d\mathcal{C}' = CK + d(\Phi - K) & \text{pour } \Phi > K \end{cases}$$

On retrouve bien B2 - 4, aux frais fixes F_1 près qui, on l'a vu, n'interviennent pas dans le problème.

D'autre part, les équations de Kirchhoff, dans le problème de transport, sont vérifiés par les $\mathcal{C}_i$ et par les $\mathcal{C}'_i$, donc par les Φ_i, qui seuls ont un sens physique.

Dans le cadre que nous nous sommes fixé, le problème des investissements optimaux et de l'acheminement optimal est donc équivalent à un problème de transport (donc à un programme linéaire).

c) généralisation aux structures de coûts convexes

Considérons une courbe de dépenses totale à court terme convexe, et une courbe enveloppe de développement convexe, et approximons les par un polygone convexe (figure 10)-
B2 - 3 devient :

Dépense annuelle pour un flux Φ:

$$\begin{aligned} & F_1 \\ + \ & C_1 \quad \text{Min } (\Phi, K_1) \\ + \ & C_2 \quad \text{Min } (\Phi - K_1, K_2 - K_1) && \text{si } \Phi > K_1 \\ + \ & d_1 \quad \text{Min } (\Phi - K_2, K_3 - K_2) && \text{si } \Phi > K_2 \\ + \ & d_2 \quad \text{Min } (\Phi - K_3, K_4 - K_3) && \text{si } \Phi > K_3 \\ + \ & d_3 \quad (\Phi - K_4) && \text{si } \Phi > K_4 \end{aligned}$$

Il est aisé de voir que le problème de transport correspondant comprendra 5 arcs superposés, de capacités K_1, K_2-K_1, K_3-K_2, K_4-K_3 et infini, de coûts $C_1 < C_2 < d_1 < d_2 < d_3$ - Mais cette méthode ne peut s'employer que si la convexité est vérifiée, donc si l'on est en situation d'efficiences décroissantes.

.../...

f) conclusion

Dans le cas d'un régime permanent infini, et d'investissements continus, l'utilisation du coût de développement permet d'aboutir à une formulation équivalente à celle de la dépense totale actualisée, (et ce, malgré la forme particulière d'amortissement qu'elle implique), mais beaucoup plus simple, car elle permet de rendre le problème équivalent à un problème de transport.

Il reste que l'hypothèse de continuité des investissements est assez restrictive - Cependant, la notion de coût marginal moyen (voir ouvrages de MM Boiteux et Lesourne cités) permet de résoudre cette difficulté, lorsque la distance entre deux discontinuités n'est pas trop grande par rapport à la zone de production à laquelle on s'interesse-(exemple des barges).

D'autre part, nous verrons plus loin que, dans une mesure assez limitée, ce modèle est capable de résoudre le cas des investissements discrets..

C - REGIMES PERMANENTS A HORIZON LIMITE

Plaçons nous maintenant dans le cas où le régime considéré est permanent pendant une durée n limitée, puis retombe à zéro ultérieurement. Si nous conservons au coût de développement sa valeur fondée sur l'amortissement à annuités constantes, et pendant la durée de vie économique de l'installation considérée, les critiques faites à son propos redeviennent valables. Aussi nous faut-il changer la valeur de ce coût de développement.

1 - Coût de développement et horizon n

L'idée de base doit être de retrouver, comme en B2c, la dépense totale actualisée.

On avait : $$d = \frac{I}{\Delta K} \times \frac{i}{1-(1+i)^{-T}} + \frac{G}{\Delta K} + c' \qquad C1\text{-}1$$

Il est aisé de voir, en refaisant la démonstration de B2c, qu'il suffit de remplacer T, durée de vie économique, par n, horizon considéré.

On a donc : $$d_n = \frac{I}{\Delta K} \times \frac{i}{1-(1+i)^{-n}} + \frac{G}{\Delta K} + c' \qquad C1\text{-}2$$

Le coût de développement augmente quand n décroît.
Le coût de développement calculé en C1-1 peut être appelé d_∞, car il correspond à un horizon infini : la durée sur laquelle on amortit est alors la durée de vie économique, qui peut varier d'une installation à l'autre.

2 - Cas particuliers

Dans un problème réel, un investissement de développement comprend plusieurs équipements I_1, I_2 ... I_j ..., de durées de vie différentes T_1, T_2 ... T_j, ... On a alors :

$$\left.\begin{aligned} d_\infty &= \sum_j \frac{I_j}{\Delta K} \times \frac{i}{1-(1+i)^{-T_j}} + \frac{G}{\Delta K} + c' \\ d_n &= \sum_j \frac{I_j}{\Delta K} \times \frac{i}{1-(1+i)^{-n}} + \frac{G}{\Delta K} + c' \\ &= \frac{i}{1-(1+i)^{-n}} \sum_j \frac{I_j}{\Delta K} + \frac{G}{\Delta K} + c' \end{aligned}\right\} \qquad C1\text{-}3$$

a) Problème des locations

Si, pour l'un ou plusieurs de ces équipements divers investis, l'éventualité suivante peut se produire :

- une fois les n années écoulées, l'équipement pourra servir à d'autres usages (exemples : la bande des com-

voyeurs, les barges des trafics port-centrale ...),

alors il faut considérer que ce ou ces équipements ℓ sont loués, et les amortir sur leur durée de vie économique. On a alors :

$$\text{Cl-4} \quad \begin{cases} d_n = \dfrac{i}{1-(1+i)^{-n}} \displaystyle\sum_j \dfrac{I_j}{\Delta K} \\ + \displaystyle\sum_\ell \dfrac{I\ell}{\Delta K} \times \dfrac{i}{1-(1+i)^{-T\ell}} \quad \text{(équipements loués)} \\ + \dfrac{G}{\Delta K} + c' \end{cases}$$

b) Problème des renouvellements

Il se pose si l'horizon n est supérieur à la durée de vie de certains équipements investis, et non multiple de cette durée de vie.

Considérons en effet un investissement I de durée de vie T, et déterminons l'annuité d'amortissement correspondant à l'horizon courant n , en tenant compte des renouvellements tous les T ans.

On a : $A(n) = \sum_{j=0}^{j=k} \dfrac{I}{(1+i)^{jT}} \times \dfrac{i}{1-(1+i)^{-n}}$ avec k = quotient par défaut de n par T

La courbe représentative de A(n) (figure 11) présente des discontinuités pour n = kT

La courbe représentative des charges totales annuelles relatives à cet investissement I (donc du coût de renouvellement correspondant, à condition d'inclure dans A les frais fixes) s'obtient en ajoutant à la précédente le coût moyen d'exploitation sur la durée de vie : C_m . Pour la période 0 - T, par exemple, on a :

$$d(t)\int_0^t e^{-it}\,dt = I + \int_0^t c(t)\,e^{-it}\,dt$$

$$\text{d'où} \quad d(t) = I \times \frac{i}{1-e^{-it}} + C_m \qquad [C\ 1-5]$$

$$\text{avec} \quad C_m \int_0^t e^{-it}\,dt = \int_0^t C(t)e^{-it}\,dt$$

Le minimum de d(t) se produit pour T, par définition:

pour T , $\frac{d(d)}{d(t)} = 0$ donc $d(T)e^{-it} = C(T)\ e^{-it}$

et $d(T) = C(T)$

Donc, pour T :

$$d = d(T) = I \times \frac{i}{1-e^{-it}} + C_m = C\ (T) \qquad C1\text{-}6$$

d = d(T) est le coût de renouvellement au sens strict, celui qui correspond à la durée de vie.

En fait, la courbe de d(n) ne présente pas d'aussi fortes discontinuités, car pour n peu supérieur à kT , on préfèrera conserver l'ancienne installation, et payer comme charges annuelles C(T + n - kT) (sans amortissement, car l'installation est déjà amortie), que renouveler. La courbe des dépenses totales annuelles est donc en fait une courbe en vagues, comme indiqué sur la figure (11). Son équation est :

$$C1 - 7 \qquad \text{Min} \begin{cases} \sum_{j=o}^{j=k} \frac{I}{(1+i)^{jT}} \times \frac{i}{1-(1+i)^{-n}} + C_m \\ C\ (T + n - kT) \end{cases}$$

avec k = quotient par défaut de n par T

(Ces deux quantités sont égales pour n multiple de T)

Considérons maintenant deux installations de durées de vie différentes : si nous cherchons celle qui présente les charges annuelles les plus faibles (donc le coût de développement le plus faible), la réponse varie indéfiniment quand n décroît de l'infini à 0, du fait de la forme accidentée des courbes (figure (12))

Ainsi, pour éviter les problèmes qui naissent des renouvellements, il sera utile de considérer un horizon n maximum <u>inférieur à la plus courte des durées de vie envisagées</u> (sauf en ce qui concerne certains matériels, comme les bandes de convoyeur, de faible importance, et que nous considérons comme loués). En fait, nous prendrons n $\leqslant$ 14 ans, tout en considérant en plus le cas n = ∞

D - COMPLEXITE DU PROBLEME ETUDIE

Grâce à notre modèle, qui se présente sous la forme d'un réseau de transport, ou d'un programme linéaire, nous savons parfaitement résoudre le cas des régimes permanents de durée limitée n . Là s'arrêtent théoriquement nos possibilités.

Pratiquement, l'outil de calcul dont nous disposons est un programme linéaire écrit sur ordinateur, paramétrable. Un seul paramètre est autorisé, et il peut porter

- soit sur la fonction économique, c'est-à-dire sur les coûts
- soit sur les seconds membres, c'est-à-dire les entrées, sorties et contraintes.

Nous chercherons à traiter le problème général d'un régime non permanent en nous ramenant à ce que nous savons faire, compte tenu de l'outil dont nous disposons.

1 - REGIME NON PERMANENT

Le problème réel comporte :

- des sorties, les consommations des centrales, qui sont variables avec le temps, et qui sont en partie déterminées, dans la mesure où elles ne peuvent prendre leurs suites de valeurs que parmi un nombre fini de séries chronologiques (et même complètement déterminées pour les centrales de Champagne, de Porcheville et de Vitry).

- des entrées, les importations et le charbon français, qui, elles, sont absolument libres à l'intérieur d'un domaine de variations défini dans le chapitre III.

Tenant compte de ce qui précède, deux attitudes sont alors possibles :

a) la première conduit à utiliser la paramétrisation de la fonction économique, c'est-à-dire des coûts.

On se donne un régime permanent d'entrées et de sorties. Pour les sorties, ce régime permanent sera la consommation moyenne sur une certaine période. Pour les entrées, ce sera un régime quelconque compatible en valeurs et en durée avec le domaine de variations permis. On se propose alors de rechercher comment le chemin optimal (arcs d'exploitation et arcs de développement) varie quand la durée n de ce régime permanent varie de sa valeur maximum N (pris égale à 14 ans) à 0 .

Montrons que lorsque n varie, la fonction économique varie linéairement en fonction d'un seul paramètre, lui-même fonction de n .

On a : fonction économique pour n

$$= \mathcal{F}(n) = \sum c_j \mathcal{C}_j + \sum d_{j,n} \mathcal{C}'_j$$

or : $d_{j,n} = a_j + b_j \dfrac{i}{1-(1+i)^{-n}}$ D1 - 1

en posant : $a_j = C' + \dfrac{G}{\Delta K} + \sum_e \dfrac{I_e}{\Delta K} \dfrac{i}{1-(1+i)^{-T_e}}$

et $b_j = \sum_j \dfrac{I_j}{\Delta K}$ (voir formule C 1 - 4)

Donc $\mathcal{F}(n) = \sum c_j \mathcal{C}_j + \sum a_j \mathcal{C}'_j + \dfrac{i}{1-(1+i)^{-n}} \sum b_j \mathcal{C}'_j$

$\mathcal{F}(n)$ varie donc linéairement en fonction du paramètre $\dfrac{i}{1-(1+i)^{-n}}$, fonction de n .

Grâce à la paramétrisation de la fonction économique, il sera donc possible de déterminer comment varie le chemin optimal lorsque n varie de N à 0 . (Le cas n infini devra être exploré à part)

Pratiquement, il suffira (figure 13) de séparer les arcs de développement en deux arcs, l'un supportant le coût indépendant de n, a_j , l'autre le coût dépendant de n .

b) La deuxième attitude conduit à utiliser la paramétrisation des seconds membres (entrées et sorties).

C'est en fait la méthode que nous utiliserons : le lecteur est prié de se reporter au chapitre suivant : "Application au problème".

On étudie les chemins optimaux pour des régimes permanents de durée n compatibles avec la réalité, et on se sert de la parametrisation pour explorer plus rapidement tout le domaine du possible.

2 - ETUDE DE LA SENSIBILITE AUX COUTS

La paramétrisation de la fonction économique permet de déterminer comment varie le chemin optimal (pour un régime permanent donné) lorsque tel coût ou tel ensemble de coûts varie.

3 - PROBLEME DES INVESTISSEMENTS DISCRETS

On peut, grâce au modèle, résoudre le problème des investissements discrets, mais à condition qu'un seul arc soit concerné.

Soit une installation existante, de coût C_1 et de capacité K_1 . Pour un supplément de frais fixes et d'amortissements ΔF par an, on peut la développer, et la porter à une capacité K_2 , avec un coût C_2 . Aucune installation intermédiaire n'est prévue(figure 14)

Soit un flux Φ qui passe dans la nouvelle installation, avec $K_1 < \Phi < K_2$

Nous appellerons coût marginal de développement relatif à Φ, le coût x , tel que :

$$(F_1 +)\ C_1 K_1 + x\ (\Phi - K_1) \qquad D\ 1 - 2$$

représente bien la dépense totale annuelle. Remarquons que si l'on se trouve dans le développement du type 1º de B_1 (exemple: 2ème poste minéralier du Havre), il n'est pas forcément vrai que le flot total Φ se partagera en :

K_1 dans l'ancienne installation

et $\Phi - K_1$ dans l'unité supplémentaire d'exploitation.

Cependant, dans tous les cas, nous garderons la relation de définition D 1 - 2, qui donne à x le rôle d'un coût marginal : si l'on veut faire passer un supplément de flot $(\Phi - K_1)$, <u>par rapport à l'ancienne situation</u> cela coûtera x par tonne supplémentaire.

<u>Calcul de x</u> : On a : $\Delta F + C_2 \Phi = C_1 K_1 + x\ (\Phi - K_1)$

$$\text{d'où :} \quad x = \frac{\Delta F}{\Phi - K_1} + \frac{C_2 \Phi - C_1 K_1}{\Phi - K_1}$$

$$x - C_2 = \frac{\Delta F}{\Phi - K_1} + \frac{K_1 (C_2 - C_1)}{\Phi - K_1} \qquad \left(= (d - C_2) \times \frac{K_2 - K_1}{\Phi - K_2} \right)$$

$$x = C_2 + \frac{H}{\varphi_d} \qquad D\ 1 - 3$$

$$= C_2 + y$$

en posant $H = \Delta F + K_1 (C_2 - C_1)$

et $\varphi_d = \Phi - K_1$: flot qui passe dans l'arc de développement.

Dans le réseau de transport, séparons l'arc de développement en deux arcs (figure 15), l'un supportant le coût C_2, l'autre un coût inversement proportionnel au flot qui y passe, $y = \frac{H}{\varphi_d}$

Paramétrons alors ce coût y , et étudions comment varie le chemin optimal lorsque y varie, et en particulier comment varie le flot φ_d qui passe dans l'arc en fonction de y . Le résultat est une fonction en escalier décroissante, comme l'indique la figure 16 - Chaque fois que la courbe repré-

sentative coupe $y = \frac{H}{\gamma_d}$, on a un coût de développement compatible avec le flot qui passe . Par exemple, sur la figure 16, il y a deux solutions admissibles : le point A, et $\gamma_d = 0$, $y = \infty$. De toutes les solutions admissibles, il faut alors considérer celle qui conduit au coût total le plus faible pour obtenir l'optimum.

4 - ETUDE DE LA RENTABILITE PROPRE DES INVESTISSEMENTS

Etudions la rentabilité d'un investissement qui porte la capacité d'une installation de K_1 à K_2 (il ne s'agit plus de savoir si cet investissement est plus rentable là où on l'a fait qu'un autre investissement ailleurs).

a) si K_2 est saturé (cas des régimes permanents et investissements continus)

Le coût de développement d est le coût marginal de l'opération. Pour obtenir un tonnage supplémentaire (K_2-K_1), il faut consentir une dépense annuelle marginale de d par tonne. La rentabilité s'écrit en écrivant que d est inférieur à la recette marginale, c'est-à-dire au tarif, s'il en existe un.

$d < p$ p étant le tarif

Il peut être intéressant de voir comment évolue cette rentabilité en fonction de la durée n du régime permanent : il existe un N limite, tel que :

pour $n > N$, $d_n < p$: investissement rentable
pour $n < N$, $d_n > p$: investissement non rentable

Dans la pratique, les tarifs sont mal définis. Aussi, pour tout investissement que nous considérons, nous mettrons en évidence le coût marginal d_n , et le centre de décision pourra décider lui-même de la rentabilité, en comparant ce coût au tarif qu'il peut espérer.

b) cas des investissements discrets (exemple : voir étude des coûts du Havre, au chapitre VI)

La relation de rentabilité s'écrit ici :

$$x(n, \Phi) < p \quad \text{avec} \quad x(n, \Phi) = \frac{\Delta F(n)}{\Phi - K_1} + \frac{K_1(C_2 - C_1)}{\Phi - K_1}$$

Elle définit une zone dans le plan n, Φ , donc un domaine de régimes permanents de durées variables, qui rend l'opération rentable.

5 - Le modèle et les rendements croissants

Nous avons vu que la condition nécessaire et suffisante pour que le modèle fonctionne correctement est que le coût marginal à court terme soit inférieur ou égal au coût de développement.

Si l'on est en rendements décroissants ou constants, cette condition est vérifiée, comme on l'a vu : en effet, le coût marginal à court terme est inférieur au coût de renouvellement, lequel est inférieur au coût de développement.

Si l'on est en rendements croissants, le coût de développement est inférieur au coût de renouvellement, mais il se peut que le coût marginal à court terme soit encore inférieur au coût de développement. Montrons le sur un exemple simple :

Soit une gamme d'installations, caractérisées complètement par leur capacité K, et soit une installation existante, de capacité Ko -

Supposons que l'on ait :

- coût marginal à court terme : $c(K) = \frac{a}{K} + b$
- amortissements annuels : $A(K) = mK + p$

soit : $\frac{A(K)}{K} = m + \frac{p}{K}$

Le coût de développement, si on remplace (Ko) par K à la fin de sa durée de vie, est :

$$d = \frac{A(K) - A(Ko)}{K - Ko} + \frac{c(K)\,K - c(Ko)\,Ko}{k - Ko}$$

$$= m + b = \text{constante}$$

Le coût de renouvellement serait : $\frac{a}{Ko} + b + m + \frac{p}{Ko} > d$

On est bien en rendements croissants.

Cependant, le coût marginal à court terme $(\frac{a}{Ko} + b)$ peut être inférieur au coût de développement $(m + b)$, si :

.../...

$$Ko > \frac{a}{m}$$

($\frac{a}{m}$ est de l'ordre de 2 millions de tonnes pour les installations portuaires).

Si donc l'installation initiale considérée est suffisamment importante, le modèle fonctionnera bien qu'on soit en rendements croissants.

C H A P I T R E V

APPLICATION AU PROBLEME

P L A N

A. - RESEAU DE TRANSPORT ET EQUATIONS DU PROBLEME

1. Le réseau de transport associé au problème
   a) Graphe ATICHAR
   b) Signification physique du graphe ATICHAR
2. Equations du problème
   a) Equations de conservation
   b) Equations de positivité
   c) Equations de capacité
   d) Equations diverses
   e) Equations d'entrée - sortie

B. - ANALYSE DETAILLEE

1. Transport maritime
   a) Arrivée du 85.000 tonnes
   b) Remontée à Rouen sans allègement
   c) Influence des marées sur la remontée à Rouen
   d) Remontée à Rouen avec 15.500 tonnes de port en lourd
   e) Remontée à Rouen avec 14.000 tonnes de port en lourd

.../...

2. Manutentions au port du Havre

   a) Arcs concernés

   b) Equations

3. Manutentions au port de Rouen

   a) Utilisation des portiques dans leur état actuel

   b) Amélioration des portiques

   c) Installations de portiques supplémentaires

   d) Installation d'un poste de rechargement de trains ou de péniches

   e) Equations de conservation et de capacité

   f) Les équations de transbord

4. Transport fluvial

   a) Arcs concernés

   b) Equations

5. Transport ferroviaire

   a) Arcs concernés

   b) Equations

6. Manutentions terminales

7. Equations d'entrée et de sortie

C. - CHOIX DES PARAMETRES

C H A P I T R E V

APPLICATION AU PROBLEME

A. - RESEAU DE TRANSPORT ET EQUATIONS DU PROBLEME -

1. Le réseau de transport associé au problème

a) Graphe ATICHAR

On a vu au chapitre IV (cf. paragraphe IV A 1) que, puisqu'il y a conservation de la matière transportée, il est possible de représenter les possibilités d'acheminement du charbon par un réseau de transport. On a vu également (cf. paragraphe IV B 2 d) que, là où il est possible d'investir pour faciliter cet acheminement, on dédouble l'arc correspondant du réseau au moyen d'un arc dit de développement.

C'est le réseau complet, que l'on obtient en fin de compte, que nous représentons ici, sous le nom de graphe ATICHAR. Dans ce graphe,

- les arcs en trait continu représentent des opérations de manutention ou de transport pouvant être effectuées soit avec des équipements existants, soit avec des équipements susceptibles d'être loués (autrement dit, dont le coût à la tonne ne varie pas avec l'horizon que l'on se donne, cf. paragraphe IV C 1)
- les arcs en tireté représentent des opérations que l'on pourrait effectuer à condition de faire un investissement, ce qui implique que leur coût à la tonne augmente quand l'horizon donné diminue (cf. paragraphe IV C 1)
- les sommets représentent des étapes d'acheminement du charbon. Leurs sigles (AHA, SRO, FCH, VITC) ont des significations simples : Arrivée au Havre, Stock de Rouen, Arrivée par Fer à CHampagne, VItry-Centrale.

.../...

b) Signification physique du graphe ATICHAR

L'acheminement d'un tonnage déterminé de charbon américain, polonais ou français vers les centrales se traduit, dans le graphe ATICHAR, par le fait qu'il passe un tonnage déterminé (éventuellement nul) dans chacun des arcs. La variable : "tonnage passant dans l'arc" prendra le nom qui figure sur l'arc dans le graphe, par exemple (USAHA) ou (1SHAF) etc ...

Naturellement, il convient d'expliquer pourquoi le graphe est tel que nous le représentons : c'est ce qui est fait en B, Analyse détaillée.

2. Equations du problème

Les variables associées aux arcs (qui sont les trafics annuels correspondant à chaque opération) satisfont à diverses équations. Un premier type d'équations est le type normal pour un problème de transport : il s'agit des équations de conservation, de positivité et de capacité. Mais la nature du problème est plus complexe à cause de particularités du transport maritime entre Le Havre et Rouen (cf. V B 1) et de la manutention dans les ports (cf. V B 2 et V B 3) ; ces particularités seront traduites par les équations diverses. Enfin, le fait que les trois sortes de charbon envisagées n'aient pas le même P.C.S. donne un aspect particulier aux équations d'entrée-sortie (cf. V B 7 et V C : choix des paramètres)

a) Equations de conservation

AHA	(USAHA) + (ESAHA) + (ALAHA) + (AFAHA) - (1APHA) - (2APHA) = 0
AL	(ESAL) - (ALAHA) - (6ALARO) = 0
AF	(ESAF) - (AFAHA) - (5AFARO) = 0
ARO	(6ALARO) + (5AFARO) + (ESARO) + (5ESARO) + (6ESARO) - (1APRO) - (2APRO) - (3APRO) = 0
PHA	(1APHA) + (2APHA) - (2PHAVC) - (1TRHAO) - (1PSHA) - (2PSHA) - (1TRHAF) = 0
PRO	(~~1APRO~~)* + (2APRO) + (3APRO) - (1TRROO) - (2TRROO) - (1PSRO) - (1TRROF) - (2TRROF) = 0

* La raison pour laquelle certaines variables ont été supprimées est donnée en VI B 3.

.../...

SHA	(1PSHA) + (2PSHA) - (1SHAO) - (2SHAO) - (1SHAF) - (2SHAF) = 0
SRO	(1PSRO) - (1SROO) - (2SROO) - (2SBRO) - (1SROF) - (2SROF) = 0
BRO	(2SBRO) - (2BROO) - (2BROF) = 0
HAO	(1TRHAO) + (1SHAO) + (2SHAO) - (HAOPO) - (HAOCH) - (HAOVI) = 0
HAF	(1SHAF) = (2SHAF) + (1TRHAF) - (HAFPO) - (HAFCH) - (HAOVI) = 0
ROO	(1TRROO) + (2TRROO) + (1SROO) + (2SROO) + (2BROO) - (ROOPO) - (ROOCH) - (ROOVI) = 0
ROF	(1TRROF) + (2TRROF) + (1SROF) + (2SROF) + (2BROF) - (ROFPO) - (ROFCH) - (ROOVI) = 0
OPO	(HAOPO) + (ROOPO) - (1OPORC) = 0
FPO	(HAFPO) + (ROFPO) + (CFPO) - (1FPORC) = 0
OCH	(HAOCH) + (ROOCH) - (2OCHAC) = 0
FCH	(HAFCH) + (ROFCH) + (CFCH) - (1FCHAC) = 0
OVI	(HAOVI) + (ROOVI) - (2OVITC) = 0
FVI	(HAFVI) + (ROFVI) + (CFVI) - (2FVITC) = 0

b) Equations de positivité

Tous les flots parcourant les arcs doivent être positifs, d'où :

1P (USAHA) $\geq$ 0

jusqu'à :

58P (2FVITC) $\geq$ 0

c) Equations de capacité (cf. B Analyse détaillée)

31 APHA : (1APHA) $\leq$ 4.000 (en kT)

31 PSHA : (1PSHA) $\leq$ 4.000

31 SHAO : (1SHAO) $\leq$ 4.000

31 SHAF : (1SHAF) $\leq$ 4.000

.../...

32 KRO : (1APRO) + (2APRO) + (1SROO) + (2SROO) + (1SROF) + (2SROF) $\leqslant$ 2.500

31 OPOR : (1OPORC) $\leqslant$ 1.500

31 FPOR : (1FPOR) $\leqslant$ 3.000

31 FCHA : (1FCHA) $\leqslant$ 3.000

d) Equations diverses (cf. par. V B 1, V B 2, V B 3)

4 TRLH : (1TRHAO) + (1TRHAF) - 0,05 (USAHA) - 0,05 (ESAHA) $\leqslant$ 0

5 TROLH : (1TRHAO) - 0,05 (1SHAO) - 0,05 (2SHAO) $\leqslant$ 0

6 TRFLH : (1TRHAF) - 0,05 (1SHAF) - 0,05 (2SHAF) $\leqslant$ 0

4 TORO : 0,7 (1TRROO) + 0,7 (2TRROO) - 0,3 (1SROO) - 0,3 (2SROO) $\leqslant$ 0

5 TFRO : (1TRROF) - 0,28 (1APRO) - 0,28 (2APRO) - 0,28 (3APRO) $\leqslant$ 0

6 TFRO : 0,3 (1TRROF) + 0,3 (2TRROF) - 0,7 (1SROF) - 0,7 (2SROF) $\leqslant$ 0

4 MAR : 0,47 (ESARO) - (5ESARO) - (5AFARO) $\geqslant$ 0

5 MAR : 0,47 (ESARO) - (5ESARO) - (5AFARO) $\leqslant$ 150 (en kT)

6 MAR : (5ESARO) + (5AFARO) - 1,08 (6ESARO) - 1,08 (6ALARO) $\geqslant$ 0

7 MAR : (5ESARO) + (5AFARO) - 1,08 (6ESARO) - 1,08 (6ALARO) $\leqslant$ 70

4 AF : (AFAHA) - o,097 (5AFARO) = 0

5 AL : (ALAHA) - 0,214 (6ALARO) = 0

e) Equations d'entrée - sortie
(Voir V. C Choix des paramètres pour ces équations)

USA : (USAHA) = US

EST : (ESAHA) + (ESAL) + (ESAF) + (ESARO) + (5ESARO) + (6ESARO) = EST

CFEST : 1,05 (ESAHA) + 1,05 (ESAL) + 1,05 (ESAF) + 1,05 (ESARO) + 1,05 (5ESARO) + 1,05 (6ESARO) + 0,96 (CFPO) + 0,96 (CFCH) + o,96 (CFVI) = CFEST

1 SHAVC : 1,11 (2PHAVC) $\geqslant$ LH

2 SHAVC : 1,05 (2PHAVC) $\leqslant$ LH

.../...

1 SPORC : 0,96 (CFPO) + 1,11 (HAOPO) + 1,11 (HAFPO)
+ 1,05 (ROOPO) + 1,05 (ROFPO) $\geq$ P

2 SPORC : - 0,09 (CFPO) + 1,05 (1OPORC) + 1,05 (1FPORC) $\leq$ P

1 SCHAC : 0,96 (CFCH) + 1,11 (HAOCH) + 1,11 (HAFCH)
+ 1,11 (ROOCH) + 1,11 (ROFCH) $\geq$ C

2 SCHAC : - 0,09 (CFCH) + 1,05 (2OCHAC) + 1,05 (1FCHAC) $\geq$ C

1 SVITC : 0,96 (CFVI) + 1,11 (HAOVI) + 1,11 (HAVI)
+ 1,11 (ROOVI) + 1,11 (ROFVI) $\geq$ V

2 SVITC : - 0,09 (CFVI) + 1,05 (2OVITC) + 1,05 (1FVITC) $\leq$ V

B. - ANALYSE DETAILLEE -

Cette section analyse en détail, et opération par opération, l'acheminement du charbon jusqu'aux centrales. Cette analyse justifie d'une part le graphe ATICHAR, et d'autre part les équations présentées à la section A précédente.

1. Transport maritime

Les arcs concernés sont :

USAHA, ESAHA, ESAL, ESAF, ESARO, 5ESARO, 6ESARO, AFAHA, 5AFARO, ALAHA, 6ALARO.

Les opérations représentées par ces arcs sont le transport du charbon, depuis le moment où le minéralier pénètre dans l'estuaire du Havre jusqu'à celui où il est à quai, soit à Rouen, soit au Havre.

a) Arrivée du 85.000 tonnes : USAHA

Cet arc représente l'arrivée au poste minéralier du Havre du 85.000 tonnes.

b) Remontée à Rouen sans allègement

Cette remontée par un minéralier chargé à 17.000 tonnes (limite due aux ports polonais) est représentée par l'arc ESARO.

c) Influence des marées sur la remontée à Rouen

Les minéraliers de 18.000 tonnes ne peuvent pas remonter jusqu'à Rouen avec 17.000 tonnes de port en lourd par toutes marées. Nous avons considéré trois types de marées, α, β, et γ, qui permettent respectivement un port en lourd maximum de 17.000 tonnes, 15.500 tonnes et 14.000 tonnes. Le tableau suivant permet de connaître le tonnage remonté, selon les types de marée, par un navire affrété sur le courant Pologne/Rouen.

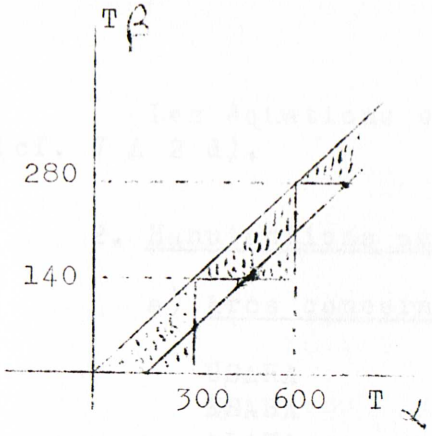
.../...

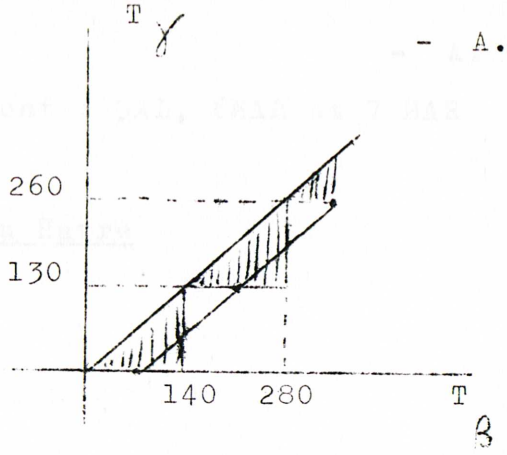
Type de marée	Tirant d' eau autorisé (M)	% des marées annuelles	Nombre de pleines mers/an	Port en Lourd (T)	Temps moyen de déchargt. (cycles de marées)	Nombre max arrivées bateaux	Nombre max. (moyen) arrivées 1 bateau	Tonnage max. remonté (T)
α	7,2 + 2,4 = 9,6	50	285	17.000	3,5	85	17,5	300.000
β	6,6 + 2,4 = 9,o	24	140	15.500	3	43	9	140.000
γ	6,o + 2,4 = 8,4	26	145	14.000	3	47	9,5	130.000

Dans ce tableau, le tirant d'eau et le pourcentage de marées annuelles sont donnés par l'Annuaire des marées pour le Port de Rouen, les 2,40 M correspondant à la profondeur du chenal qui sera obtenue à la fin du Vème Plan. Le temps moyen de déchargement est étudié au chapitre suivant (par. VI B 1), et le nombre maximum d'arrivées d'un bateau affrété s'obtient en sachant qu'il effectue environ 36 rotations par an.

Si alors on suppose que pour acheminer un certain tonnage, on affrète d'abord un navire, puis un second, etc ... en les faisant arriver d'abord pour les marées α , puis les marées β , etc ... on obtient comme domaines de tonnages possibles (en kT) :

.../...





Ces domaines (les zones hachurées) seront représentés par les équations suivantes :

$$\frac{140}{300}\ (T_\alpha - 150) \leqslant T_\beta \leqslant \frac{140}{300}\ T_\alpha$$

$$\frac{130}{140}\ (T_\beta - 70) \leqslant T_\gamma \leqslant \frac{130}{140}\ T_\beta$$

d) <u>Remontée à Rouen avec 15.500 T de port en lourd</u>

Cette remontée peut s'effectuer

- après allègement faible :

  avec ESAF, puis AFAHA pour le charbon allégé, et 5AFARO pour le charbon remonté jusqu'à Rouen ;

- en partant de Pologne avec 15.500 tonnes de port en lourd seulement : arc 5ESARO

les équations en jeu sont :

4 AF : $\frac{\text{AFAHA}}{1.500} = \frac{\text{5AFARO}}{15.500}$

4 MAR : $\frac{140}{300}\ (\text{ESARO}) \geqslant (\text{5ESARO}) + (\text{5AFARO})$

5 MAR : $\frac{140}{300}\ (\text{ESARO} - 150) \leqslant (\text{5ESARO}) + (\text{5AFARO})$

e) <u>Remontée à Rouen avec 14.000 T de port en lourd</u>

Les arcs ESAL, ALAHA, 6ALARO et 6ESARO remplacent ici les arcs ESAF, AFAHA, 5AFARO et 5ESARO, avec les mêmes significations respectives, mutatis mutandis.

.../...

Les équations en jeu sont : 5AL, 6MAR et 7 MAR (cf. V A 2 d).

2. Manutentions au port du Havre

a) Arcs concernés :

USAHA
ESAHA
ALAHA
AFAHA
1APHA
2APHA
1PSHA
2PSHA
2PHAVC
1TRHAO
1TRHAF
1SHAO
2SHAO
1SHAF
2SHAF

Les arcs USAHA, ESAHA, ALAHA et AFAHA ont été introduits, rappelons le, au paragraphe précédent.

L'arc 1APHA représente l'opération de déchargement jusqu'au moment où le charbon est sur la bande (acheminement vers le parc ou vers la centrale), ou sur le bateau (transbord).

L'arc de développement correspondant est 2APHA.

L'arc 2PHAVC représente le transport du charbon vers la centrale : c'est un arc de développement, car il faut construire le convoyeur et une tour d'angle.

L'arc 1PSHA représente le transport du charbon jusqu'au parc de stockage. Son développement, représenté par l'arc 2PSHA, peut consister en la construction d'un convoyeur reliant le deuxième et éventuel poste minéralier au parc de stockage.

L'arc 1SHAO représente l'opération de rechargement sur eau, depuis la reprise sur le stock jusqu'à la mise sur barges. L'arc de développement correspondant est 2SHAO.

L'arc 1SHAF représente l'opération de rechargement sur wagons, 2SHAF son développement.

.../...

Les arcs 1TRHAO et 1TRHAF représentent, associés à l'arc 1APHA (et éventuellement 2APHA), les opérations de transbord direct sur barges et sur wagons.

b) Equations

- Equations de conservation
- Inéquations de capacité : la capacité de manutention au poste minéralier du Havre a été prise à 4 millions de tonnes (déchargement d'un 85.000 tonnes en 13 shifts).

On a donc :

1APHA $\leq$ 4.000
1PSHA $\leq$ 4.000
1SHAO $\leq$ 4.000
1SHAF $\leq$ 4.000

en milliers de tonnes.

- On a limité les possibilités de transbord à 5 % du trafic.

On a donc :

5TROLH : (1TRHAO) - 0,05 (1SHAO) - 0,05 (2SHAO) $\leq$ 0

5TRFLH : (1TRHAF) - 0,05 (1SHAF) - 0,05 (2SHAF) $\leq$ 0

D'autre part, le charbon qui provient de l'allègement de minéraliers de 18.000 tonnes ne sera certainement pas transbordé directement, car on transborde de préférence à la fin du déchargement d'un bateau, lorsque le rythme est faible. Il faut donc supprimer la possibilité du transbord pour le charbon qui arrive par les arcs ALAHA et AFAHA ; d'où l'inéquation :

4TRLH : (1TRHAO) + (1TRHAF) - 0,05 (USAHA) - 0,05 (ESAHA) $\leq$ 0

3. Manutentions au port de Rouen

Les arcs concernés sont : 1APRO, 2APRO, 3APRO, 1PSRO, 1TRROO, 2TRROO, 1TRROF, 2TRROF, 1SROO, 2SROO, 1SROF, 2SROF, 2SBRO, 2BROO et 2BROF.

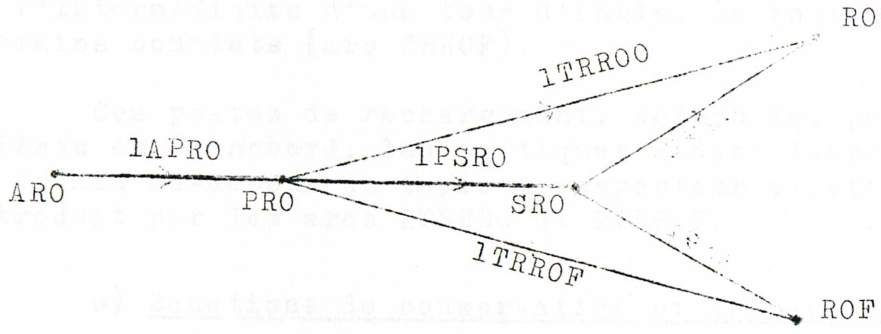
Le problème particulier que posent les manutentions au port de Rouen (CRD) est que les opérations ne correspondent pas à des équipements individualisés : en effet, ce sont les

.../...

mêmes portiques qui effectuent le déchargement, la mise sur parc et la reprise, et le rechargement.

a) Utilisation des portiques dans leur état actuel

Elle peut être représentée par le schéma suivant :



- L'arc 1APRO représente le remplissage de la benne du portique, et son levage jusqu'à la hauteur souhaitable pour éviter les superstructures du navire (état "PRO").
- 1PSRO représente la mise sur parc (SRO), à partir de l'état PRO.
- 1TRROO et 1TRROF représentent respectivement le rechargement direct des barges (par transbord) et des trains complets, à partir de l'état PRO.
- 1SROO et 1SROF représentent respectivement l'opération de "reprise sur parc et rechargement" des barges et des trains.

b) Amélioration des portiques

Les améliorations possibles des portiques utilisés porteraient sur l'allègement des chariots et l'achat de bennes plus légères, ce qui aurait pour effet de faire passer le rendement horaire moyen d'un portique de 145 T/h à 220 T/h environ. (voir pour plus de détails le paragraphe V. B 3 b).

Nous verrons plus loin (voir sous-paragraphe e) que la contrainte de capacité due aux portiques ne porte que sur les arcs 1APRO, 1SROO et 1SROF. Il suffit donc de dédoubler ces arcs par les arcs de développement 2APRO, 2SROO et 2SROF pour tenir compte de ces améliorations.

c) Installation de portiques supplémentaires

Le développement possible est représenté par l'arc 3APRO.

.../...

d) Installation d'un poste de rechargement de trains ou de péniches

Cette installation comprendrait d'une part un système de reprise sur parc (avec doublement du tapis transporteur) représenté par l'arc 2SBRO. D'autre part, un convoyeur alimenterait un poste de rechargement de péniches (arc 2BROO) ou, par l'intermédiaire d'une tour d'angle, un poste de chargement de trains complets (arc 2BROF).

Ces postes de rechargement, notons le, pourraient être utilisés en transbord, les portiques vidant leurs bennes dans une trémie au-dessus du tapis transporteur ; cette possibilité se traduit par les arcs 2TRROO et 2TRROF.

e) Equations de conservation et de capacité

Il y a conservation à chaque point du schéma représentatif, ce qui justifie les équations ARO, PRO, SRO, BRO, ROO et ROF.

Les portiques effectuent pratiquement dans le même temps chacune des opérations suivantes :

- déchargement et mise sur parc
- déchargement et rechargement direct
- reprise sur parc et rechargement

Si donc on convient de reporter sur les arcs 1APRO, 2APRO ou 3APRO les temps de manutention ultérieurs (donc les coûts) correspondant aux arcs 1PSRO, TRROO ou TRROF, la limitation de capacité due aux portiques se traduira par une limitation de la somme :

(1APRO) + (1SROO) + (1SROF) s'il n'y a pas amélioration

(1APRO) + (2APRO) + (1SROO) +(2SROO) + (1SROF) + (2SROF) s'il y a amélioration

En considérant qu'une installation de déchargement est complètement saturée lorsque ses portiques fonctionnent 12 heures par jour et 300 jours par an, (ce qui paraît beaucoup en France, mais est relativement faible, toutes proportions gardées, si l'on compare à certaines installations du port d'Anvers par exemple) on obtient les équations :

31 KRO : (1APRO) + (1SROO) + (1SROF) $\leq$ 1.700 (en KT)

32 KRO : (1APRO) + (2APRO) + (1SROO) + (2SROO) + (1SROF) + (2SROF) $\leq$ 2.500

.../...

Notons enfin que, pour les années où la cokerie située à proximité des installations de la C.R.D., et alimentée par un convoyeur, fonctionnera (c'est-à-dire jusqu'en 1970), 200 kT auront été déchargées pour cette cokerie. Ceci se traduira par :

32 KRO : (1APRO) + (2APRO) + (1SROO) + (2SROO) + (1SROF) + (2SROF) $\leq$ 2.300

f) Les équations de transbord

Plus le tonnage repartant par voie fluviale est élevé, plus les périodes où il n'y a pas de barges à quai sont courtes, et plus le tonnage transbordé est grand. Un calcul simple donne par exemple comme pourcentage de tonnage transbordé :

Tonnage repartant (kT) par eau	100	200	500	1.000	1.500	2.000	2.500
% transbordé	15	12	15	30	42	66	78

Il y a évidemment saturation aux alentours de 75 % à cause des mouvements des péniches.

Il est impossible de prendre en compte cette liaison à cause de la linéarité des équations, que nous nous imposons (pour pouvoir résoudre le problème) : nous sommes dans ce cas en rendement croissant. (cf. IV D 5).

Nous avons retenu le pourcentage de 30 % comme étant celui qui est à peu près observé actuellement, et à cause aussi d'éléments extérieurs qui rendent délicat un transbord important : par exemple, la manoeuvre de nuit des barges est difficile et couteuse, etc ... D'où l'équation :

4 TORO : (1TRROO) + (2TROO) $\leq$ 0,3 [(1TROO) + (2TROO) + (1SROO) + (2SROO) + (2BROO)]

En ce qui concerne le rechargement direct sur wagons, il est en premier lieu limité par le fait qu'un seul portique sur les trois peut y être affecté, avec une cadence de 130 T/h seulement, d'où l'équation :

5 TFRO : (1TRROF) $\leq$ 0,28 (1APRO) + 0,28 (2APRO) + 0,28 (3APRO)

.../...

où les termes en (2APRO) et (3APRO) sont l'extrapolation, en cas d'amélioration des portiques, de la situation actuelle.

En second lieu, s'il existait un poste de chargement de trains, le mouvement des trains sur les voies en impasse de la C.R.D. poserait de tels problèmes que le rechargement direct serait certainement limité à 30 % du tonnage repartant par fer. D'où :

$$6\ TFRO : (1TRROF) + (2TRROF) \leq 0{,}3 \left\{ \begin{array}{l} (1TRROF) + (2TRROF) \\ + (1SROF) + (2SROF) \end{array} \right\}$$

4. Transport fluvial

a) Arcs concernés

HAOPO
HAOCH
HAOVI
ROOPO
ROOCH
ROOVI

Ce sont tous des arcs de développement, car la seule technique de transport fluvial considérée ici est le transport par convois de barges poussées.

HAOPO, HAOCH, HAOVI relient le port du Havre aux centrales de Porcheville, Champagne, Vitry ; ROOPO, ROOCH, ROOVI relient le port de Rouen aux mêmes centrales.

b) Equations

Equations de conservation
Equations de sortie (voir plus loin : V B 7)

5. Transport ferroviaire

a) Arcs concernés

HAFPO
HAFCH
HAFVI

.../...

ROFPO
ROFCH
ROFVI
CFPO
CFCH
CFVI

HAFPO, HAFCH, HAFVI relient le port du Havre aux centrales de Porcheville, Champagne, Vitry ; ROOPO, ROOCH, ROOVI relient le port de Rouen aux mêmes centrales.

CFPO, CFCH, CFVI relient à ces mêmes centrales le charbon français, provenant du bassin lorrain.

b) Equations

Equations de Kirchhoff

Equations d'entrée et de sortie (voir plus loin V B 7)

6. Manutentions terminales

a) Arcs concernés

1OPORC
1FPORC
2OCHAC
1FCHAC
2OVITC
2FVITC

1OPORC représente l'opération de déchargement des barges à Porcheville, 1FPORC le déchargement des trains. Nous n'avons pas envisagé d'arcs de développement, car la capacité des installations existantes (1,5 million et 3 millions, respectivement) est suffisante pour satisfaire les besoins de la centrale.

1FCHAC représente le déchargement des trains à Champagne. 2OCHAC est un arc de développement, représentant le déchargement par eau.

2OVITC et 2FVITC sont deux arcs de développement relatifs au déchargement par eau et par fer de Vitry.

.../...

7. Equations d'entrée et de sortie

Si les trois types de charbon envisagés étaient une même matière, ces équations seraient simples : il suffirait d'écrire que la somme des flux qui sortent d'une source ou qui entrent dans un puits est égale au paramètre d'entrée ou de sortie correspondant. Mais, en ce qui concerne la consommation des centrales, donnée en T.E.C., les trois types de charbon ne sont pas équivalents. On a en effet :

1 T de charbon américain = 1,11 TEC (7.500 kcal/kg)

1 T de charbon polonais = 1,05 TEC (7.100 kcal/kg)

1 T de charbon français = 0,96 TEC

On pourrait croire maintenant qu'il suffit d'écrire que le paramètre de sortie, exprimé en TEC, est égal à la somme, pondérée par les coefficients précédents, des flux qui arrivent. Malheureusement, les arcs qui proviennent du port du Havre sont ambigus, car on ne sait quelle est la nature du charbon qui les parcourt, puisque ce port peut être alimenté par du charbon américain et par du charbon polonais.

Nous allons démontrer le résultat suivant : il est nécessaire et suffisant d'écrire que la quantité (en tonnes) qui passe dans un arc ambigu est comprise entre ce qu'elle serait si tout le charbon était américain, et ce qu'elle serait si tout le charbon était polonais.

En effet, considérons la partie du graphe qui est ambiguë : les deux entrées USA et EST, le port du Havre réduit à un sommet, et quatre sorties : HAVC, PORC, CHAC et VITC.

Soient ℓ_1 et ℓ_2 les flux qui, partant de USA et de EST respectivement, arrivent au port, $\ell_3, \ell_4, \ell_5, \ell_6$ les flux qui sortent du port pour rejoindre les quatre centrales dans l'ordre ci-dessus. $\ell_3, \ell_4, \ell_5, \ell_6$ sont des arcs ambigus.

Les données sont : les entrées USA = ℓ_1

EST = ℓ_2

(en fait, EST = EST qui arrive au Havre = ESAHA + ALAHA + AFAHA)

les consommations des centrales, lorsque les arcs non ambigus les ont déjà alimentées en partie = LH, p, c, v (en TEC).

Si P est la consommation totale de Porcheville, on a, par exemple :

p = P - 1,05 (ROOPO) - 1,05 (ROFPO) - 0,96 (CFPO)

.../...

Une relation de compatibilité doit exister entre ces données, c'est = 1,11 USA + 1,05 EST = LH + p + c + v [7 - 1]

Donnons nous quatre valeurs quelconques pour ε_3, ε_4, ε_5, ε_6, telles que la loi de Kirchhoff soit vérifiée :

$$\varepsilon_3 + \varepsilon_4 + \varepsilon_5 + \varepsilon_6 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \qquad [7 - 2]$$

La conditions nécessaire et suffisante pour que ces quatre valeurs soient acceptables est qu'on puisse reconstituer le flux américain et le flux polonais. Appelons donc $\varepsilon_{3,1}$ et $\varepsilon_{3,2}$ les parties américaine et polonaise de ε_3 ; on aura aussi $\varepsilon_{4,1}$ et $\varepsilon_{4,2}$ $\varepsilon_{5,1}$ et $\varepsilon_{5,2}$, $\varepsilon_{6,1}$ et $\varepsilon_{6,2}$.

Les équations auxquelles sont soumises ces 8 variables, et qui doivent permettre de les reconstituer, sont les 8 équations suivantes :

$$\left.\begin{aligned} 1{,}11\ \varepsilon_{3,1} + 1{,}05\ \varepsilon_{3,2} &= LH \\ 1{,}11\ \varepsilon_{4,1} + 1{,}05\ \varepsilon_{4,2} &= p \\ 1{,}11\ \varepsilon_{5,1} + 1{,}05\ \varepsilon_{5,2} &= c \\ 1{,}11\ \varepsilon_{6,1} + 1{,}05\ \varepsilon_{6,2} &= v \end{aligned}\right\} \quad [7 - 3]$$

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_{3,1} + \varepsilon_{3,2} &= \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{4,1} + \varepsilon_{4,2} &= \varepsilon_4 \\ \varepsilon_{5,1} + \varepsilon_{5,2} &= \varepsilon_5 \\ \varepsilon_{6,1} + \varepsilon_{6,2} &= \varepsilon_6 \end{aligned}\right\} \quad [7 - 4]$$

Pour que la solution soit safisfaisante, il faut que :

1) la conservation des flux américain et polonais soit assurée or, ceci est réalisé automatiquement. En effet, soit $\Phi_1 = \varepsilon_{3,1} + \varepsilon_{4,1} + \varepsilon_{5,1} + \varepsilon_{6,1}$ et $\Phi_2 = \varepsilon_{3,2} + \varepsilon_{4,2} + \varepsilon_{5,2} + \varepsilon_{6,2}$

[7 - 3] donne : $1{,}11\ \Phi_1 + 1{,}05\ \Phi_2 = LH + p + c + v$

et d'après [7 - 1] $= 1{,}11\ \varepsilon_1 + 1{,}05\ \varepsilon_2$

[7 - 4] donne : $\Phi_1 + \Phi_2 = \varepsilon_3 + \varepsilon_4 + \varepsilon_5 + \varepsilon_6$

et d'après [7 - 2] $= \varepsilon_1 + \varepsilon_2$

On a donc : $\Phi_1 = \varepsilon_1$

$\Phi_2 = \varepsilon_2$ c.q.f.d.

.../...

2) les solutions soient positives :

or, le système : $\begin{cases} 1{,}11\,\varepsilon_{3,1} + 1{,}05\,\varepsilon_{3,2} = LH \\ \varepsilon_{3,1} + \varepsilon_{3,2} = \varepsilon_3 \end{cases}$

peut aussi s'écrire : $\begin{cases} 1{,}11\,\varepsilon_3 - 0{,}06\,\varepsilon_{3,2} = LH \\ 1{,}05\,\varepsilon_3 + 0{,}06\,\varepsilon_{3,1} = LH \end{cases}$

$\varepsilon_{3,1} \geq 0$ entraîne : $1{,}05\,\varepsilon_3 \leq LH$

$\varepsilon_{3,2} \geq 0$ entraîne : $1{,}11\,\varepsilon_3 \geq LH$

on a donc : $\frac{LH}{1{,}11} \leq \varepsilon_3 \leq \frac{LH}{1{,}05}$

et de même pour les autres centrales, ce qu'il fallait détrer.

On vérifiera sur le graphe que les 8 inéquations de sortie sont donc les suivantes :

Le Havre
$\begin{cases} 1{,}11\ (2\ PHAVC) \geq LH \\ 1{,}05\ (2\ PHAVC) \leq LH \end{cases}$

Porcheville
$\begin{cases} 1{,}11\ (HAOPO) + 1{,}11\ (HAFPO) + 1{,}05\ (ROOPO) + 1{,}05\ (ROFPO) + 0{,}96\ (CFPO) \geq P \\ 1{,}05\ (HAOPO) + 1{,}05\ (HAFPO) + 1{,}05\ (ROOPO) + 1{,}05\ (ROFPO) + 0{,}96\ (CFPO) \leq P \end{cases}$

Champagne
$\begin{cases} 1{,}11\ (HAOCH) + 1{,}11\ (HAFCH) + 1{,}05\ (ROOCH) + 1{,}05\ (ROFCH) + 0{,}96\ (CFCH) \geq C \\ 1{,}05\ (HAOCH) + 1{,}05\ (HAFCH) + 1{,}05\ (ROOCH) + 1{,}05\ (ROFCH) + 0{,}96\ (CFCH) \leq C \end{cases}$

Vitry
$\begin{cases} 1{,}11\ (HAOVI) + 1{,}11\ (HAFVI) + 1{,}05\ (ROOVI) + 1{,}05\ (ROFVI) + 0{,}96\ (CFVI) \geq V \\ 1{,}05\ (HAOVI) + 1{,}05\ (HAFVI) + 1{,}05\ (ROOVI) + 1{,}05\ (ROFVI) + 0{,}96\ (CFVI) \leq V \end{cases}$

en appelant LH, P, C et V les consommations en TEC des quatre centrales.

Les équations d'entrée sont :

(USAHA) = USA (importation de charbon américain)

(ESAHA) + (ESAL) + (ESAF) + (ESARO) + (5ESARO) + (6ESARO)
= EST (importation de charbon polonais et russe)

Il faut ajouter l'équation de conservation des TEC, qui sert à déterminer le complément en charbon français :

0,96 (CFPO) + 0,96 (CFCH) + 0,96 (CFVI) + 1,05 (ESAHA)
+ 1,05 (ESAL) + 1,05 (ESAF) + 1,05 (ESARO)
+ 1,05 (5ESARO) + 1,05 (6ESARO) = LH + P + C + V
- 1,11 USA

C. - CHOIX DES PARAMETRES -

Nous avons vu dans le chapitre IV que nous préférions utiliser la paramétrisation des seconds membres, pour n fixé (durée du régime permanent), à la solution qui aurait consisté à utiliser la paramétrisation de la fonction économique, pour des seconds membres fixés, pour étudier comment varie la solution optimale en fonction de n.

L'exploration du domaine des variations possibles des paramètres se fera donc comme suit :

On se fixera n, donc la valeur de tous les coûts de développement.

On se donnera ensuite une ou plusieurs valeurs pour LH, consommation du Havre, compatible avec la durée n envisagée et avec les hypothèses de consommation définies au chapitre III.

On considérera alors deux ou trois valeurs pour USA, importation de charbon américain, et pour chacune de ces valeurs, on paramétrera EST, importation de charbon polonais et russe, en le faisant varier de zéro à la quantité suffisante pour saturer les quatre centrales.

L'ensemble des cas effectivement envisagés est représenté par le schéma ci-dessous :

n (ans)	LH (Millions tonnes)	Période	USA (Millions tonnes)	Numéro du cas
4	1	67 - 70	0,7	1
			2	3
	4	75 - 78	2	5
9	1,4	67 - 75	0,7	7
			2	9
	2	67 - 75	0,7	11
			2	13
	3	71 - 79	2	15
			3	17
14	1,4	67 - 80	0,7	19
			2	21
			2,5	23
	2,5	67 - 80	0,7	25
			2	27

En outre, nous verrons au chapitre suivant sur les coûts, que nous étudierons le cas où le deuxième poste minéralier du Havre est déjà construit. Ce cas est le suivant :

9 ⟶ 4 75 - 83 ⟶ 2 29

Nous étudierons aussi une fois le cas n = ∞ , et nous prendrons alors pour les paramètres les valeurs du cas nº 27.

Pour chacun de ces cas, les valeurs des seconds membres sont données dans le tableau suivant.

Dans ce tableau,

LH, P, C, V représentent les consommations, en milliers de TEC, des quatre centrales.

USA représente l'importation de charbon américain.

31 APHA représente la capacité de l'arc (1APHA)

CFEST représente la quantité : LH + P + C + V - 1,11 USA : c'est le second membre de la dernière équation d'entrée donnée.

SECONDS MEMBRES VARIABLES (en milliers de tonnes)

	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29
LH	1.000	1.000	4.000	1.400	1.400	2.000	2.000	3.000	3.000	1.400	1.400	1.400	2.500	2.500	4.000
P	800	800	350	650	650	650	650	400	400	500	500	500	500	500	250
C	1.000	1.000	350	800	800	800	800	500	500	600	600	600	600	600	250
V	1.150	1.150	1.500	1.750	1.750	1.750	1.750	1.700	1.700	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.000
USA	700	2.000	2.000	700	2.000	700	2.000	2.000	3.000	700	2.000	2.500	700	2.000	2.000
31 APHA	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	11.000
CFEST	3.173	1.730	3.980	3.823	2.380	4.423	2.980	3.380	2.270	3.223	1.780	1.225	4.323	2.880	3.280

C H A P I T R E V I

C O U T S

P L A N

A. - GENERALITES

1. Les sources utilisées
2. Les coûts marginaux à court terme
3. Les coûts de développement

B. - ANALYSE DETAILLEE

1. Transport maritime
   a) Coûts à prendre en compte
   b) Immobilisation du navire
   c) Suppléments de fret maritime
   d) Synthèse des coûts de transport maritime
2. Manutention au port du Havre
   a) Coûts marginaux à court terme
   b) Coûts de développement
   c) Etude de la rentabilité du deuxième poste minéralier
3. Manutentions au port de Rouen
   a) Utilisation des portiques actuels
   b) Utilisation des portiques améliorés
   c) Installation de portiques supplémentaires
   d) Installation de postes de rechargement avec bandes

.../...

4. Transport fluvial

5. Transport ferroviaire

6. Manutentions terminales

C. - ETUDES PARTICULIERES

1. Deuxième poste minéralier du Havre construit

2. Le tarif S.N.C.F.

C H A P I T R E V I

C O U T S

A. - GENERALITES -

1. Les sources utilisées

Les coûts divers que nous donnons dans ce chapitre proviennent :

- de données recueillies sur place ou fournies par les exploitants eux-mêmes : c'est le cas des opérations de manutention à Rouen et, en partie, au Havre ;
- d'études économiques effectuées, soit par des bureaux d'études privés (transport fluvial en particulier), soit par des Services économiques publics (manutention au Havre, manutentions terminales) ;
- de renseignements fournis directement par l'ATIC, l'E.D.F., et des armateurs ou des exploitants de services de transport (cas des transports maritimes, fluviaux, et de la S.N.C.F.).

Nous avons constaté dans presque tous les cas une bonne concordance de toutes ces sources, et les chiffres que l'on trouvera plus loin ne font que reprendre cette position commune.

Cependant, il nous a semblé qu'aucun consensus n'existait encore en ce qui concerne la S.N.C.F. ; nous avons préféré utiliser les tarifs actuellement en vigueur, en recherchant, en contrepartie, quelle est la diminution de tarif qui rend la S.N.C.F. concurrentielle.

2. Les coûts marginaux à court terme

Conformément à ce qui a été dit au chapitre IV (cf. paragraphe IV A 2 a), ces coûts représentent en gros le coût proportionnel d'exploitation de l'installation, en excluant les frais fixes annuels.

.../...

Ceci revient à supposer que les courbes de dépenses annuelles ont la forme de la figure 2b. Bien sûr, le départ entre frais fixes et frais proportionnels n'est pas toujours facile à faire, et le plus sûr moyen est encore d'essayer de tracer la courbe en question en considérant des dépenses annuelles correspondant à des trafics différents.

3. Les coûts de développement

Conformément à ce qui a été dit au chapitre IV (cf. paragraphes IV B 2 b et IV C 1), les coûts de développement qui sont calculés dans ce chapitre correspondent à la somme :

- du coût marginal (d'exploitation) de l'installation supplémentaire (fictive en cas d'amélioration) qui est créée ;
- et de l'augmentation correspondante de frais fixes annuels à la tonne, et d'amortissements à la tonne.

Les amortissements seront faits, selon les cas, sur la durée de vie de l'installation, ou sur 14 ans, 9 ans ou 4 ans.

Pour calculer les coûts de développement, nous ferons état d'un "investissement repère" donnant lieu à un accroissement de capacité ΔK, et nous supposerons que des accroissements inférieurs ou supérieurs à ΔK peuvent se faire avec le même coût de développement à la tonne.

Pour cet investissement repère, nous donnerons les durées de vie approximative des équipements qui le composent. Il est utile de noter que ces durées de vie, toutes supérieures à 15 ans (sauf pour le cas de certains équipements "loués", comme les convoyeurs à bandes), n'interviennent en fait que pour les coûts de développement à horizon infini (d_∞) et non pour les coûts à horizon limité (d_n, n = 4, 9, 14).

B. - ANALYSE DETAILLEE -

1. Transport maritime

a) Coûts à prendre en compte

Rappelons que nous prenons en charge le charbon à son entrée dans l'estuaire du Havre. Il faut évidemment tenir compte des coûts de manoeuvre du navire, pour l'amener à quai au Havre ou à Rouen.

.../...

Il faut aussi comptabiliser les coûts d'immobilisation, pour lesquels divers problèmes se posent. (cf. b/ ci-dessous).

Comment tenir compte des frais de dragage et d'entretien des ports et chenaux ? Le problème de l'imputation des frais d'entretien ou de création d'une infrastructure aux divers trafics qui l'empruntent n'a jamais été résolu d'une manière satisfaisante. Il nous a semblé que la moins mauvaise manière de le faire était de prendre les péages et droits de quai actuellement perçus, dans la mesure où ces taxes sont destinées à équilibrer les budgets des Ports Autonomes. Il semble probable, d'ailleurs, que la réforme en cours des taxes portuaires donnera lieu plutôt à un regroupement des taxes qu'à une modification de leur montant.

Enfin, certains arcs se voient imputer des suppléments de fret maritime (pour les navires venant de Pologne sans être chargés à 17.000 tonnes) ou de déchargement (cf. paragraphe 2 ci-dessous, pour l'arc ESAHA).

b) Immobilisation du navire

Dans les frais d'immobilisation du navire, il ne fait pas de doute qu'on doive tenir compte du coût d'exploitation quotidien, ou "running cost". Il nous a semblé qu'on devait y ajouter les frais financiers (amortissements et intérêts) dans la mesure où il existe une demande de navires du type utilisé sur le marché mondial, ce qui est le cas pour les minéraliers de 18.000 tonnes et de 85.000 tonnes. On se rend compte intuitivement, en effet, qu'une mauvaise utilisation du navire (attentes prolongées ou inutiles, par exemple) implique une mauvaise utilisation du capital correspondant, et peut même justifier en apparence la construction d'un navire supplémentaire, alors qu'une bonne utilisation rendrait cet investissement inutile. Un raisonnement rigoureux, que nous n'exposerons pas ici, confirme cette intuition.

Les coûts d'immobilisation sont proportionnels à la durée d'immobilisation, qui comprend pour Le Havre l'entrée et la sortie du port, et la durée de déchargement ; pour Rouen les attentes moyennes des marées, les temps de montée et descente du chenal, et le temps de déchargement.

Nous avons retenu les coûts d'immobilisation suivants :

.../...

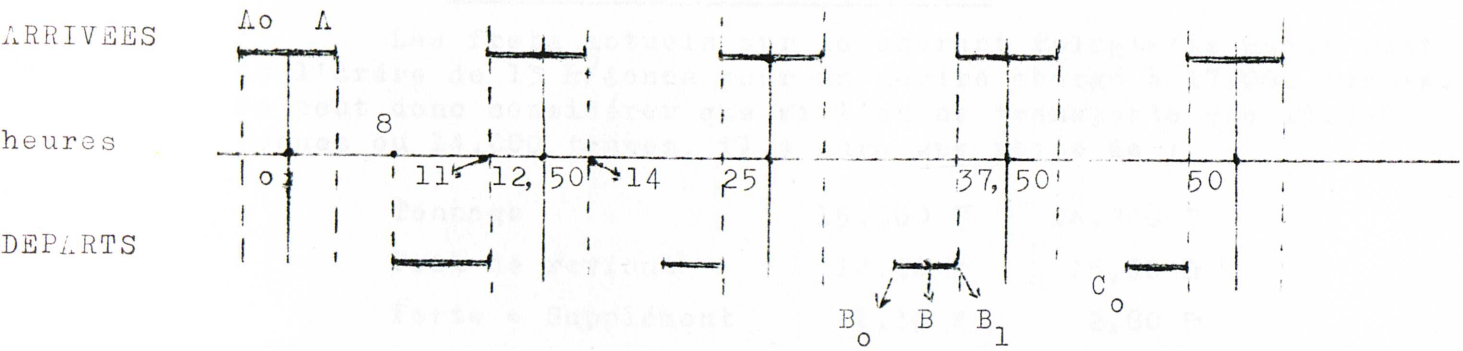
-- pour Le Havre

Navires	Entrée-Sortie	Déchargement	Coût/Heure	Coût/Total	Coût/Tonne
85.000 T	4 H	96 H	1.250 Fr *	125.000 Fr	1,50 Fr
17.000 T	4 H	20 H	500 Fr	12.000 Fr	0,70 Fr
17.000 T allègement 1.500 T)	4 H	1 H	500 Fr	2.500 Fr	0,147 Fr **
17.000 T allègement 3.000 T	4 H	2 ½ H	500 Fr	3.250 Fr	0,175 Fr **

* Ce chiffre ne constitue qu'un ordre de grandeur. D'ailleurs, sa valeur n'influe aucunement sur le cheminement du charbon, puisqu'il ne concerne que l'arc USAHA.

** Les coûts à la tonne sont rapportés à l'ensemble des 17.000 tonnes transportées, car ils seront affectés aux arcs ESAF et ESAL.

- pour Rouen, arrivées et départs obéissent au schéma suivant :



Dans ce schéma, les traits verticaux représentent les heures de pleine mer à Rouen. Les navires arrivent à Rouen dans une période de 3 heures à cheval autour de l'heure de pleine mer, et en repartent dans une période avancée de 3 heures, afin de rencontrer la pleine mer à Villequier.

.../...

Tonnage transporté	Arrivée	Sortie	Probabilité	Attente Arrivée (moyenne)	Déchargement + Attente Départ	Trajet	Total (moyenne)
17.000 T	A	Co	0,2	0	45,5	14	59,6
	Ao	Co	0,3	4,6	47		
	Ao	B_1	0,5	4,6	37,5		
15.500 T	A	B	0,3	0	34,5	14	52
	Ao	Bo	0,7	4,6	34,5		
14.000 T	A	Bo	0,3	0	33	14	51,5
	Ao	Bo	0,7	4,6	34,5		

On déduit aisément de ce tableau les coûts à la tonne qui figurent dans le tableau du paragraphe d. Les durées de déchargement retenues sont assez optimistes, si l'on utilise les portiques actuels de la C.R.D., et seront facilement obtenues après amélioration de ceux-ci. Là encore, il y a un phénomène de rendement croissant, dont on ne peut tenir compte.

c) Suppléments de fret maritime

Les frets actuels sur le courant Pologne/Le Havre sont de l'ordre de 13 Fr/tonne pour un navire chargé à 17.000 tonnes. On peut donc considérer que si l'on ne transporte que 15.500 tonnes ou 14.000 tonnes, il y aura une perte de :

Tonnage	15.500 T	14.000 T
Prix de revient	14,30 Fr	15,80 Fr
Perte = Supplément	1,30 Fr	2,80 Fr

d) Synthèse des coûts de transport maritime

Le tableau suivant présente les coûts calculés ci-dessus, et inclut également les taxes du paragraphe a). Chaque case du tableau sera désignée par son numéro (par exemple 1/ ou 27/) pour l'imputation aux différents arcs.

.../...

COUTS DE TRANSPORT MARITIME

Types de coûts \ Cas divers		83.000 T LH	17.000 T LH	Allègement 1.500 T LH	Allègement 3.000 T LH	17.000 T R	15.500 T R	14.000 T R
Droits de quai	Jauge	1/ 0,18	2/ 0,09	3/ 0,09	4/ 0,09	5/ 0,09	6/ 0,09	7/ 0,09
	Marchandise	11/ 0,58	12/ 0,29	13/ 0,29	14/ 0,29	15/ 0,29	16/ 0,29	17/ 0,29
Péages	Jauge	21/ 0,16	22/ 0,16	23/ ± 0,16	24/ ± 0,16	25/ 0,41	26/ 0,45	27/ 0,50
	Marchandise	31/ 0,38	32/ 0,38	33/ 0,38	34/ 0,38	35/ 0,50	36/ 0,50	37/ 0,50
Manoeuvre du navire		41/ 0,20	42/ 0,43	43/ ± 0,43	44/ ± 0,43	45/ 0,70	46/ 0,79	47/ 0,845
Immobilisation du navire		51/ 1,50	52/ 0,70	53/ ± 0,15	54/ ± 0,18	55/ 1,76	56/ 1,68	57/ 1,84
Supplément fret maritime							66/ 1,30	67/ 2,80
Supplément déchargement			72/ 0,17					

On déduit alors les coûts correspondant à chaque arc :

- USAHA : 1/ + 11/ + 21/ + 31/ + 41/ + 51/ = 3,00 Fr
- ESAHA : 2/ + 12/ + 22/ + 32/ + 42/ + 52/ + 72/ = 2,22 Fr
- ESAF : 23/ + 43/ + 53/ = 0,74 Fr
- ESAL : 24/ + 44/ + 54/ = 0,77 Fr
- AFAHA : 3/ + 13/ + 33/ = 0,76 Fr
- ALAHA : 4/ + 14/ + 34/ = 0,76 Fr
- ESARO : 5/ + 15/ + 25/ + 35/ + 45/ + 55/ = 3,75 Fr
- 5AFARO : 6/ + 16/ + 26/ + 36/ + 46/ + 56/ = 3,80 Fr
- 5ESARO : 6/ + 16/ + 26/ + 36/ + 46/ + 56/ + 66/ = 5,10 Fr
- 6ALARO : 7/ + 17/ + 27/ + 37/ + 47/ + 57/ = 4,08 Fr
- 6ESARO : 7/ + 17/ + 27/ + 37/ + 47/ + 57/ + 67/ = 6,88 Fr

2. Manutentions au port du Havre

a) Coûts marginaux à court terme

- coût de déchargement d'un minéralier de 18.000 tonnes y compris la mise sur stock (arcs 1APHA et 1PSHA)

  0,77 Fr/tonne

- même coût pour un minéralier de 85.000 tonnes :

  0,60 Fr/tonne

- même coût pour l'allègement d'un 18.000 tonnes : 0,60 Fr/tonne

Nous indiquerons donc les coûts relatifs au minéralier de 85.000 tonnes, et imputerons la différence de 0,17 Fr/tonne à l'arc ESAHA.

- coût de rechargement par eau : 0,58 Fr/tonne (arc 1SHA0)
- coût de rechargement par fer : 0,53 Fr/tonne (arc 1SHAF)

Le coût de déchargement (jusqu'à la mise sur convoyeur seulement) du charbon qui va à la centrale (arc 1APHA) est :

0,44 Fr/tonne.

.../...

Par différence, on trouve donc pour 1PSHA : 0,16 Fr/tonne

Le coût du transbord direct (arcs 1APHA et 1TRHAO, ou 1APHA et 1TRHAF) a été pris égal au coût de déchargement de 0,44 Fr/tonne, ce qui donne un coût nul sur les arcs 1TRHAO et 1TRHAF.

b) Coûts de développement

Nous avons pris comme repère le deuxième poste minéralier, de capacité supplémentaire égale à 11 millions de tonnes.

(1) Arc 2APHA :

Durée de vie	Investissements
50	16 M (quai)
30	18 M (portiques)

Le coût C' d'exploitation du deuxième poste minéralier serait de 0,27 Fr/tonne. Cependant, puisque nous supposons ici que les investissements sont continus, il serait abusif de se fonder sur cette valeur, relative d'un accroissement de capacité égal à 11 millions de tonnes, alors que le chiffre de 3 millions semble constituer une borne supérieure de ce qui peut passer au Havre en supplément des 4 millions de capacité actuelle. Nous avons donc pris C' = 0,50 Fr/tonne, légèrement supérieur à C = 0,44 Fr/tonne, qui est le coût actuel pour une capacité de 4 millions.

Le coût de développement est alors :

pour n = ∞ , d_∞ = 0,74 Fr/tonne
pour n = 14 , d_{14} = 0,85 Fr/tonne
pour n = 9 , d_9 = 0,97 Fr/tonne
pour n = 4 , d_4 = 1,41 Fr/tonne

(2) Arc 2PSHA

Il correspond à la location d'un convoyeur reliant le deuxième poste minéralier au premier : le loyer a été pris égal à 0,06 Fr/tonne. Le coût de développement vaut donc :

0,16 + 0,06 = 0,22 Fr/tonne

(3) Arc 2PHAVC

Le coût de développement comprend :

.../...

- la location du convoyeur : 0,03 Fr/tonne
  (durée de vie : 12 pour les bandes ; 30 pour l'infrastructure)
- le coût d'exploitation de ce convoyeur : 0,02 Fr/tonne
- l'amortissement d'un investissement de 1 million de francs, de durée de vie 30 ans (tour d'angle), de capacité égale à 3 millions de tonnes.

On en déduit :

d_{∞} = 0,08
d_{14} = 0,09
d_{9} = 0,10
d_{4} = 0,15

(4) Arc 2SHA0 :

Nous avons pris comme repère une installation de 4 millions de tonnes de capacité.

Durée de vie	Investissements
30	5,21 M (portique de reprise, engins de rechargement, voie de roulement)

Il faut ajouter la location des transporteurs à bande, soit un coût de 0,16 Fr/tonne.

On en déduit le coût de développement :

d_{∞} = 0,84 Fr/tonne
d_{14} = 0,89 Fr/tonne
d_{9} = 0,94 Fr/tonne
d_{4} = 1,12 Fr/tonne

(5) Arc 2SHAF

Nous avons pris comme repère une installation de 4 millions de tonnes de capacité.

Durée de vie	Investissements
30	12,15 M (portiques de reprise, voies de roulement, tour de chargement, installations ferroviaires)

.../...

Il faut ajouter la location des transporteurs à bande, soit un coût de 0,16 F/tonne.

On en déduit le coût de développement :

d_∞ = 0,93 F/tonne
d_{14} = 1,04 F/tonne
d_9 = 1,16 F/tonne
d_4 = 1,59 F/tonne

c) Etude de la rentabilité du deuxième poste minéralier

Comme on l'a vue en IV D 4 b, cette rentabilité existe

si $x(n, \Phi) < p$,

où p représente le tarif pratiqué,

et $x(n, \Phi)$ le coût marginal pour un horizon n et un flux total Φ.

Le tarif actuellement pratiqué au Havre pour l'opération de déchargement et de rechargement est 2,39 F/tonne. (Arcs 1APHA, 1PSHA, 1SHAO). Si ce tarif subsiste, le rentabilité s'écrira :

$$0,27 + \frac{34\,(b_n + i) - 0,68}{\Phi - 4} \leqslant 2,39$$

où Φ est exprimé en millions de tonnes, et représente le tonnage total qui passe au port du Havre,

i est le taux d'intérêt (0,07)

et $b_n = \frac{i}{(1+i)^n - 1}$

La résolution de cette inéquation donne :

- pour n = 7 , $\Phi \geqslant$ 10 millions de tonnes
- pour n = 9 , $\Phi \geqslant$ 9 millions de tonnes
- pour n = 12 , $\Phi \geqslant$ 8 millions de tonnes
- pour n = 17 , $\Phi \geqslant$ 7 millions de tonnes
- pour n = ∞ , $\Phi \geqslant$ 6 millions de tonnes

L'examen de ces chiffres montre que, si le tarif actuellement pratiqué reste constant, le deuxième poste minéralier ne sera certainement pas rentable vis-à-vis du trafic constitué par le charbon d'importation.

.../...

3. Manutentions au port de Rouen

a) Utilisation des portiques actuels

Les coûts marginaux actuels sont les suivants :

- déchargement : 1,53 Fr/tonne dont 0,97 Fr/tonne de main d'oeuvre et 0,56 Fr/tonne d'entretien et divers
- relevage : 0,53 Fr/tonne

Nous traduisons la légère baisse de rendement (5 %) observée lorsqu'on relève ou qu'on transborde sur wagons, par une modulation correspondante des coûts, ce qui donne finalement :

1APRO	1,50	Fr/tonne
1TRROO	o,oo	Fr/tonne
1PSRO	0,03	Fr/tonne
1TRROF	0,08	Fr/tonne
1SROO	0,53	Fr/tonne
1SROF	0,58	Fr/tonne

b) Utilisation des portiques améliorés

Il y a deux types d'améliorations possibles :

- augmentation de puissance au crochet des portiques de 33 %
- augmentation de la puissance utile des bennes, passant de 46 % à 52 % de la charge enlevée.

L'augmentation de puissance des portiques implique un changement de bennes, tandis-qu'il doit être possible de trouver dès maintenant des bennes plus légères correspondant aux portiques existants.

On a alors, en prenant les notations suivantes :

I	=	Investissement
D_9	=	Charge annuelle correspondant à un amortissement sur 9 ans
K	=	Nouvelle capacité de l'installation
C	=	Nouveau coût d'exploitation de l'installation (qui diminue à cause de gains de main d'oeuvre)

.../...

Amélioration nº	Bennes changées	Portiques améliorés	I (mF)	D9 (mF)	K (kT)	C (F/ T)
1	1	0	33	5	1.860	1,47
2	2	0	67	10	1.930	1,43
3	3	0	100	15	2.000	1,40
4	1	1	433	67	2.080	1,40
5	2	2	867	133	2.360	1,30
6	3	3	1.300	200	2.540	1,20

On constate alors que l'amélioration nº 3 est meilleure, quel que soit le tonnage supérieur à 150 kT, que les améliorations 1 et 2 ; et qu'il en va de même pour l'amélioration nº 6 vis-à-vis des améliorations nº 4 et 5, si le tonnage est supérieur à 600 kT. Les courbes de dépenses annuelles ont **l'allure** indiquée sur lafigure 17.

Remarquons que les tonnages-limites pour lesquels on passe de l'installation actuelle à l'amélioration nº 3, et de celle-ci à l'amélioration nº 6, deviennent respectivement 300 kT et 1.700 kT pour n = 4 ans.

La figure 17 montre que l'on est en rendement croissant ; pour pouvoir intégrer ces améliorations dans le modèle, nous remplacerons la courbe de l'installation existante et de ses améliorations pour la droite OK_6, de pente 1,28 : ceci figurera un développement possible, avec un coût de développement fictif de

$$d_9 = 1{,}28 \text{ Fr/tonne}$$

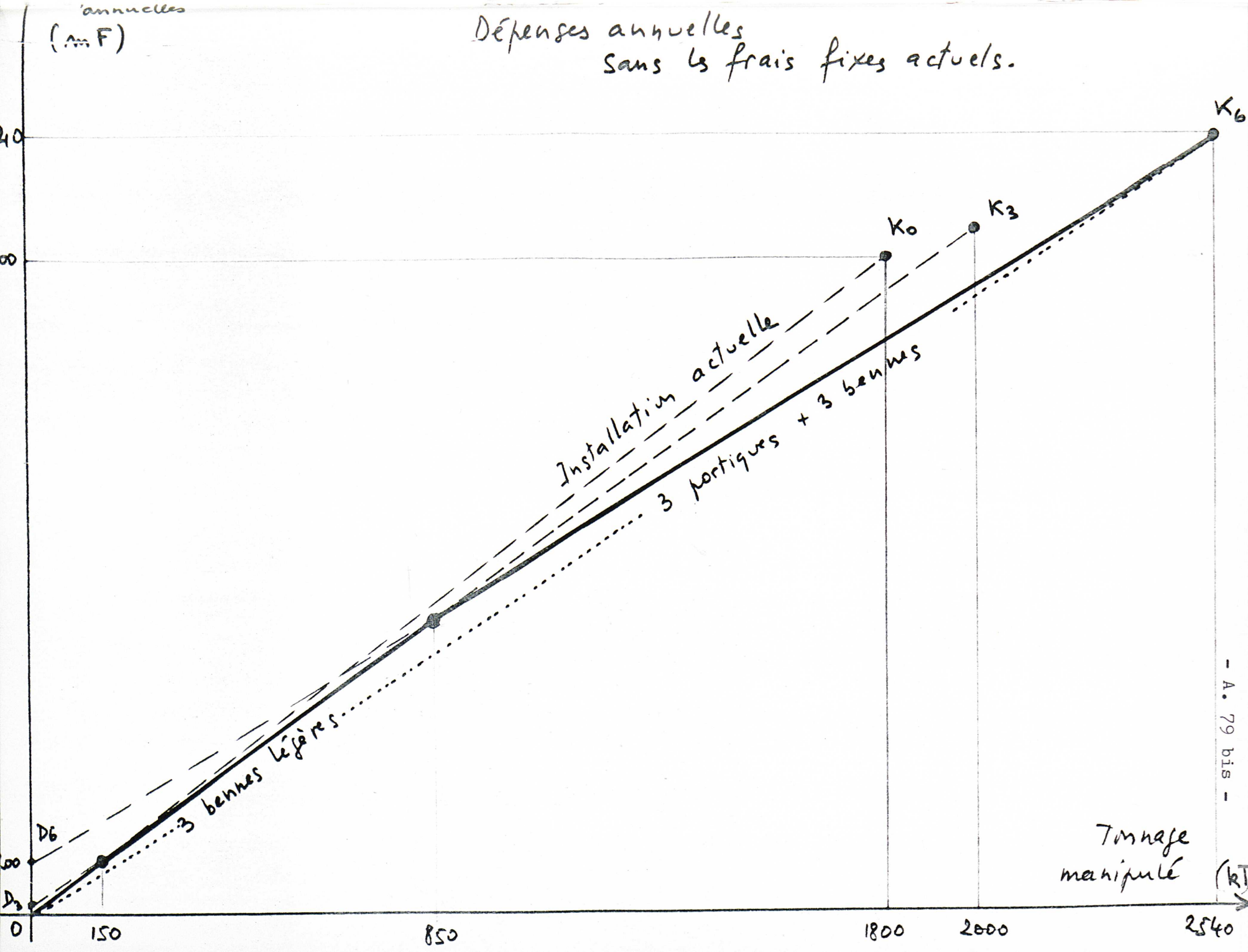
Les mêmes calculs, conduits pour d'autres périodes donnent :

$d_{\infty} = 1{,}26$ Fr/tonne

$d_{14} = 1{,}26$ Fr/tonne

$d_4 = 1{,}35$ Fr/tonne

.../...


annuelles
(mF)
Dépenses annuelles
sans les frais fixes actuels.
K6
K0
K3
Installation actuelle
3 portiques + 3 bennes
3 bennes légères
D6
D3
0
150
850
1800
2000
2540
Tonnage manipulé
(kT)

Cette droite est d'ailleurs très proche de la courbe en question, et il sera possible, d'après le tonnage qui passera par l'arc de développement correspondant, de déduire les investissements souhaitables.

Notons enfin que l'introduction de ce développement fictif conduit à supprimer, comme nous l'avions annoncé, les arcs 1APRO, 1SR00 et 1SR0F, et les variables correspondantes (cf. V A 2, équations). Les coûts des arcs 2SR00 et 2SR0F, ne comprenant pas de main-d'oeuvre docker, sont les mêmes que les coûts de 1SR00 et 1SR0F.

c) Installation de portiques supplémentaires (3APRO)

Nous prenons comme investissement repère l'installation d'une grue-tour de 500 tonnes/heure, assortie d'un allongement du quai permettant de décharger simultanément deux minéraliers de 18.000 tonnes.

Nous avons comme investissements :

Durée de vie	Investissements
30	1 M (quai)
15	2 M (grue tour)

La capacité créée est de 900 kT/an

Le coût d'exploitation du nouvel engin est égal à 1,50 Fr/tonne, se décomposant en :

- main-d'oeuvre	0,58	Fr/tonne
- entretien et frais proportionnels	0,56	Fr/tonne
- augmentation des frais fixes de l'installation	0,36	Fr/tonne

Les coûts de développement sont en définitive de :

d_{∞} = 1,83 Fr/tonne
d_{14} = 1,88 Fr/tonne
d_{9} = 2,04 Fr/tonne
d_{4} = 2,48 Fr/tonne

d) Installation de postes de rechargement avec bandes

(1) Arc 2SBR0 : reprise sur parc

Durées de vie	Investissements
10	1,62 M (tapis transporteur)
15	1 M (stecker-roue pelle)

.../...

Le coût d'exploitation de l'ensemble, pour un tonnage moyen de 1 MT manipulé, serait de 0,32 Fr/tonne.

Les coûts de développement sont donc :

d_{∞} = 0,61 Fr/tonne
d_{14} = 0,61 Fr/tonne
d_{9} = 0,69 Fr/tonne
d_{4} = 0,98 Fr/tonne

(2) Arcs 2BR00 et 2TR00 : poste à péniche

Durées de vie	Investissements
30	900 mF (ducs d'Albe génie civil)
15	1.200 mF (stecker, bande)

Coût d'exploitation : 0,14 Fr/tonne

Tonnage moyen manipulé : 1 MT

Coûts de développement

d_{∞} = 0,32 Fr/tonne
d_{14} = 0,34 Fr/tonne
d_{9} = 0,41 Fr/tonne
d_{4} = 0,62 Fr/tonne

(3) Arcs 2BR0F et 2TRR0F : poste à wagons

Durées de vie	Investissements
15	2 MF (tour d'angle-tour de chargement)
10	100 MF (50 M de bande)

- Coût d'exploitation : 0,10 Fr/tonne
- Tonnage moyen : 1 MT

Coûts de développement :

d_{∞} = 0,33 Fr/tonne
d_{14} = 0,34 Fr/tonne
d_{9} = 0,43 Fr/tonne
d_{4} = 0,62 Fr/tonne

.../...

4. Transport fluvial

Tous les coûts sont des coûts de développement : ils comprennent le coût d'exploitation et les amortissements et charges financières d'un ensemble de pousseurs et de barges en nombre parf itement adapté au trafic considéré.

Nous avons d'autre part supposé (ce qui avantage évidemment ce mode de transport) que, une fois terminé le trafic sur la relation considérée, les barges et les pousseurs pourraient être employé ailleurs, ce qui nous a conduits à considérer ce matériel comme loué, c'est-à-dire à prendre un coût de développement indépendant de l'horizon considéré.

Les éléments de coût retenus sont les suivants :

- Charges annuelles d'un pousseur de 1.200 CV

  Amortissements (coque : 15 ans ; moteur 10 ans) = 239.000 Fr

  Coût d'exploitation (entretien, carburants, lubrifiants, personnel, assurances) ..... = 752.000 Fr

  Frais généraux (15 %) ..... = 150.000 Fr

  Soit un total de 1.150.000 Fr

- pour un pousseur de 550 CV, ce total devient 680.000 Fr
- Charges annuells d'un ensemble de deux barges (76,50 M x 11,40 m)

  Amortissements (20 ans) ..... = 94.000 Fr

  Coût d'exploitation (assurances et entretien) = 25.000 Fr

  Frais généraux (15 %) ..... = 18.000 Fr

  Soit un total de 140.000 Fr

Nous avons également tenu compte de :

- une majoration de 10 % pour aléas et bénéfice
- la taxe au tonnage : 1,4 F par tonne de port en lourd maximum
- péages spéciaux sur la Seine (passage de Port Villez, Ecluse de Méricourt, Passage des Mureaux, Ecluse de Carrières ou d'Andresy)
- dépense de pilotage sur la Seine Maritime, entre Tancarville et Rouen : 0,42 Fr/tonne
- frais terminaux : dépenses de poussage dans les ports, dépenses de gardiennage et de surveillance des barges dans les ports : 560 Fr par barge.

Nous avons calculé le nombre de pousseurs et de barges de telle sorte que les pousseurs n'attendent jamais. On arrive ainsi aux résultats suivants :

(1) Arc HAOPO : pour un trafic de 418.000 tonnes, il faut

1 pousseur de 1200 CV et 6 barges

Le coût de développement est 5,11 Fr/tonne

(2) Arc ROOPO : pour un trafic de 500.000 tonnes, il faut

1 pousseur et 2 barges (dans ce cas particulier, le pousseur attendra aux extrémités)

Le coût de développement est : 3,o2 Fr/tonne

(3) Arc HAOCH :

La solution la plus économique semble consister en convois composés d'un pousseur de 550 CV et d'une barge de 1600 tonnes tout au long de la relation.

Pour un trafic de 500.000 tonnes, il faut trois pousseurs et cinq barges.

Le coût de développement est : 6,45 Fr/tonne

(4) Arc ROOCH :

Pour un trafic de 550.000 tonnes, il faut deux pousseurs de 550 CV et quatre barges.

Le coût de développement est : 4,01 Fr/tonne

(5) Arc HAOVI :

La traversée de Paris impose le système suivant :

Jusqu'à Suresnes, les convois comprennent un pousseur de 1200 CV et deux barges. A partir de Suresenes, il y a éclatement, et un convoi comprend une barge et un pousseur de 550 CV.

Pour un trafic de 1.450.000 tonnes, il faut :

5 pousseurs de 1200 CV
3 pousseurs de 550 CV
18 barges

Le coût de développement est : 8,04 Fr/tonne

(6) Arc ROOVI : pour un trafic de 1.455.000 tonnes, il faut

3 pousseurs de 1200 CV
3 pousseurs de 550 CV
14 barges

Le coût de développement est : 5,60 Fr/tonne

.../...

5. Transport ferroviaire

Il ne nous a pas été possible d'appréhender, pour la S.N.C.F., les coûts marginaux, qu'ils soient à court terme ou à long terme. Nous avons donc décidé de remplacer les coûts par les tarifs (tarifs trains complets avec prime de régularité), avec la possibilité d'étudier comment varie la solution optimale lorsque l'on diminue progressivement, et dans la même proportion, ces tarifs (voir la section VI D).

Les tarifs trains complets avec prime de régularité sont les suivants :

Arcs HAFPO	:	11,47 Fr/tonne
HAFCH	:	13,42 Fr/tonne
HAFVI	:	14,70 Fr/tonne
Arcs ROFPO	:	8,03 Fr/tonne
ROFCH	:	10,55 Fr/tonne
ROFVI	:	11,67 Fr/tonne
Arcs CFPO	:	16,70 Fr/tonne
CFCH	:	16,50 Fr/tonne
CFVI	:	16,28 Fr/tonne

6. Manutentions terminales

Arc 1OPORC

Le coût marginal à court terme de l'installation de déchargement par eau est 0,21 Fr/tonne. (La capacité a été prise égale à 1,5 million de tonnes : marche à deux postes).

Arc 1FPORC

Le coût marginal à court terme de l'installation de déchargement par fer est : 0,26 Fr/tonne. (La capacité a été prise égale à 3 millions de tonnes : marche à deux postes)

Arc 1FCHAC

Le coût marginal à court terme est : 0,17 Fr/tonne (capacité = 3 millions de tonnes).

.../...

Arc 20CHAC

Nous avons pris comme repère une installation de capacité égale à 1,5 million de tonnes (pour une marche à deux postes), mais considéré, pour le calcul du coût de développement, un trafic de 600.000 tonnes.

Durée de vie	Investissements
30	1.650.000 Fr (quai, équipement)

Il faut ajouter 0,02 Fr/tonne de location de bande

Le coût d'exploitation d'une telle installation a été pris égal à 0,21 Fr/tonne.

Le coût de développement est :

d_{∞} = 0,45 Fr/tonne

d_{14} = 0,54 Fr/tonne

d_{9} = 0,65 Fr/tonne

d_{4} = 1,03 Fr/tonne

Arc 20VITC

Nous avons pris comme repère une installation de capacité égale à 3 millions de tonnes (pour une marche à deux postes), mais considéré, pour le calcul du coût de développement, un trafic de 1.500.000 tonnes.

Durée de vie	Investissements
30	1.100.000 Fr (quai)
15	2.000.000 Fr (équipement, type roue-pelle)

Il faut ajouter 0,02 Fr/tonne de location de bande.

Le coût d'exploitation d'une telle installation a été pris égal à 0,18 Fr/tonne.

Le coût de développement est :

d_{∞} = 0,40 Fr/tonne

d_{14} = 0,43 Fr/tonne

d_{9} = 0,51 Fr/tonne

d_{4} = 0,80 Fr/tonne

.../...

Arc 2FVITC

Nous avons pris comme repère une installation de capacité égale à 3 millions de tonnes (pour une marche à deux postes), mais considéré, pour le calcul du coût de développement, un trafic de 1.500.000 tonnes.

Durée de vie	Investissements
30	8.500.000 Fr (infrastructure voie ferrée, estacade, extracteurs, transporteurs, station de dégelage locotracteurs)

Le coût d'exploitation d'une telle installation a été pris égal à o,20 Fr/tonne.

Le coût de développement est :

d_{∞} = 0,65 Fr/tonne

d_{14} = 0,85 Fr/tonne

d_{9} = 1,07 Fr/tonne

d_{4} = 1,87 Fr/tonne

C. - ETUDES PARTICULIERES -

1. Deuxième poste minéralier du Havre construit (cas nº 29)

Le problème posé par le deuxième poste minéralier n'est pas assimilable directement par le modèle décrit au chapitre IV, car il s'agit là d'un problème discret : cet investissement sera réalisé, ou ne sera pas réalisé. On peut cependant l'étudier de deux manières différentes :

a) En utilisant le procédé décrit au paragraphe IV D 3

b) En supposant le deuxième poste minéralier construit, et en examinant alors comment se présente la solution optimale.

C'est la deuxième méthode que nous avons retenue.

Nous supposons que le deuxième poste minéralier est construit, mais que ce développement est fait dans le but de satisfaire les besoins de la Centrale du Havre, et non ceux des autres centrales : ce développement ne concerne donc que l'opération représentée par les arcs 1APHA et 2APHA (portiques et quai), et non la mise sur parc (arcs 1PSHA et 2PSHA), ni le rechargement (arcs 1SHAO, 2SHAO).

Dans ces conditions, le graphe est modifié comme suit :

a) L'arc 1APHA est remplacé par un arc de capacité 11 millions de tonnes, et de coût 0,27 Fr/tonne.

b) Pour un flux se dirigeant vers les autres centrales, un problème se pose : vaut-il mieux passer par le premier poste minéralier (déchargement = 0,44 Fr/tonne) et par la mise sur parc (0,16 Fr/tonne) non developpée, dans la limite de 4 millions de tonnes, ou passer par le deuxième poste minéralier (déchargement = 0,27 Fr/tonne) et revenir au parc de stockage du premier, moyennant le développement du convoyeur (0,22 Fr/tonne). On a :

$$0,44 + 0,16 > 0,27 + 0,22$$

il faut donc passer aussi par le deuxième poste minéralier.

L'arc 1PSHA doit donc être confondu avec l'arc 2PSHA, avec un coût de 0,22 Fr/tonne.

Une fois le graphe modifié, on peut alors trouver le coût annuel optimal d'acheminement du charbon. Il suffit alors de calculer la dépense actualisée correspondante (y compris l'investissement lui-même), et de la comparer à la dépense relative au cas où le port du Havre peut être développé de façon plus continue.

.../...

2. Le tarif S.N.C.F.

On a vu au paragraphe VI B 5 que l'on souhaitait étudier comment varie la solution optimale lorsque les coûts de la SNCF diminuent dans la même proportion. Il suffit pour cela d'utiliser la paramétrisation de la fonction économique. On aura :

$$F(\lambda) = \sum_i c_i \xi_i + \lambda \sum_{j \in \text{SNCF}} (-c_j) \xi_j$$

Le programme indiquera toutes les valeurs critiques de λ, et les solutions optimales correspondantes.

C H A P I T R E V I I

OBTENTION DES RESULTATS

P L A N

A - GENERALITES

B - EXEMPLES DE DEPOUILLEMENT DE RESULTATS

C - ANALYSE SOMMAIRE DES RESULTATS

1 - Mode d'acheminement

2 - Acheminement du charbon américain

3 - Acheminement du charbon polonais et russe - Investissements

4 - Cas où le deuxième poste minéralier du Havre est construit.

A - GENERALITES -

Au chapitre V ont été définies

- les variables et
- les contraintes (équations et inéquations)

du problème.

Au chapitre VI ont été définies

les fonctions économiques.

Nous en utiliserons, rappelons le, six différentes :

- les quatre premières,

ICØUT

14CØUT

9CØUT

4CØUT

correspondent à des durées de régime permanent respectivement égales à l'infini, à quatorze ans, à neuf ans et à quatre ans.

- 9HCØUT correspond au cas où le deuxième poste minéralier du Havre est construit, et à une durée de neuf ans.

- 9SCØUT, égale à 0 partout, sauf pour les coûts S.N.C.F., où elle est alors opposée à 9CØUT, permettra la paramétrisation des coûts S.N.C.F.

Traitement d'un "cas" et obtention des résultats

a) "Cas" avec paramétrisation des seconds membres

On choisit, conformément au schéma donné en V C,

- une fonction économique

- un vecteur second membre, auquel on adjoint le vecteur second membre égal à 0 partout, sauf pour l'équation d'entrée EST, où l'on prend une quantité positive quelconque, 1.000 par exemple.

.../...

Le programme détermine alors la suite des solutions optimales pour différentes valeurs du paramètre, donc pour différentes valeurs de l'entrée : charbon polonais ou russe. Ces différentes valeurs, pour lesquelles on a des résultats, ne sont pas en fait quelconques, mais correspondent à des valeurs critiques, pour lesquelles un arc qui était vide commence à être emprunté, et inversement, ou pour lesquelles une contrainte qui n'était pas saturée le devient, et inversement.

Les solutions optimales se présentent sous la forme d'une suite de valeurs associées

- à chaque arc emprunté

- à chaque contrainte non saturée : la valeur représente alors l'écart à la saturation.

Ces résultats permettent donc :

- de déterminer les tonnages correspondant à chaque arc, donc à chaque opération,

- d'individualiser charbon américain et charbon polonais ou russe dans les arcs ambigus, grâce aux contraintes de sortie

1 et 2SHAVC ; 1 et 2 SPORC ; 1 et 2 SCHAC ; 1 et 2 SVITC.

Il est alors possible de représenter sur des graphiques, comme on le verra plus loin, les chemins suivis par les trois catégories de charbon.

b) "Cas" avec paramétrisation de la fonction économique

Ils correspondent essentiellement à la paramétrisation des coûts S.N.C.F., grâce à l'introduction de la fonction économique 9SCØUT.

Le programme donne la suite des solutions optimales (valeurs des variables d'arc et variables de contrainte) pour les valeurs "critiques" du paramètre. Ce qui a été dit en a) est encore valable ici.

B - EXEMPLES DE DEPOUILLEMENT DE RESULTATS -

Nous en donnerons trois.

- Le premier correspond à la fonction économique 4CØUT et au second membre 1. Donc :

.../...

LH = 1000

P = 800 USA = 784

C = 1000 EST varie de 124 à 2933

V = 1150

(milliers de tonnes)

- Le deuxième correspond à la fonction économique 4CØUT et au second membre 5. Donc :

LH = 4000

P = 350 USA = 2084

C = 350 EST varie de 1606 à 3701

V = 1500

(milliers de tonnes)

- Le troisième correspond à la fonction économique 9HCØUT (second poste minéralier construit au Havre) et au second membre 29. Donc :

LH = 4000

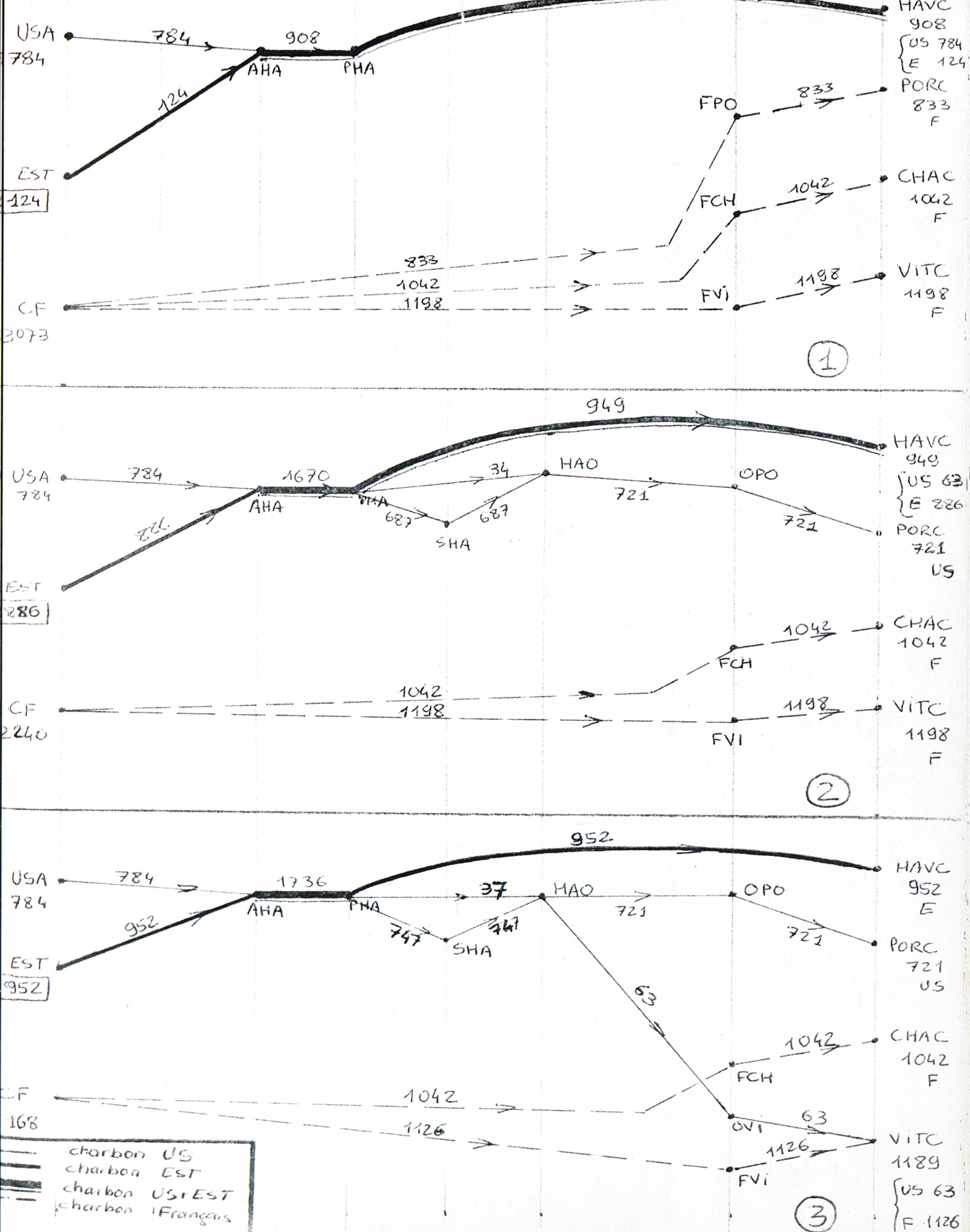
P = 250 USA = 2084

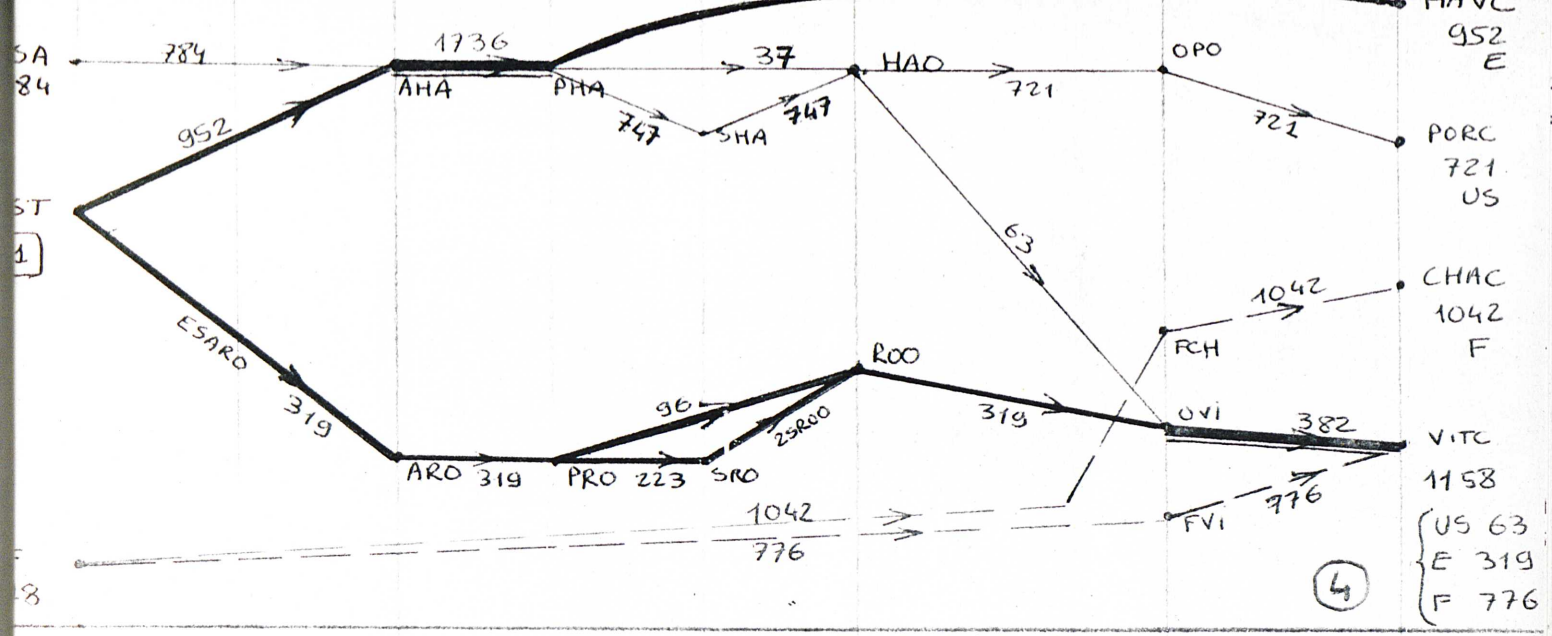
C = 250 EST varie de 1606 à 3035

V = 1000

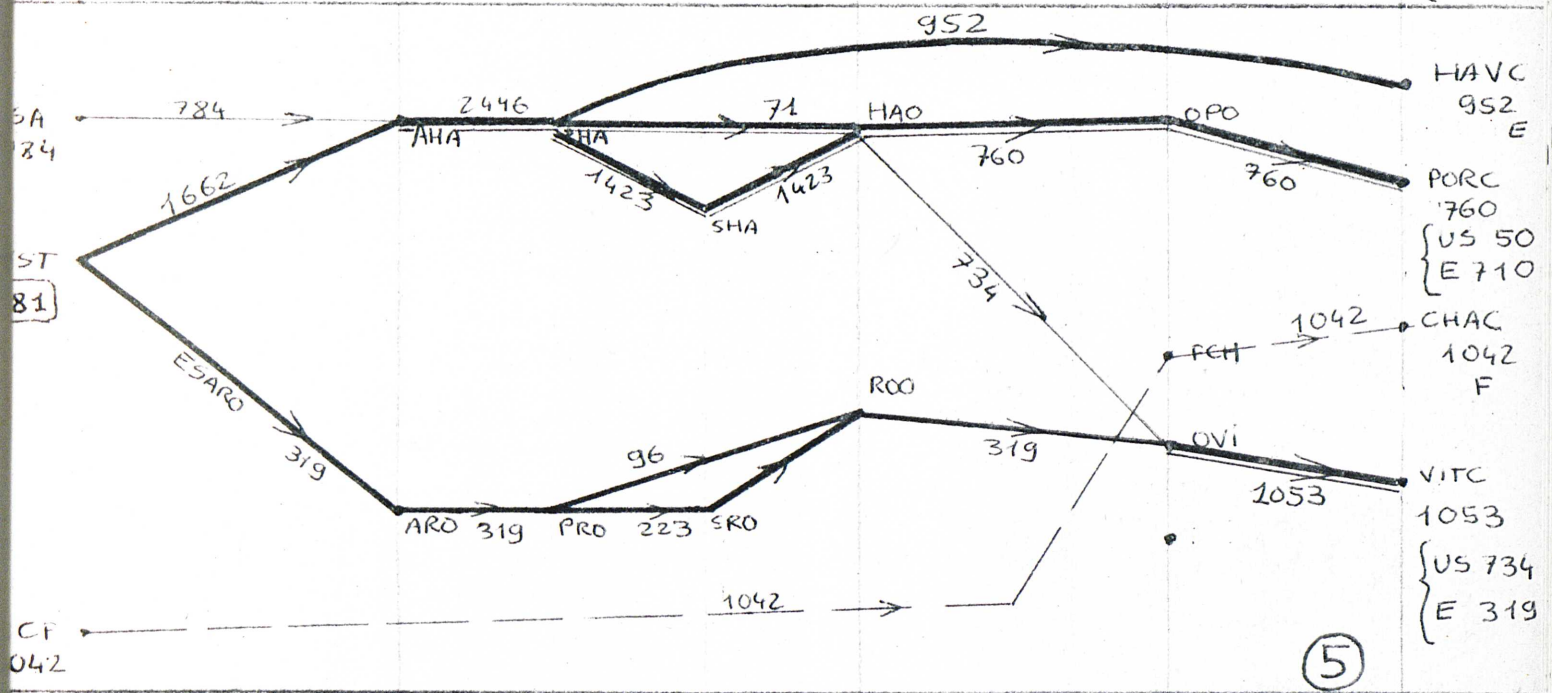
(milliers de tonnes)

C A S 4 C Ø U T - 1

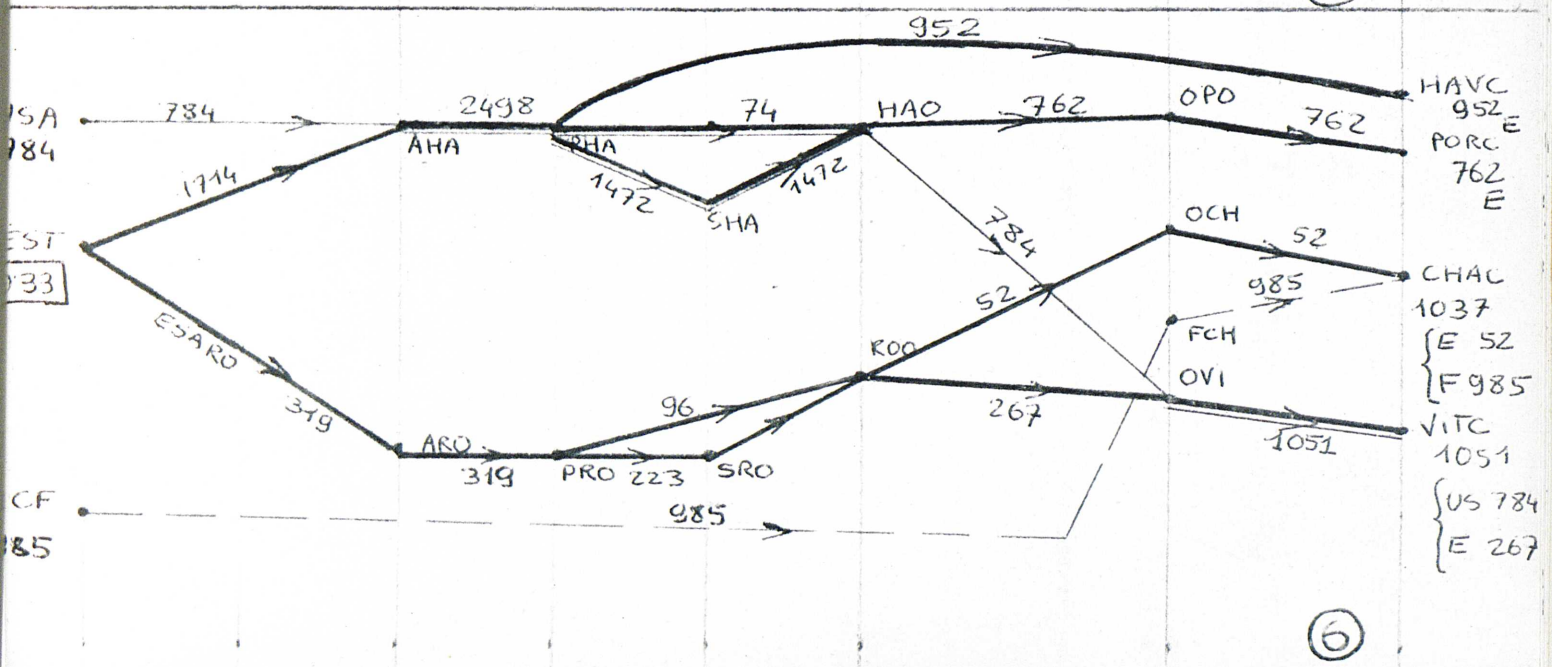

USA
784
784
AHA
908
PHA
124
EST
124
HAVC
908
US 784
E 124
FPO
833
PORC
833
F
FCH
1042
CHAC
1042
F
833
1042
1198
CF
3073
FVi
1198
VITC
1198
F
1
949
HAVC
949
US 63
E 886
USA
784
784
AHA
1670
PHA
34
HAO
721
OPO
687
687
SHA
721
PORC
721
US
EST
886
FCH
1042
CHAC
1042
F
1042
1198
CF
2240
FVI
1198
VITC
1198
F
2
952
HAVC
952
E
USA
784
784
AHA
1736
PHA
37
HAO
721
OPO
747
747
SHA
721
PORC
721
US
EST
952
952
63
FCH
1042
CHAC
1042
F
1042
1126
CF
168
OVI
63
VITC
1189
1126
FVi
US 63
F 1126
3
charbon US
charbon EST
charbon US+EST
charbon Français



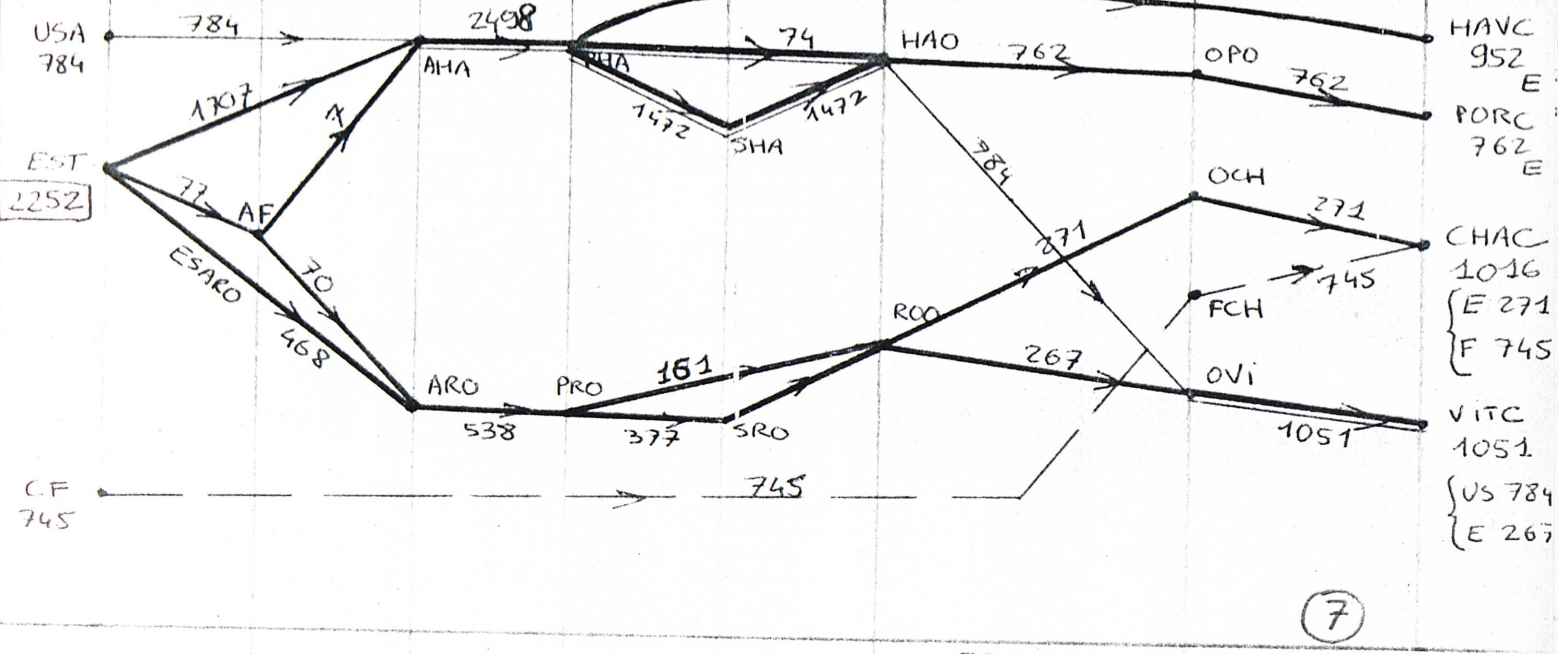
SA
84
784
1736
AHA
PHA
37
HAO
721
OPO
HAVC
952
E
952
747
SHA
747
721
PORC
721
US
ST
1
63
CHAC
1042
F
1042
FCH
ESARO
ROO
319
96
2SROO
319
OVI
382
VITC
1158
ARO
319
PRO
223
SRO
1042
776
FVI
776
US 63
E 319
F 776
4



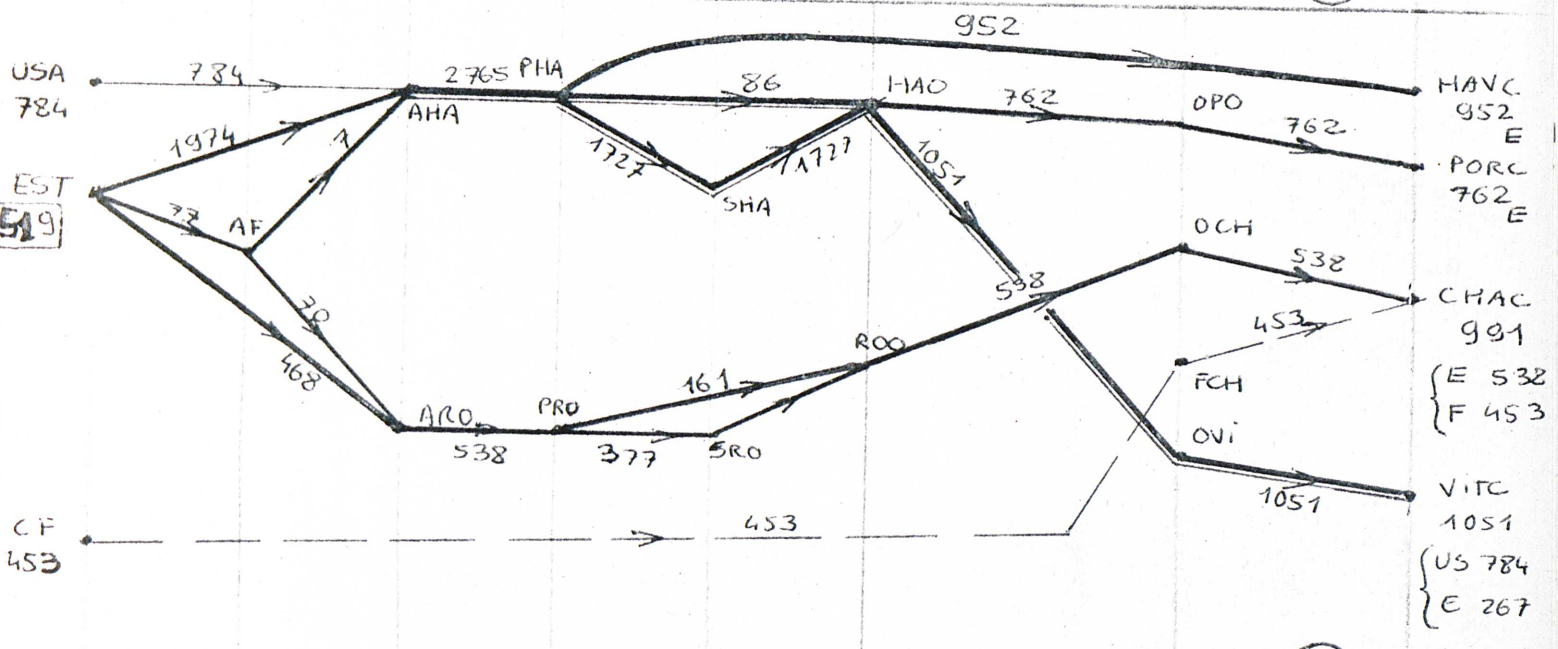
952
HAVC
952
E
SA
84
784
2446
AHA
PHA
71
HAO
760
OPO
760
PORC
760
US 50
E 710
1662
1423
SHA
1423
ST
81
734
1042
CHAC
1042
F
FCH
ESARO
ROO
319
96
319
OVI
1053
VITC
1053
ARO
319
PRO
223
SRO
US 734
E 319
1042
CF
042
5



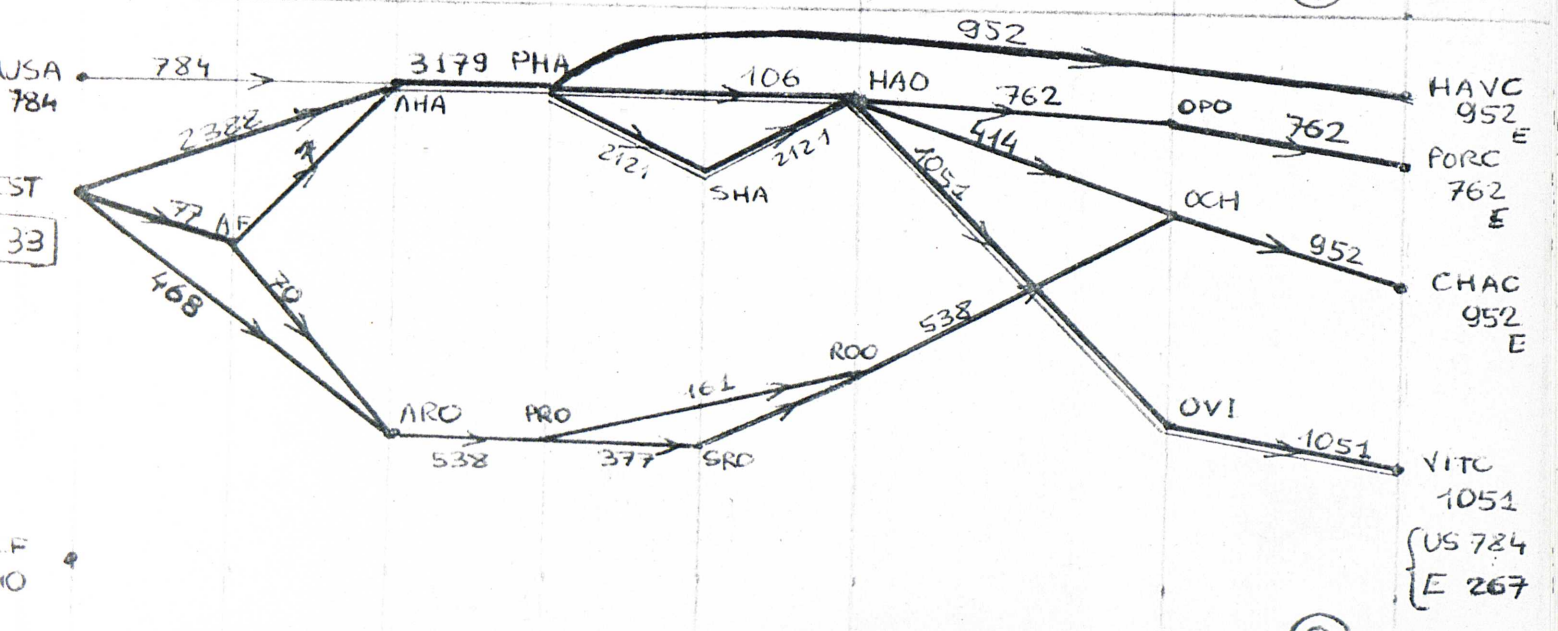
952
HAVC
952
E
SA
784
784
2498
AHA
PHA
74
HAO
762
OPO
762
PORC
762
E
1714
1472
SHA
1472
784
OCH
52
CHAC
1037
985
52
E 52
F 985
FCH
ESARO
ROO
OVI
319
96
267
VITC
1051
ARO
319
PRO
223
SRO
1051
US 784
E 267
CF
985
985
6


USA
784
784
2498
AHA
PHA
74
HAO
762
OPO
762
HAVC
952
E
PORC
762
E
1707
7
1472
1472
SHA
EST
2252
72
AF
ESARO
70
468
784
OCH
271
CHAC
1016
E 271
F 745
745
FCH
271
ROO
267
OVI
ARO
538
PRO
161
377
SRO
VITC
1051
1051
US 784
E 267
CF
745
745

7

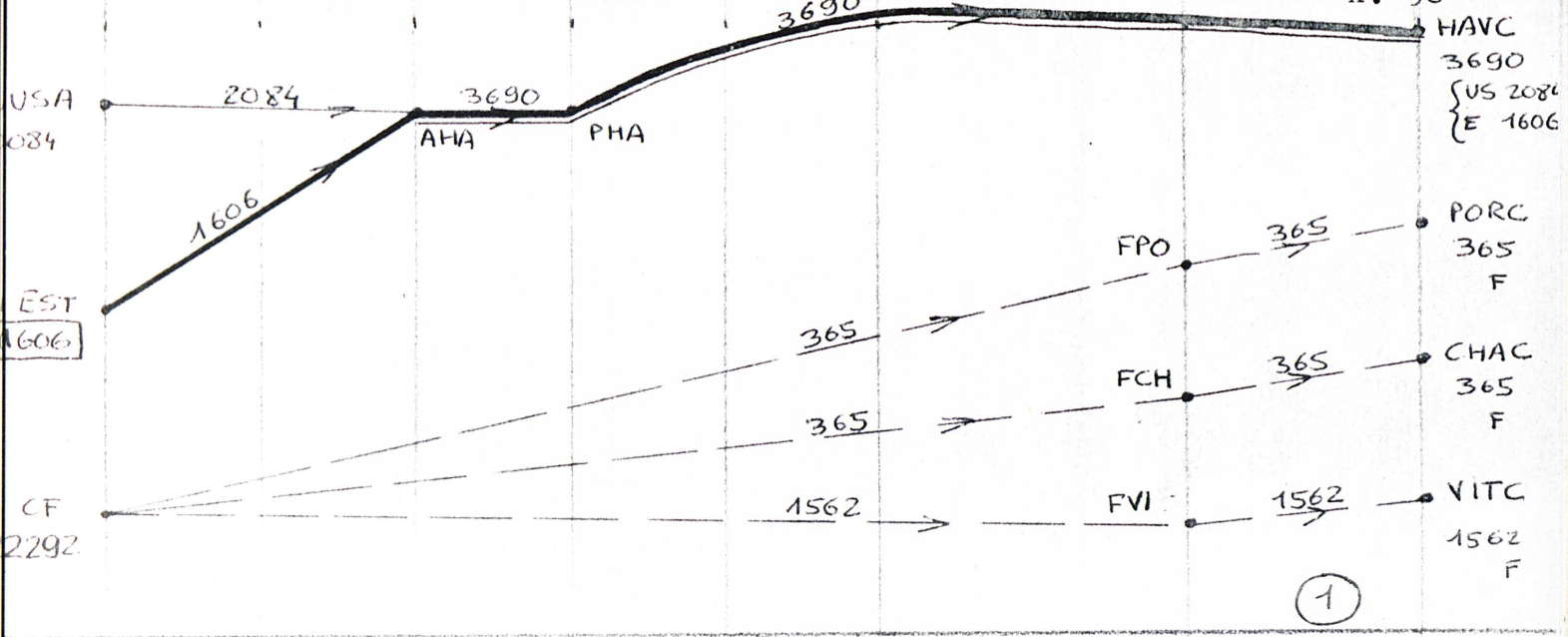

952
USA
784
784
2765 PHA
AHA
86
HAO
762
OPO
762
HAVC
952
E
PORC
762
E
1974
7
1727
1727
SHA
1051
EST
519
72
AF
OCH
538
538
CHAC
991
E 538
F 453
453
70
468
ROO
161
FCH
OVI
ARO
538
PRO
377
SRO
1051
VITC
1051
US 784
E 267
CF
453
453

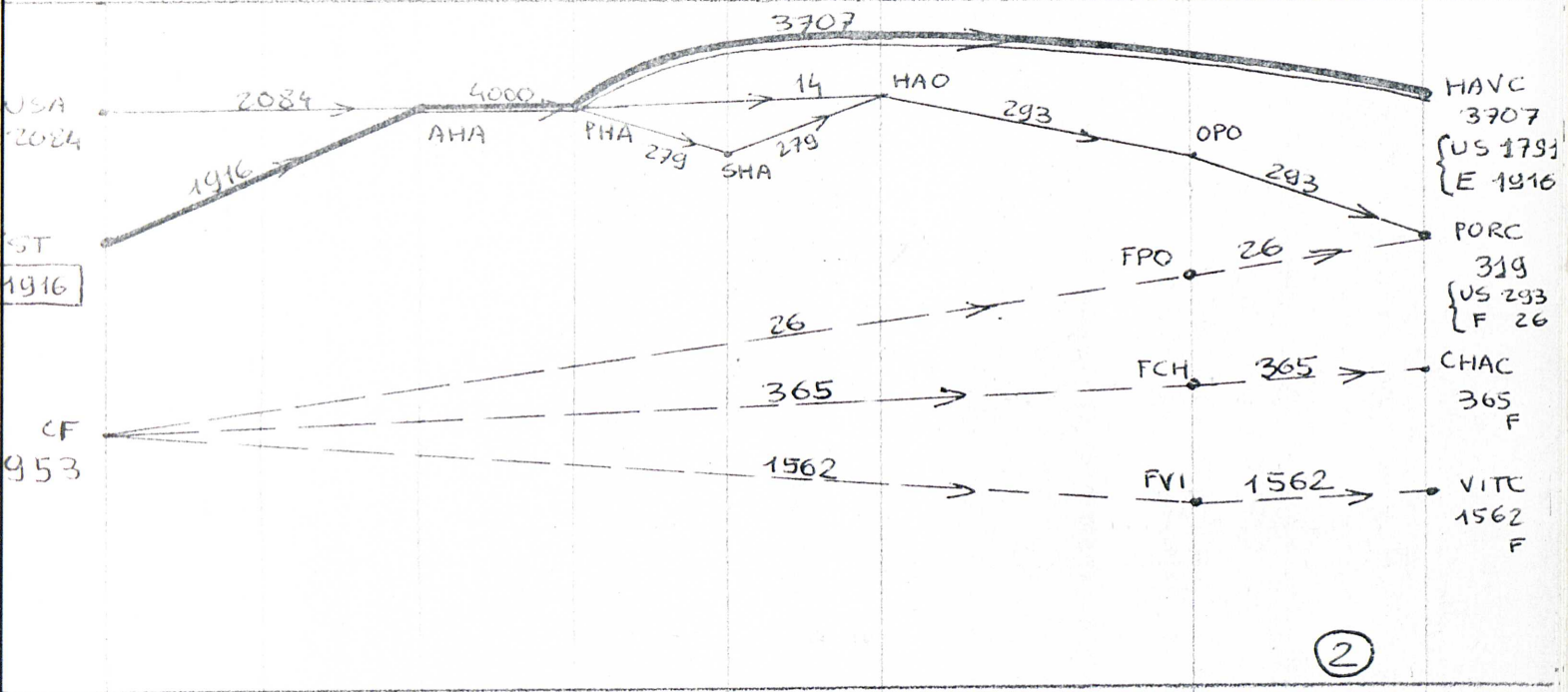
8

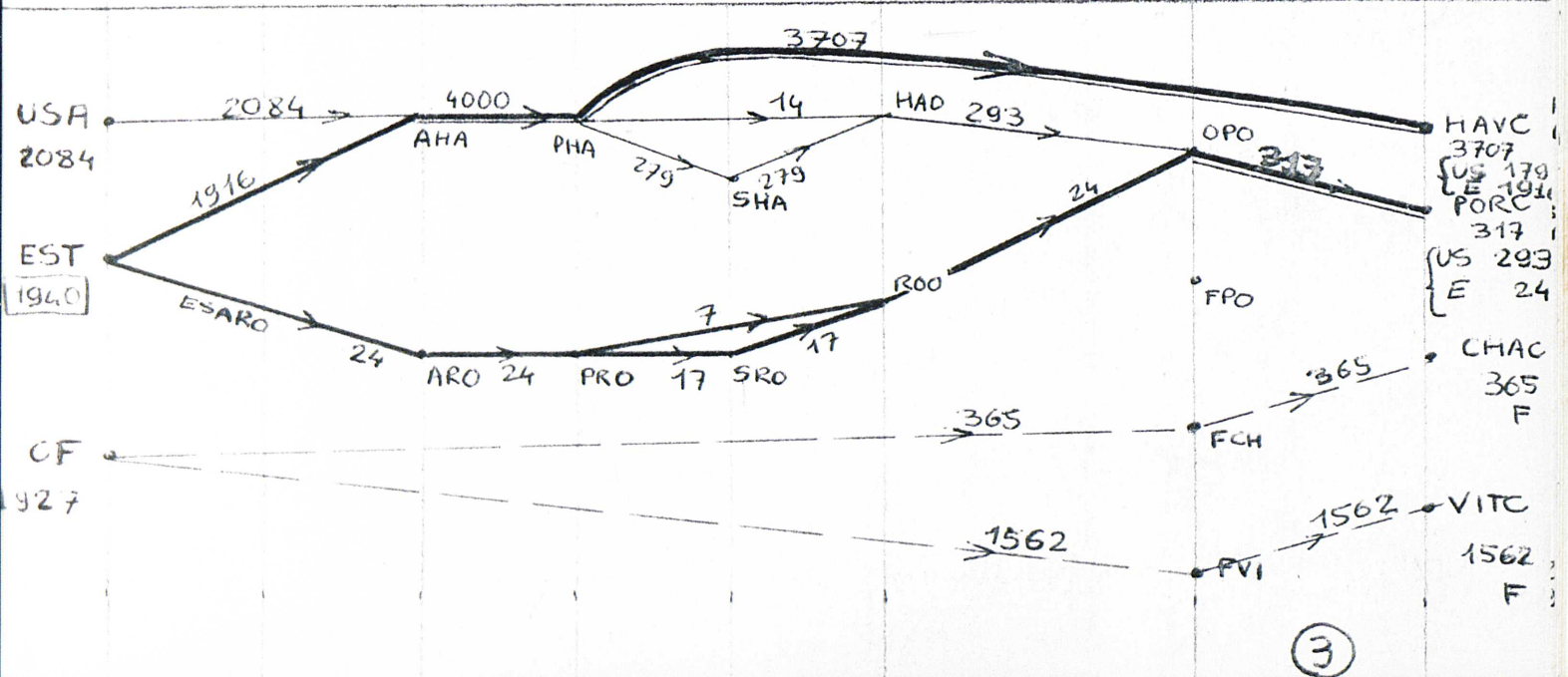

952
USA
784
784
3179 PHA
AHA
106
HAO
762
OPO
762
HAVC
952
E
PORC
762
E
2382
7
2121
2121
SHA
414
1051
ST
33
72
AF
OCH
952
CHAC
952
E
468
70
538
ROO
161
OVI
ARO
538
PRO
377
SRO
1051
VITC
1051
US 784
E 267
F
O

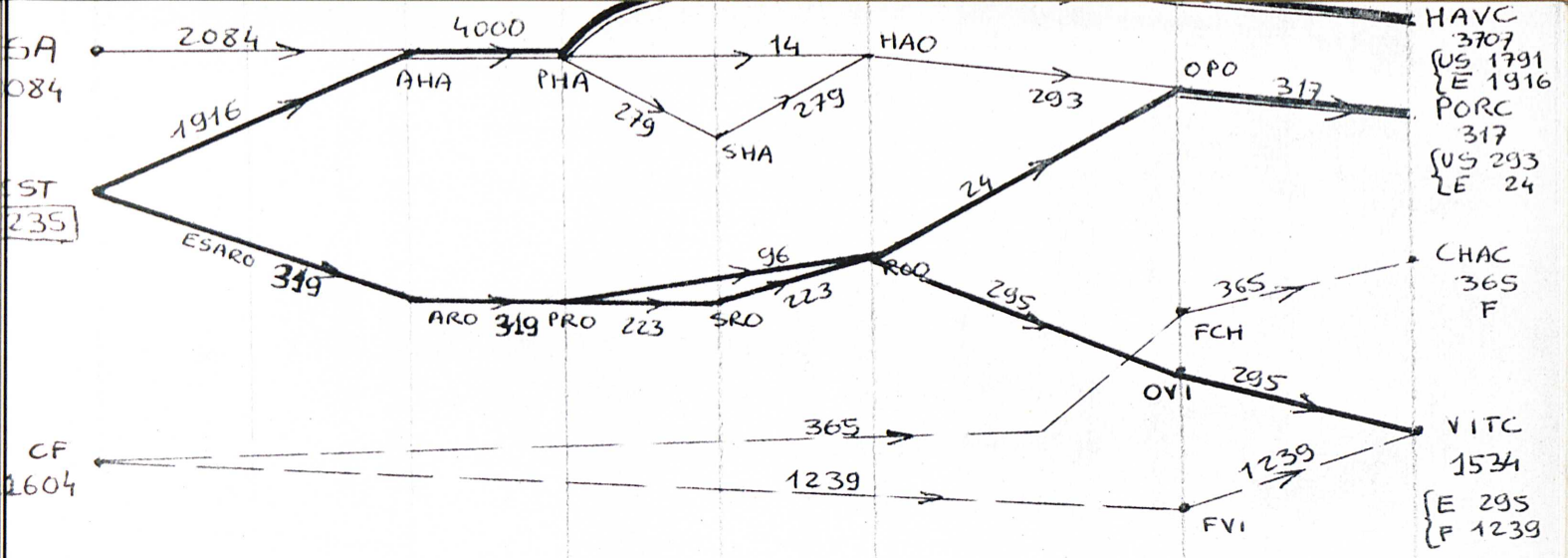
9

C A S 4 C Ø U T - 5


USA
2084
2084
AHA
3690
PHA
3690
HAVC
3690
{US 2084
{E 1606
1606
EST
1606
FPO
365
PORC
365
F
365
FCH
365
CHAC
365
F
365
CF
2292
1562
FVI
1562
VITC
1562
F
1

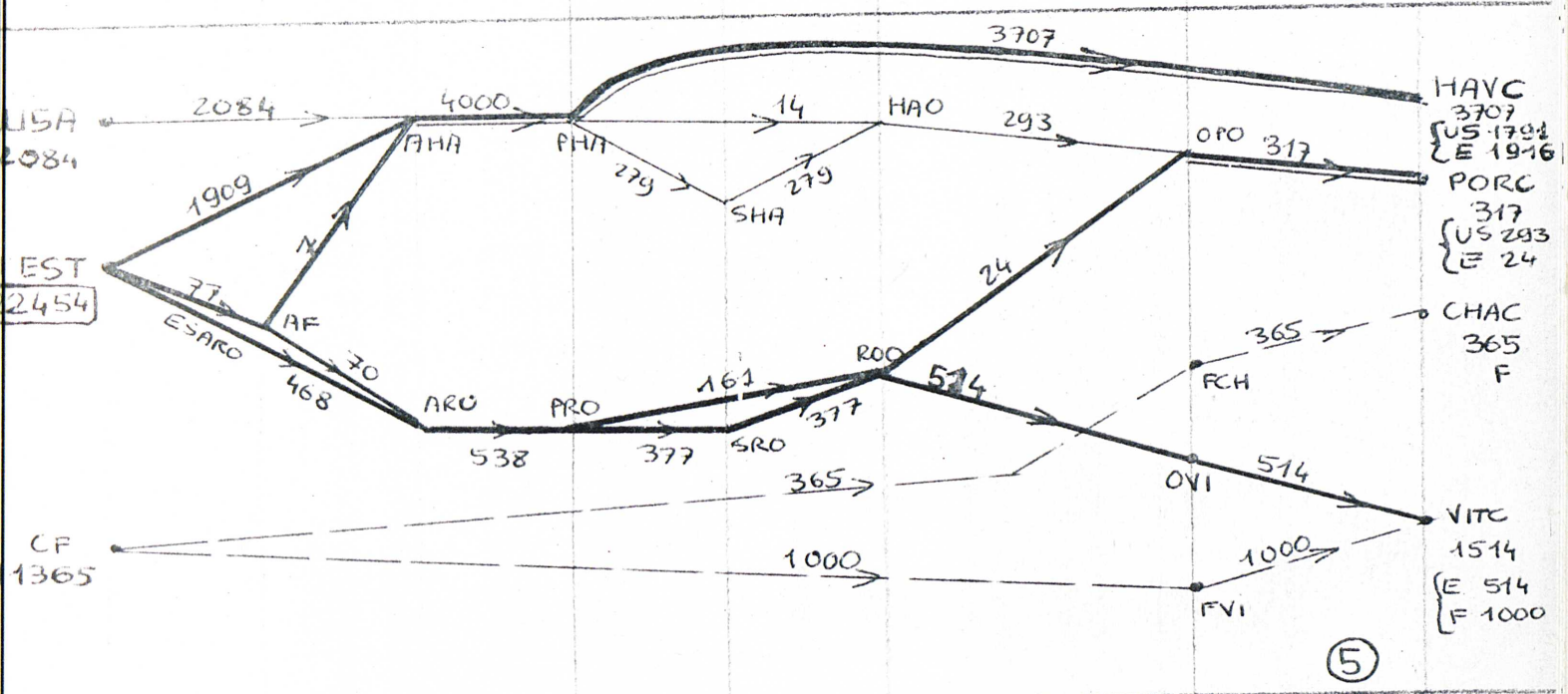

3707
USA
2084
2084
4000
AHA
PHA
14
HAO
293
OPO
293
HAVC
3707
{US 1791
{E 1916
1916
EST
1916
279
SHA
279
FPO
26
PORC
319
{US 293
{F 26
26
FCH
365
CHAC
365
F
365
CF
953
1562
FVI
1562
VITC
1562
F
2


3707
USA
2084
2084
4000
AHA
PHA
14
HAO
293
OPO
313
HAVC
3707
{US 179
{E 191
PORC
317
{US 293
{E 24
1916
279
SHA
279
EST
1940
ESARO
24
ARO
24
PRO
7
17
17
SRO
ROO
24
FPO
CHAC
365
F
365
FCH
CF
1927
1562
FVI
1562
VITC
1562
F
3



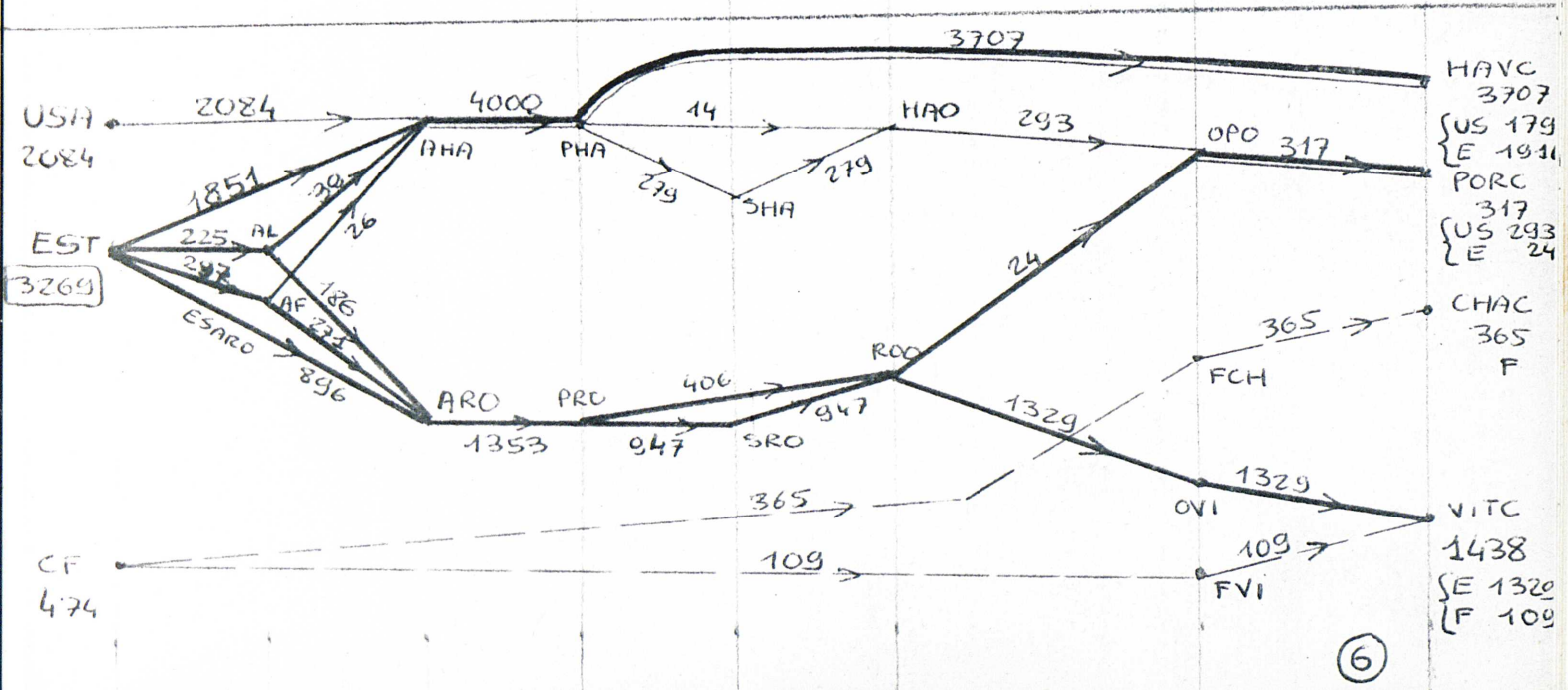
SA
084
2084
4000
AHA
PHA
14
HAO
OPO
317
HAVC
3707
US 1791
E 1916
PORC
317
US 293
E 24
1916
279
279
SHA
293
EST
235
24
ESARO
319
96
ROO
CHAC
365
F
ARO
319
PRO
223
SRO
223
295
365
FCH
OVI
295
VITC
1534
E 295
F 1239
CF
1604
365
1239
1239
FVI

4



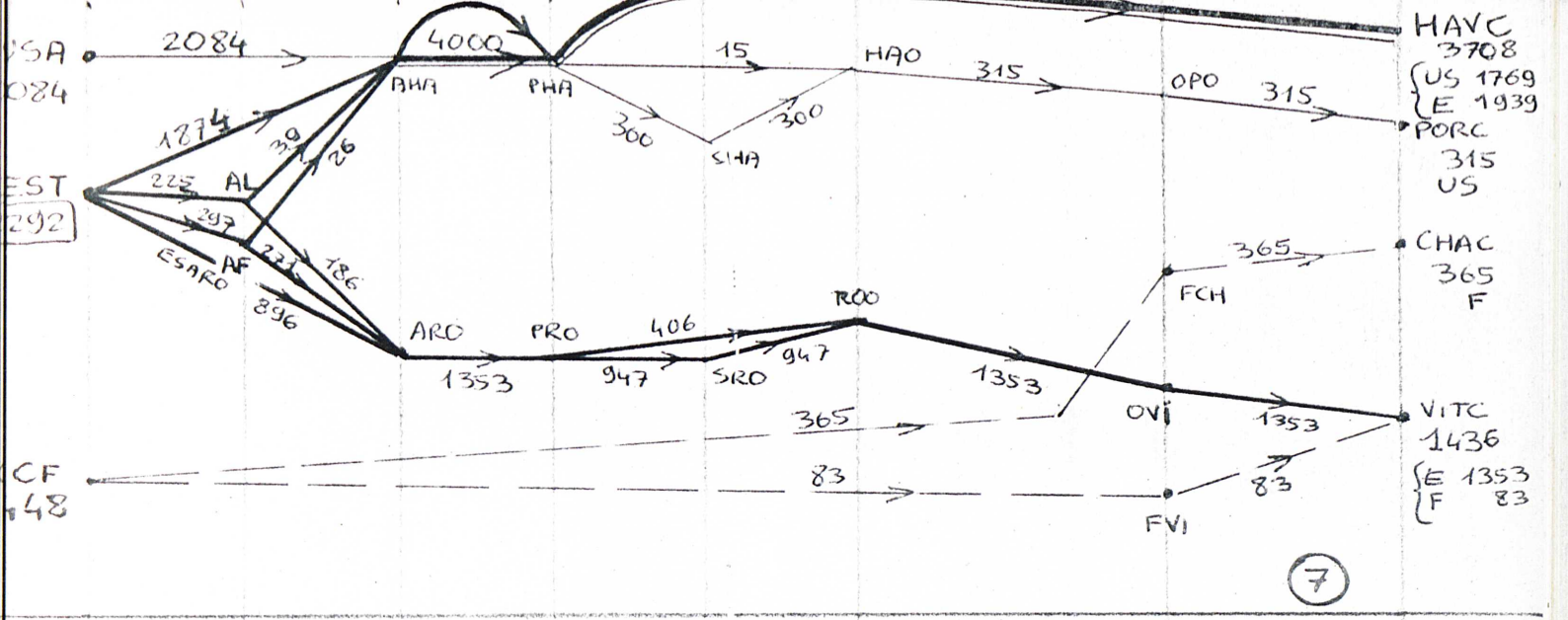
3707
USA
2084
2084
4000
AHA
PHA
14
HAO
293
OPO
317
HAVC
3707
US 1791
E 1916
PORC
317
US 293
E 24
1909
279
279
SHA
EST
2454
77
AF
ESARO
468
70
ARO
PRO
161
ROO
24
CHAC
365
F
365
FCH
538
377
SRO
377
514
OVI
514
VITC
1514
E 514
F 1000
CF
1365
365
1000
1000
FVI

5

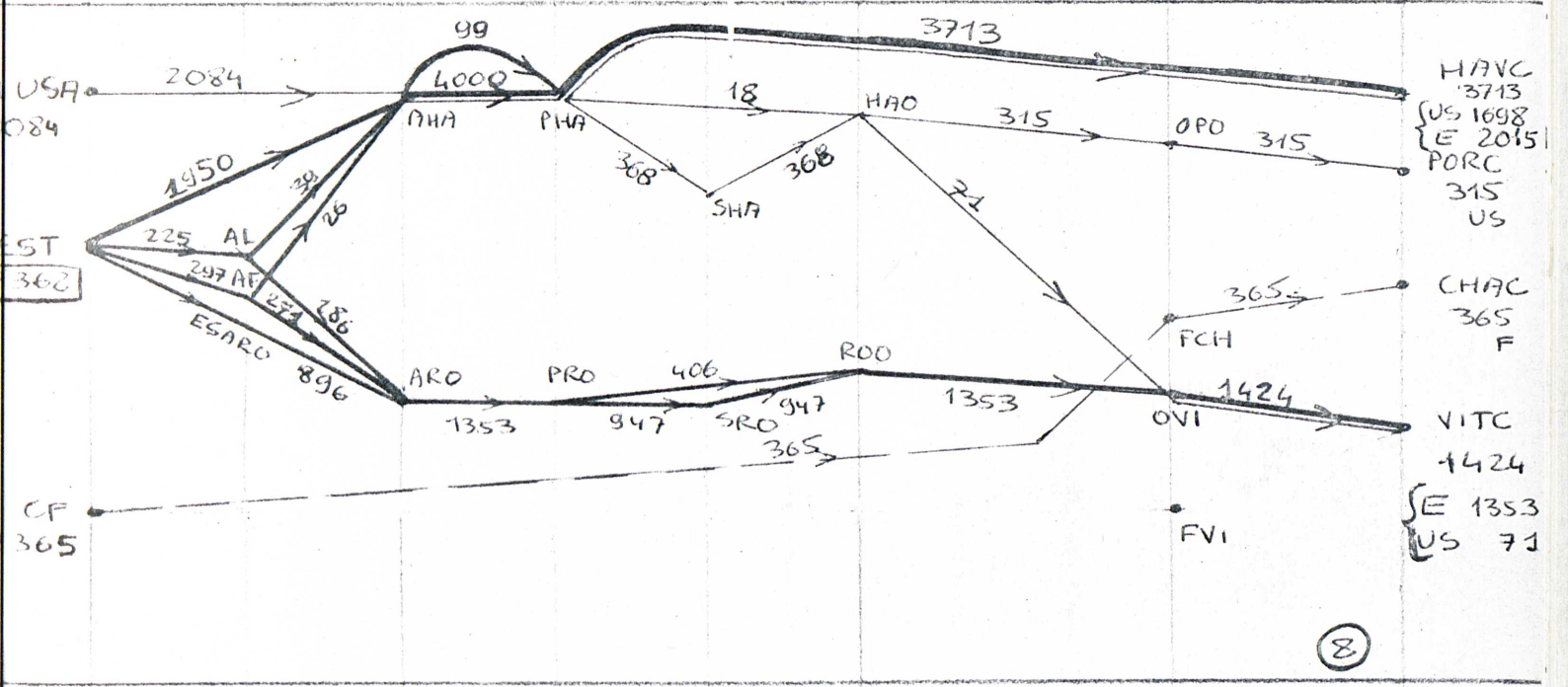


3707
USA
2084
2084
4000
AHA
PHA
14
HAO
293
OPO
317
HAVC
3707
US 179
E 1911
PORC
317
US 293
E 24
1851
39
26
279
SHA
279
EST
3269
225
AL
297
AF
186
271
ESARO
896
24
CHAC
365
F
365
FCH
ARO
PRO
406
ROO
1353
947
SRO
947
1329
1329
OVI
VITC
1438
E 1329
F 109
CF
474
365
109
109
FVI

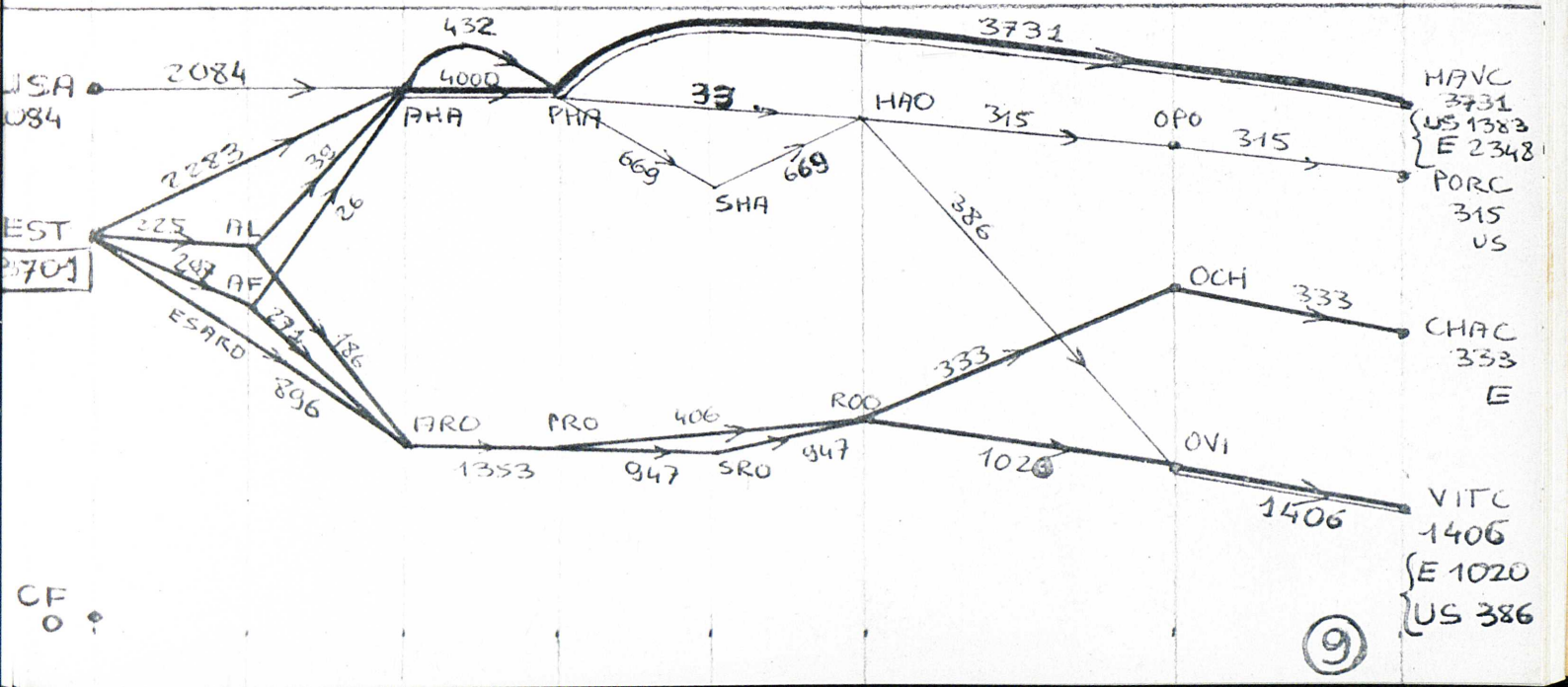
6


2084
4000
AHA
PHA
15
HAO
315
OPO
315
HAVC
3708
{US 1769
{E 1939
PORC
315
US
300
300
SHA
1274
39
26
225
AL
297
AF
231
186
ESARO
896
ARO
PRO
406
947
SRO
947
1353
ROO
1353
365
FCH
CHAC
365
F
OVI
1353
VITC
1436
{E 1353
{F 83
365
83
83
FVI
CF
48

7

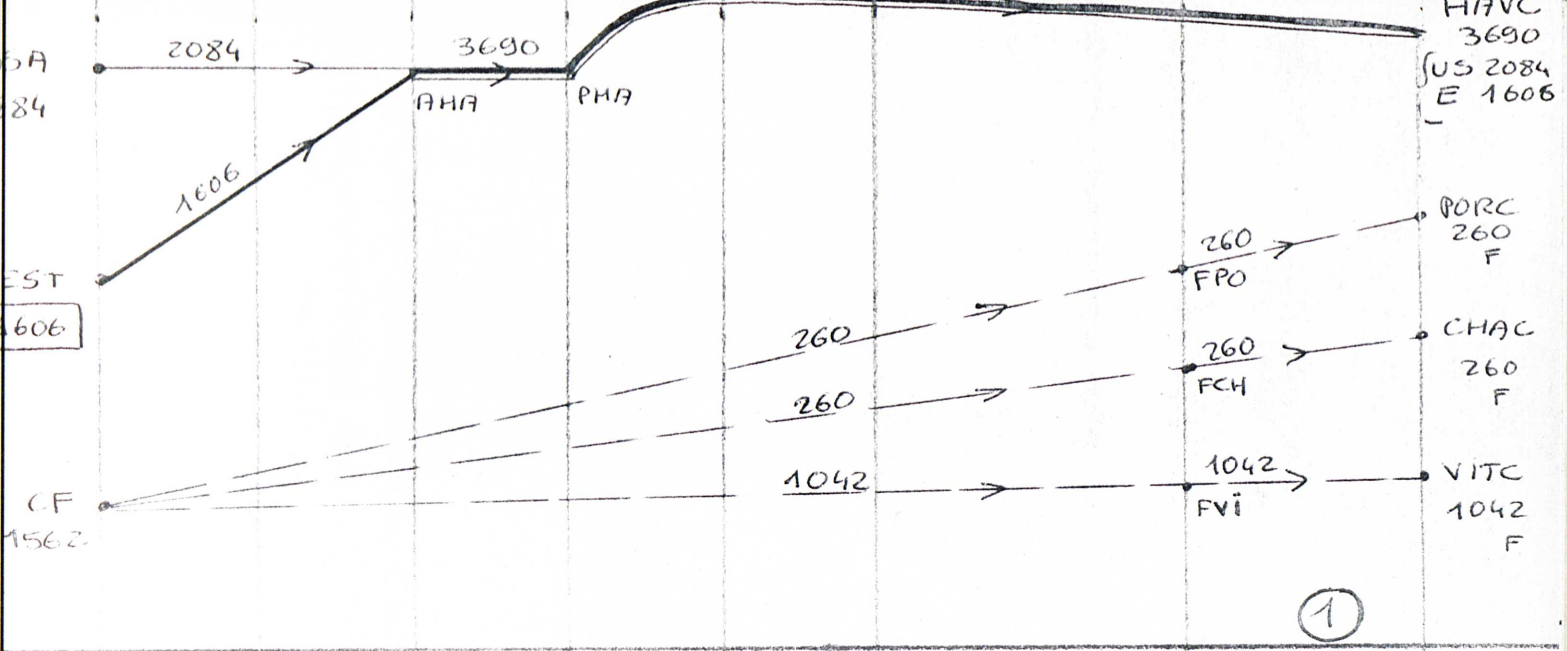

99
3713
2084
4000
AHA
PHA
18
HAO
315
OPO
315
HAVC
3713
{US 1698
{E 2015
PORC
315
US
368
368
SHA
1950
39
26
225
AL
297
AF
231
186
ESARO
896
21
ARO
PRO
406
947
SRO
947
1353
ROO
1353
365
FCH
CHAC
365
F
OVI
1424
VITC
1424
{E 1353
{US 71
365
CF
365
FVI

8

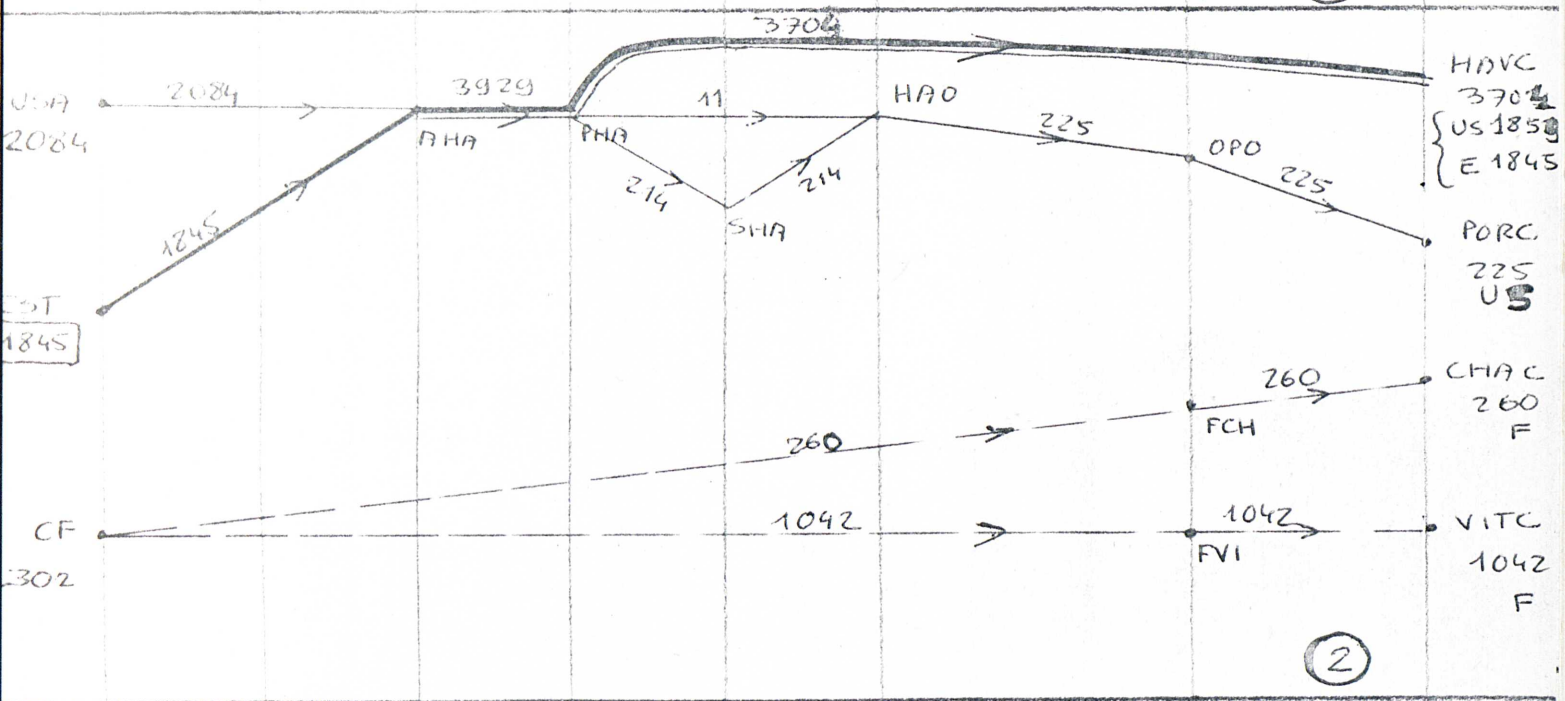

432
3731
2084
4000
AHA
PHA
33
HAO
315
OPO
315
HAVC
3731
{US 1383
{E 2348
PORC
315
US
669
669
SHA
2283
39
26
225
AL
297
AF
231
186
ESARO
896
386
OCH
333
CHAC
333
E
333
ARO
PRO
406
947
SRO
947
1353
ROO
1020
OVI
1406
VITC
1406
{E 1020
{US 386
CF
0

9

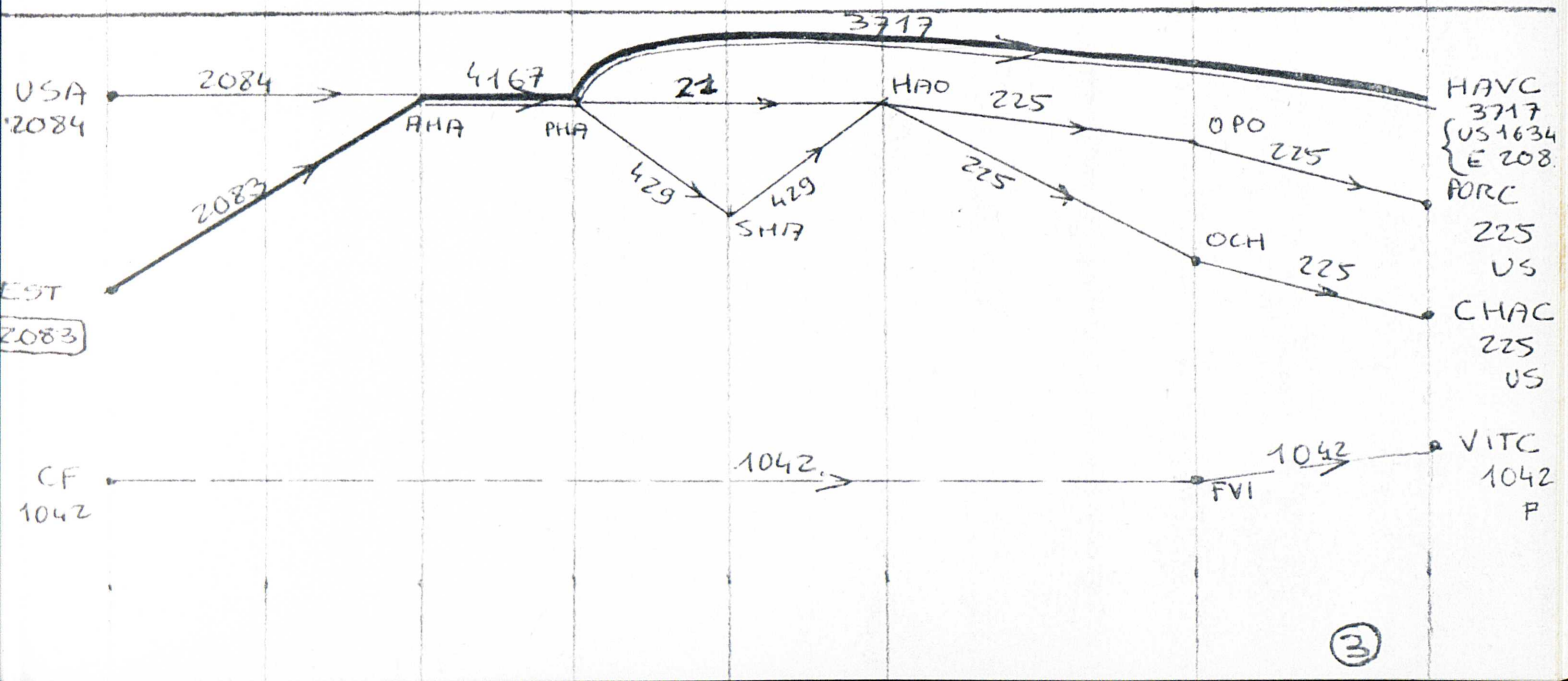
C A S 9 H C Ø U T - 29


2084
3690
AHA
PHA
HAVC
3690
US 2084
E 1606
1606
260
FPO
PORC
260
F
260
FCH
CHAC
260
F
260
1042
1042
FVI
VITC
1042
F
CF
1562

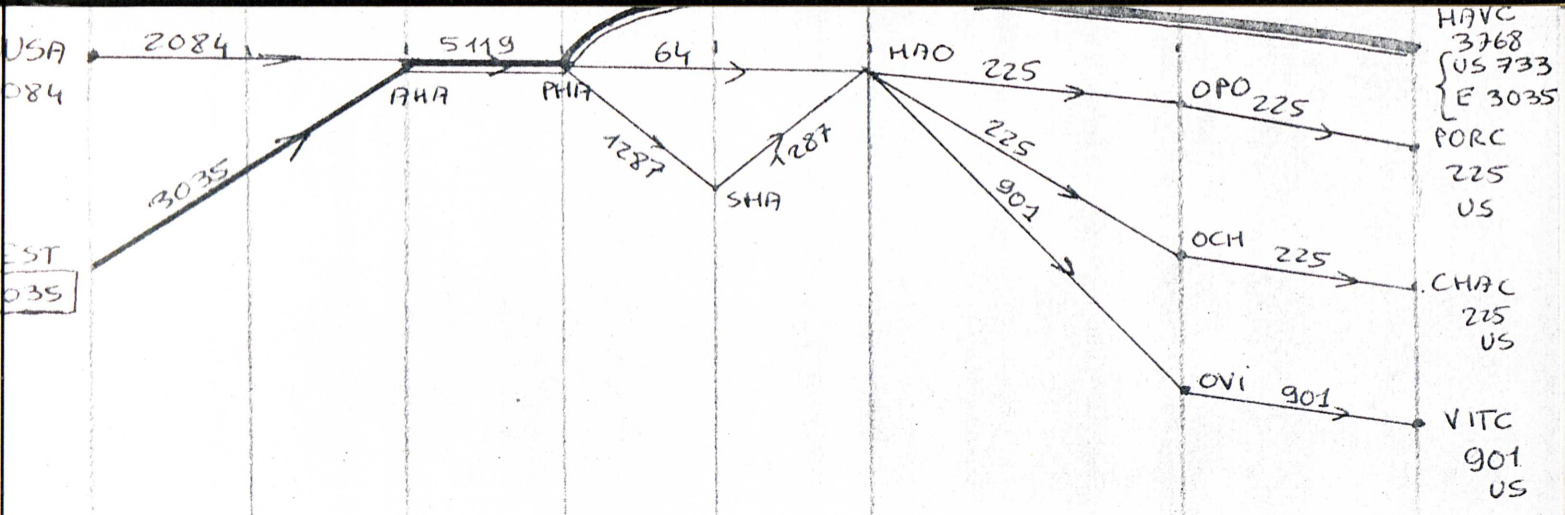
1


3704
2084
3929
AHA
11
PHA
HAO
225
OPO
225
214
214
SHA
1845
HAVC
3704
US 1859
E 1845
PORC
225
US
260
FCH
CHAC
260
F
260
1042
1042
FVI
VITC
1042
F
CF

2


3717
2084
4167
AHA
21
PHA
HAO
225
OPO
225
429
429
SHA
225
OCH
225
2083
HAVC
3717
US 1634
E 208
PORC
225
US
CHAC
225
US
1042
1042
FVI
VITC
1042
P
CF
1042

3


USA
084
2084
5119
64
AHA
PHA
HAO
225
OPO
225
HAVC
3768
US 733
E 3035
PORC
225
US
3035
1287
1287
SHA
225
901
OCH
225
CHAC
225
US
EST
035
OVI
901
VITC
901
US

4

C - ANALYSE SOMMAIRE DES RESULTATS -

Les trois exemples qui précèdent convaincront de la complexité des résultats, et de la puissance de l'outil que nous avons utilisé. On voit en particulier que l'approvisionnement d'une centrale donnée (c'est-à-dire la nature du charbon, et le port de provenance) est très variable en fonction des valeurs de tous les paramètres.

De l'ensemble des "cas" que nous avons traités, nous avons pu cependant dégager quelques résultats stables, et qui concernent heureusement en particulier le problème de choix entre les deux ports, qui était au centre de notre étude.

Ces résultats sont les suivants :

1. Mode d'acheminement

Dans tous les cas, avec les "coûts" S.N.C.F. égaux aux tarifs que nous avons utilisés, l'acheminement par voie d'eau est préférable à l'acheminement par voie ferrée.

La paramétrisation des coûts S.N.C.F. dans deux cas particuliers nous a permis d'apprécier jusqu'à quelle réduction des coûts ou tarifs S.N.C.F. ce résultat restait valable:

Le "cas" avec second membre 7, c'est-à-dire :

US = 700
LH = 1400
P = 650 (milliers de tonnes)
C = 800
V = 1750

qui correspond à la période de 9 ans comprise entre 1967 et 1975, nous a montré qu'il fallait une réduction de 48 % des coûts S.N.C.F. pour que l'acheminement par voie ferrée devienne partiellement compétitif : avec une telle réduction, on voit en effet apparaître 212.000 tonnes sur le trajet par fer Le Havre/Champagne.

.../...

2. Acheminement du charbon américain

Un des résultats les plus nets est sans doute celui-ci : contrairement à ce que l'on aurait pu penser à priori, le charbon américain doit être affecté en priorité aux trois centrales de Vitry, Champagne et Porcheville. L'explication en est simple : le charbon américain a un pouvoir calorifique nettement supérieur aux charbons polonais, russe et français ; c'est donc lui qu'il faut faire voyager le plus loin, puisque c'est pour lui que la thermie "pèse" le moins.

Un corollaire de cette propriété des solutions trouvées est donc que la centrale du Havre doit être approvisionnée en premier par du charbon polonais et russe.

Dans beaucoup de cas, donc, la centrale du Havre sera approvisionnée totalement en charbon polonais. Il existe cependant deux types d'exception à cette règle:

- Le charbon polonais et russe peut être en quantité insuffisante pour alimenter la centrale du Havre ; dans ce cas, il faudra compléter avec du charbon américain. Exemples : voir les cas 4CØUT - 1, (1) et (2).

- Le deuxième type d'exception est dû au double fait que la capacité présente du port du Havre est limitée, et égale à 4.000.000 de tonnes, et que le charbon américain ne peut être déchargé qu'au Havre. Si donc les 4.000.000 de tonnes de capacité du Havre moins le charbon américain, c'est-à-dire la capacité du port du Havre qui peut être réservée au charbon polonais ou russe, est insuffisante pour alimenter la centrale du Havre, il faudra bien alors qu'une partie du charbon américain vienne compléter l'apport polonais ou russe. C'est ce qui se passe dans la totalité des cas de 4CØUT - 5, comme de 9HCØUT.

3. Acheminement du charbon polonais et russe - Investissements

- Comme on vient de le voir, le charbon polonais et russe doit d'abord se diriger vers la centrale du Havre, jusqu'à une limite qui correspond soit aux besoins de cette centrale (par exemple : cas 4CØUT - 1 (3)), soit à la saturation du port du Havre (par exemple : cas 4CØUT - 5 (3)).

.../...

- Le charbon polonais ou russe (s'il en reste) approvisionne alors les trois autres centrales en passant par le port de Rouen.

Il faut noter que, dans le port de Rouen, les seuls arcs empruntés sont toujours 1APRO, 1PSRO, 2SROO, 1TRROO (voir leur signification au chapitre V : application au problème).

Pour aller à Rouen, les arcs 5ESARO et 6ESARO ne sont jamais empruntés.

Jusqu'à quelle limite le charbon polonais et russe emprunte-t-il ainsi le port de Rouen ? (en supposant qu'il y en a suffisamment pour que sa propre quantité ne constitue pas une contrainte).

Il résulte de ce qui a été expliqué aux chapitres V et VI, concernant la schématisation du transport maritime, que le coût marginal du transport entre EST et ARO en fonction du tonnage est un escalier à trois niveaux :

. premier niveau
(ESAL = 0
(ESAF = 0
ESARO, donc 1APRO $\leqslant$ 319

. deuxième niveau
(ESAL = 0
(ESAF $\neq$ 0 et $\leqslant$ 77
(1APRO = f (ESAF)
et pour ESAF = 77, 1APRO = 538

. troisième niveau
(ESAL $\neq$ 0
(ESAF = g (ESAL)
(1APRO = h (ESAL)

Ce dernier niveau est lui-même limité par la contrainte de saturation du port de Rouen, 32KRO, qui entraîne

1APRO $\leqslant$ 1353

Ceci étant rappelé, il apparaît des résultats que nous avons trouvé que, schématiquement :

(a) - le charbon polonais ou russe emprunte le port de Rouen jusqu'à saturation du deuxième niveau, soit 538.000 tonnes.

.../...

(b) - il emprunte ensuite le port du Havre, jusqu'à saturation de celui-ci,

(c) - il revient ensuite au port de Rouen, jusqu'à saturation du celui-ci, soit 1.353.000 tonnes,

(d) - le supplément de charbon polonais ou russe, s'il existe, passe par le port du Havre, que l'on développe d'autant (arc 2APHA).

Ces quatre règles, et l'ordre de priorité qu'elles impliquent, doivent cependant être complétées par les remarques et les exceptions suivantes :

(a) L'ordre de priorité entre (a) et (b) doit parfois être nuancé, comme dans l'exemple 4CØUT - 1 : on y voit en effet que le charbon polonais ou russe emprunte le port de Rouen jusqu'à concurrence du premier niveau, soit 319.000 tonnes, puis passe au port du Havre jusqu'à l'approvisionnement complet de la centrale de Porcheville en charbon polonais ou russe, revient ensuite au port de Rouen jusqu'à saturation du deuxième niveau, soit 538.000 tonnes, et passe ensuite à nouveau au Havre.

(b) Le point (b) peut ne pas se réaliser, si, comme nous l'avons envisagé plus haut, le port du Havre est déjà saturé : c'est par exemple ce qui se passe dans l'exemple 4CØUT - 5.

(c) La règle (c) n'est pas toujours exacte : elle dépend évidemment de l'horizon choisi. Nous avons pu trouver un cas, l'exemple ICØUT - 27 (donc horizon infini), où une fois saturé le deuxième niveau de Rouen, soit 538.000 tonnes, tout le charbon polonais ou russe supplémentaire passe au port du Havre, non développé puis développé.

(d) Cette règle montre qu'il est plus intéressant d'investir au Havre qu'à Rouen ; mais elle est fondée, il ne faut pas l'oublier, sur l'hypothèse d'un développement continu du port du Havre.

De toute manière, il résulte de cet ensemble de règles, avec les remarques et exceptions qui les complètent, que les différents coûts marginaux de transport du charbon polonais ou russe par Rouen ou par Le Havre sont certainement voisins (ce qui explique la sensibilité du chemin optimal aux varia-

.../...

tions des paramètres). On peut donc en conclure qu'on n'aura intérêt à investir (que ce soit d'ailleurs au Havre ou à Rouen) que lorsque les deux ports seront simultanément saturés, c'est à-dire donc lorsque le charbon importé, américain + polonais et russe, atteindra un niveau de l'ordre de 4.000.000 + 1.353.000 ~ 5.500.000 tonnes.

4. Cas où le deuxième poste minéralier du Havre est construit

C'est notre exemple 9HCØUT - 29.

On y constate la même règle importante = le charbon polonais ou russe va d'abord alimenter la centrale du Havre. On voit bien en effet qu'à mesure que son importance croît, le charbon polonais ou russe "chasse" le charbon américain de la centrale du Havre, lequel approvisionne progressivement les trois autres centrales.

Dans cet exemple, le port de Rouen n'est jamais emprunté, car le charbon polonais ne suffit pas à alimenter la centrale du Havre.

N O T E

Cas où la consommation de la centrale du Havre est supérieure à la capacité du port du Havre -

Par exemple, et pour fixer les idées,

. HAVC = 5.000

. Consommation de toutes les autres centrales = 2.000

. US = 3.000

. EST = 4.000

Il faut évidemment, dans ce cas, développer le port du Havre.

La solution optimale, en appliquant les principes de priorité dégagés par l'examen des cas traités, est :

- au port du Havre, développé de 1.000 (3.000 US / 2.000 EST) qui alimentent la centrale du Havre.
- au port de Rouen, 2.000 EST, qui alimentent les trois autres centrales.

C'est cette solution qui est optimale, et non, par exemple :

- au port du Havre, développé de 3.000 (3.000 US / 4.000 EST, les 4.000 EST allant à la centrale du Havre.
- au port de Rouen : rien.

En effet, la "préférence" de la centrale du Havre pour le charbon polonais ou russe, en priorité sur le charbon américain, ne vaut que dans la mesure où l'on ne va pas jusqu'à développer excessivement le port du Havre pour assurer intégralement le respect de cette priorité.

Il faut cependant remarquer que ceci n'est exact que parce qu'on a supposé que l'on pouvait développer le port du Havre de façon continue : si le seul développement envisageable

.../...

est la construction d'un deuxième poste minéralier de grande capacité, alors il faudrait revenir certainement sur ce qui est dit plus haut : la solution optimale serait sans doute dans ce cas de tout envoyer au Havre, de façon à respecter la priorité du charbon polonais ou russe pour l'alimentation de la centrale du Havre (deuxième solution envisagée).

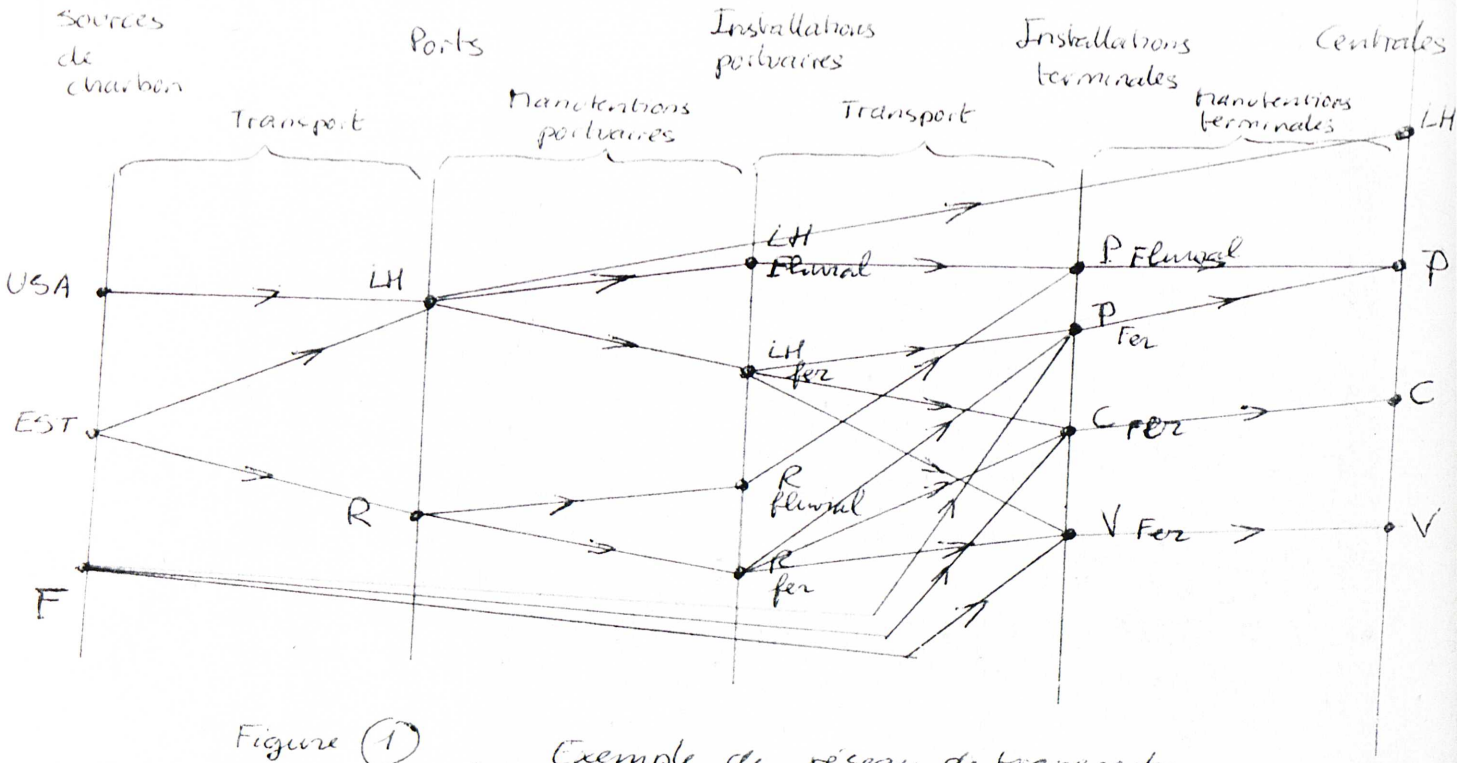
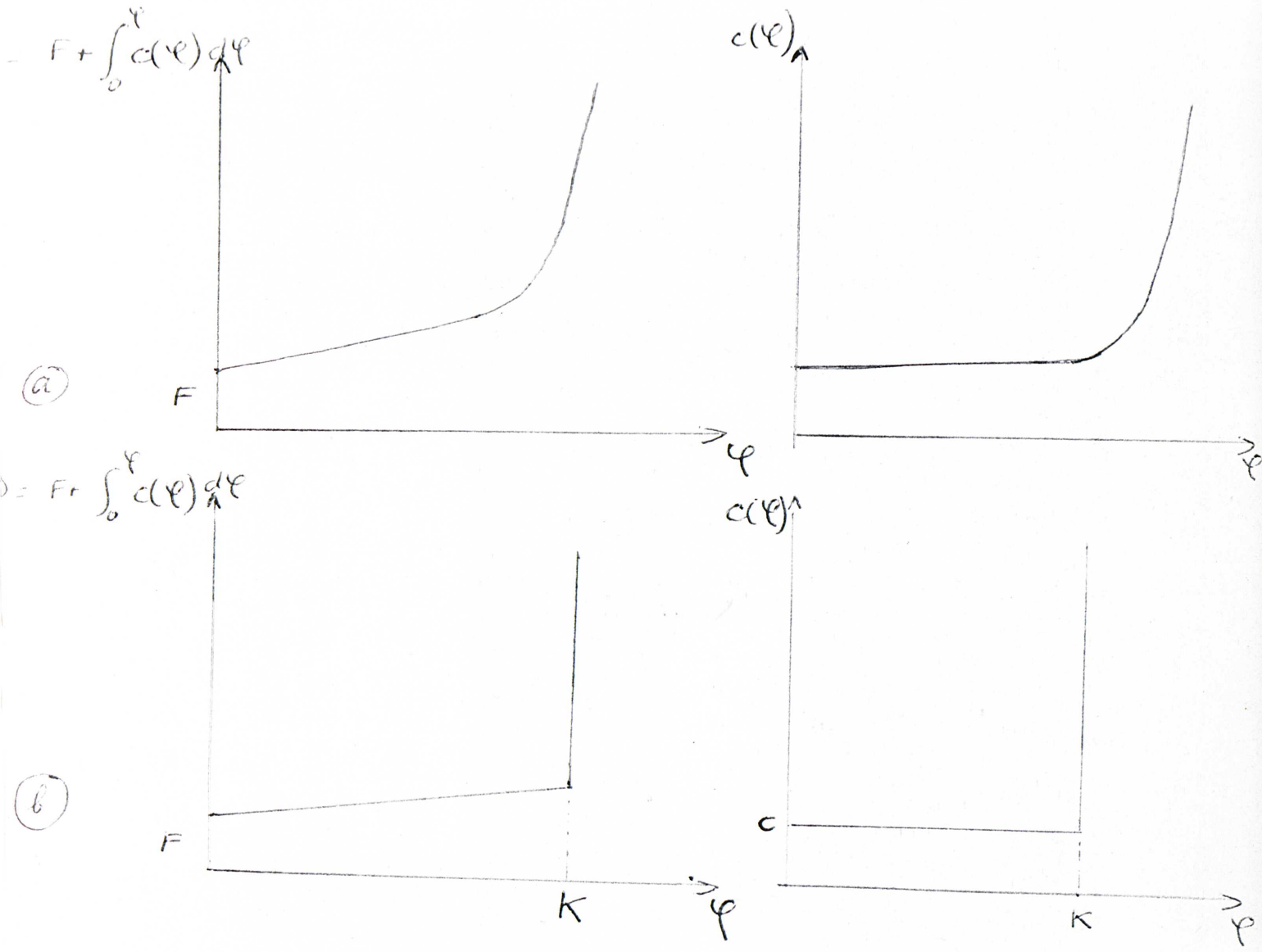


Figure (1) . Exemple de réseau de transport

charbons : USA = américain
EST = polonais + russe
F = français

ports LH = le Havre
R = Rouen

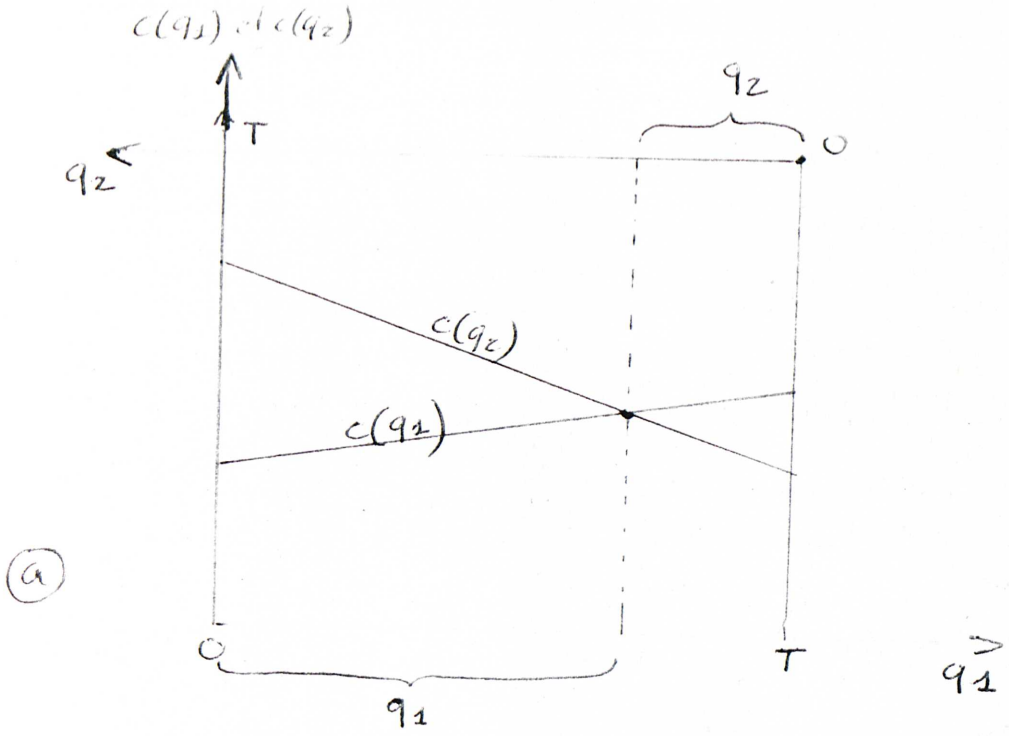
centrales LH = le Havre
P = Porcheville
C = Champagne
V = Vitry

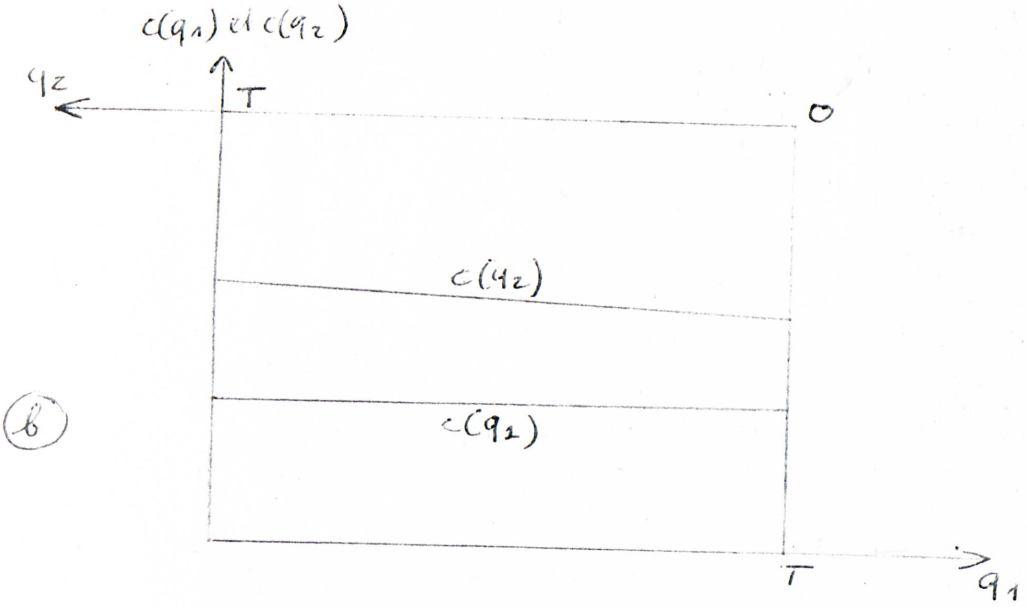


Figures (2a) et (2b) : Courbes des dépenses totales et des coûts marginaux à court terme.

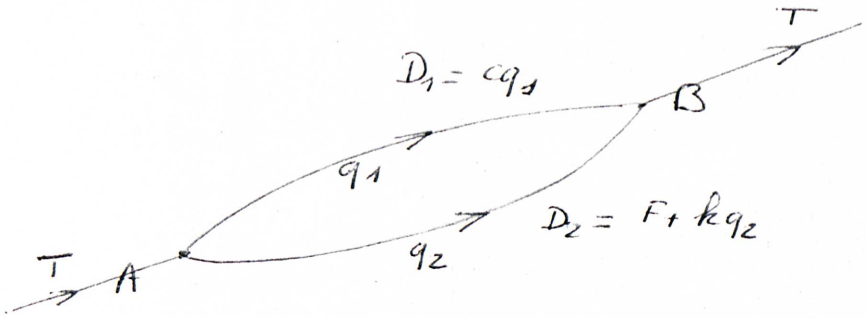
(a) installations élastiques

(b) installations inélastiques.





Figures (3a) et (3b) : Détermination graphique du trafic optimal dans le cas de deux installations.



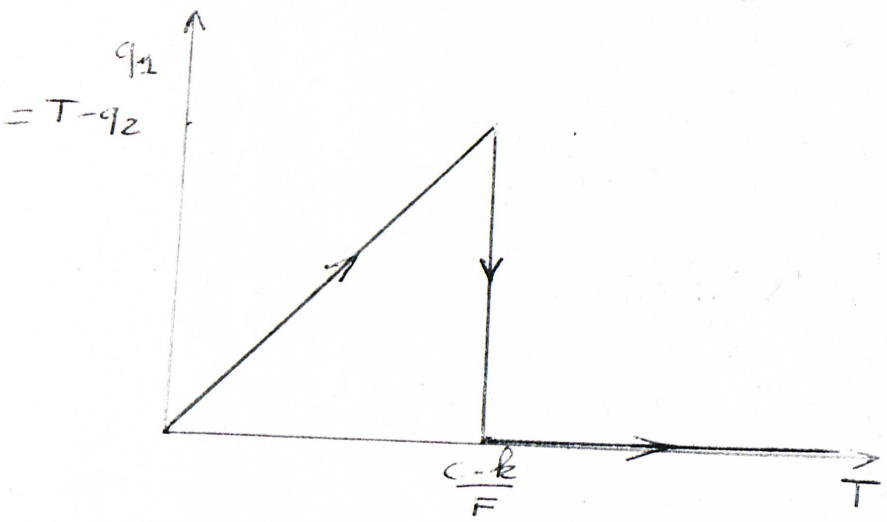
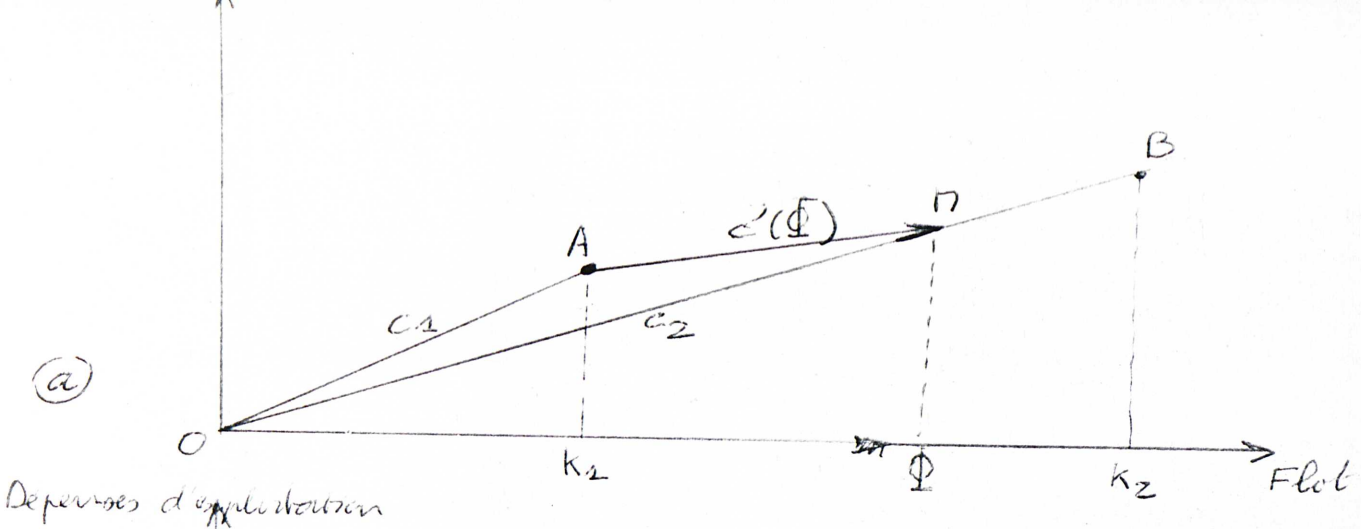
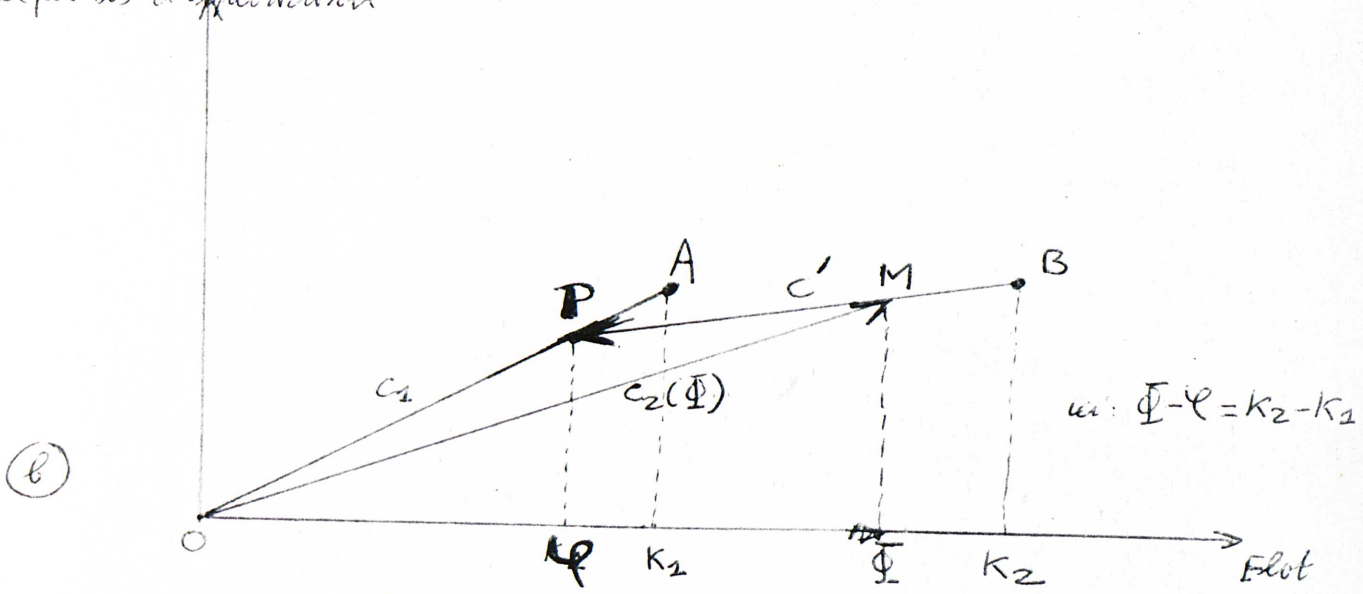


Figure (4) : Trafic optimal dans un cas particulier.



(a)

Dépenses d'exploitation



(b)

$si: \Phi - \varphi = K_2 - K_1$

Figures (5a) et (5b) : Relations entre c_1, c', et c_2

(a) : développement de type 2° ou 3°

(b) : développement de type 1°

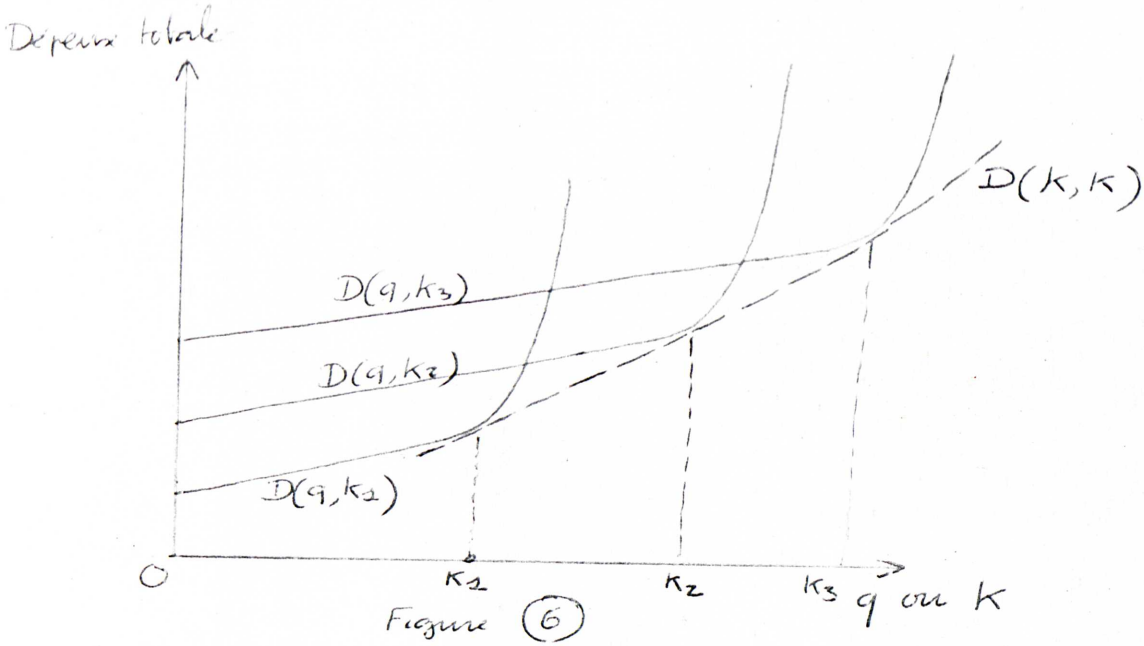


Figure (6)

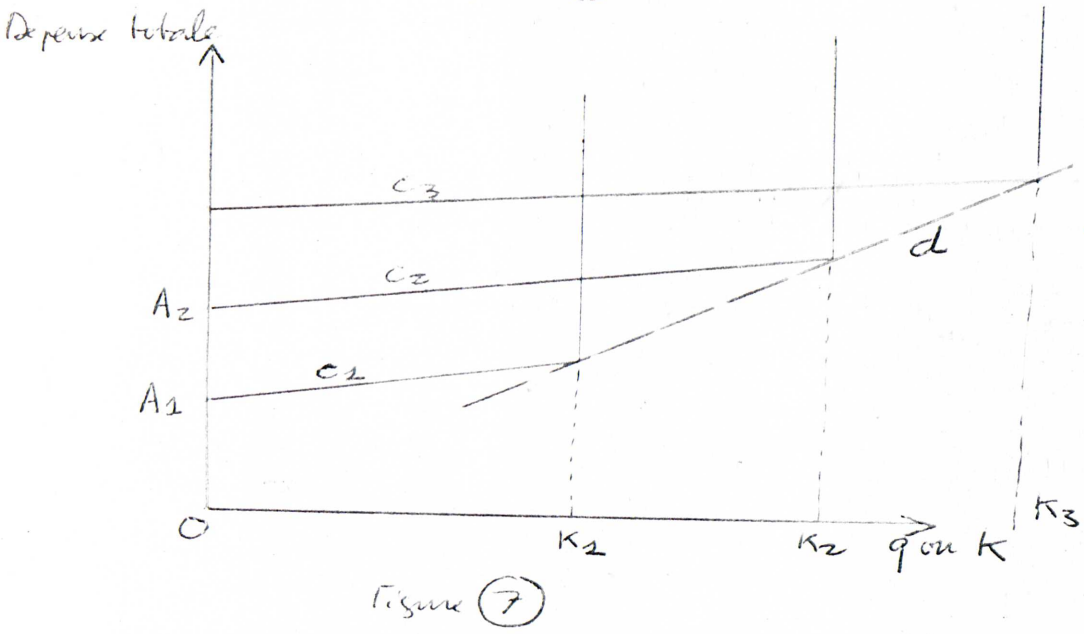


Figure (7)

Figures (6) et (7). Courbes des dépenses totales à court terme et à long terme, dans le cas d'installations élastiques, peu inélastiques

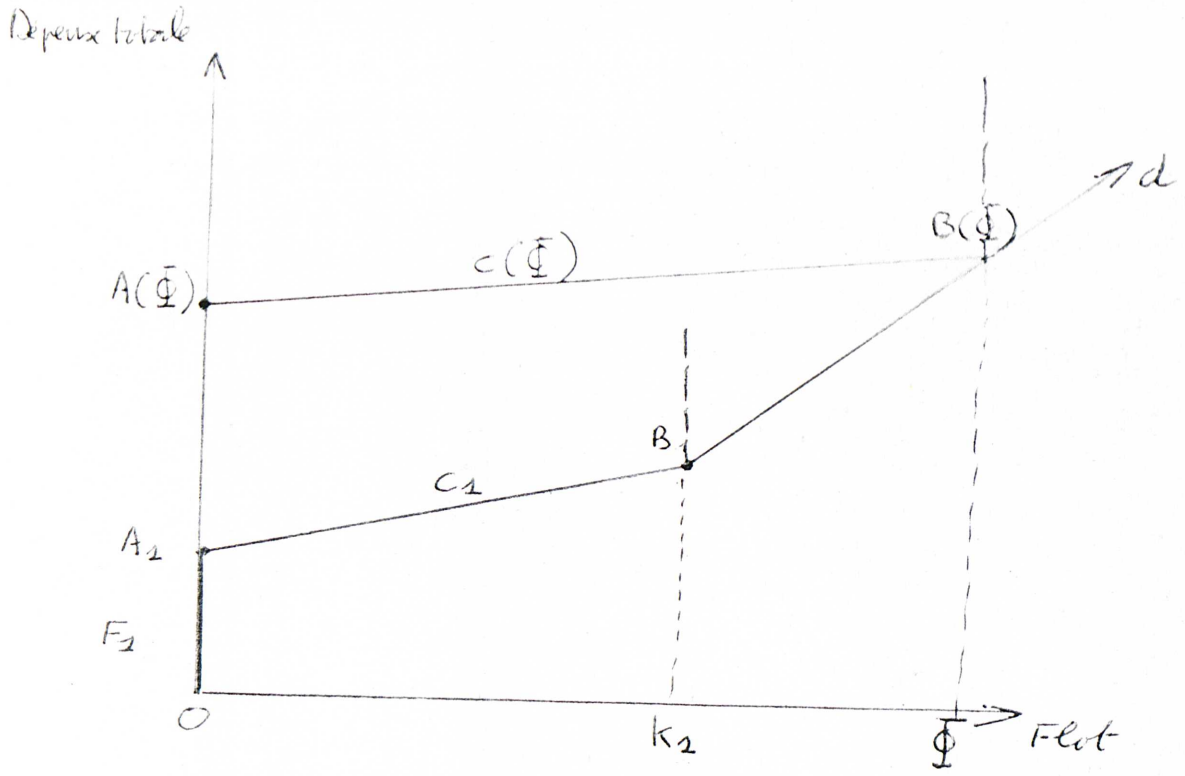
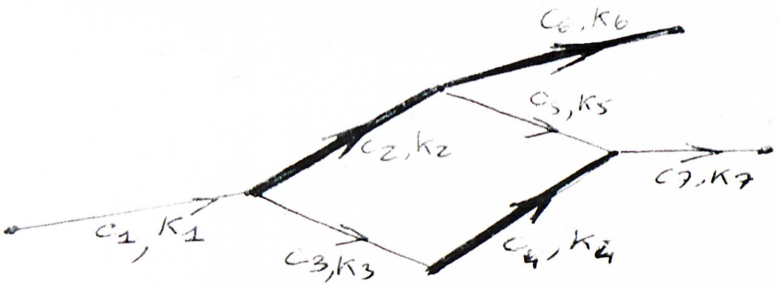
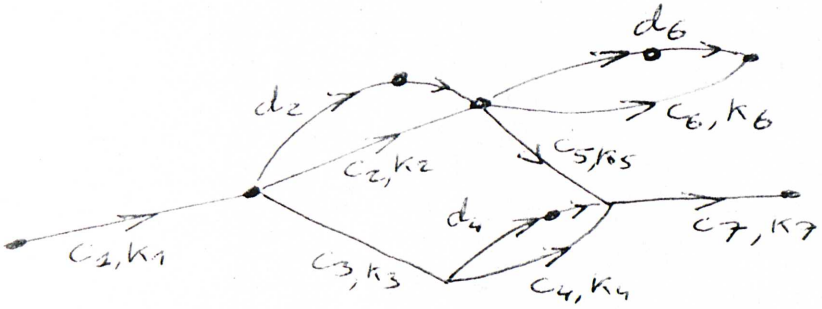


Figure (8) . Dépense totale optimale pour un flux $\bar{\Phi}$



(a)



(b)

Figure (9) Exemple d'introduction d'arcs de développement.

en (a) : réseau initial ; les arcs en gras sont ceux qui correspondent à une installation susceptible d'être développée.

en (b) : réseau avec les arcs de développement.

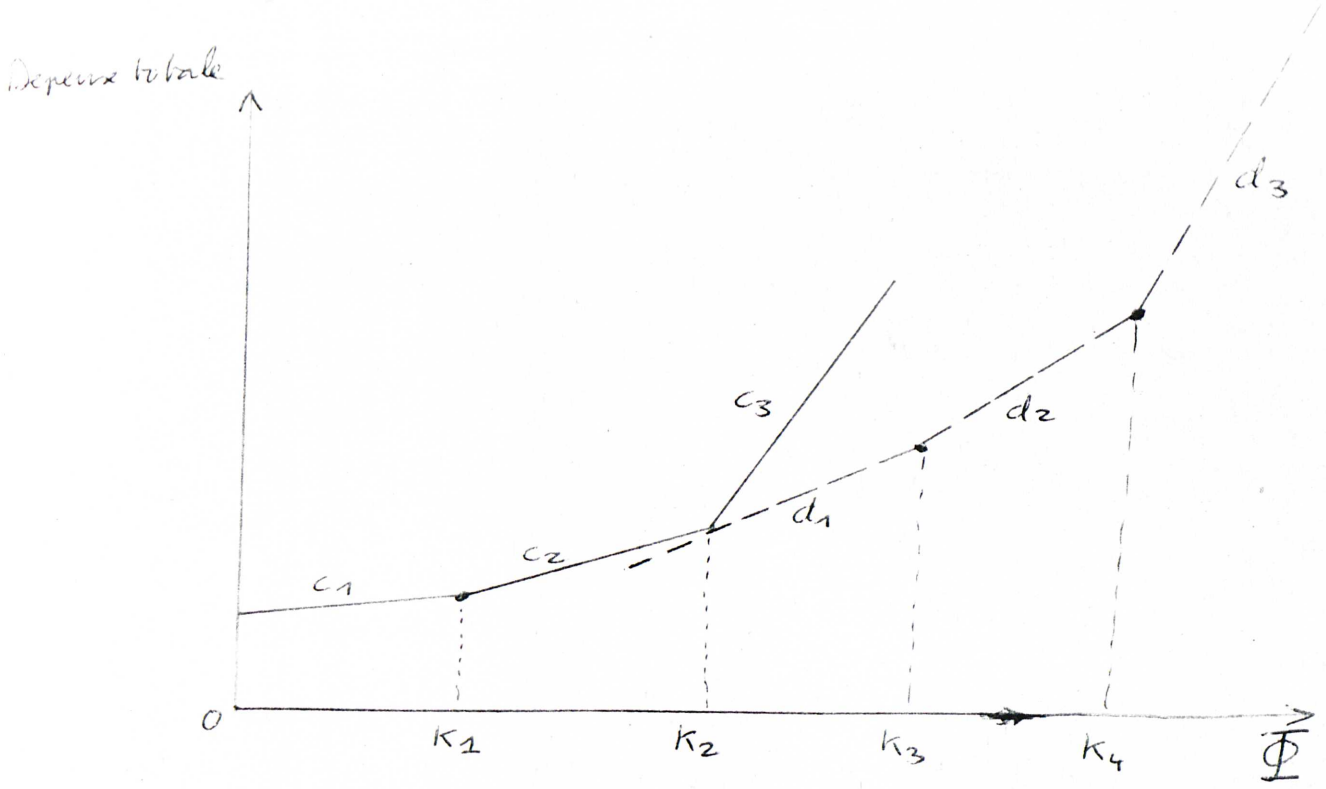


Figure (10) : Courbes des dépenses à court terme (——) et à long terme (— — —), approximées par un polygone convexe.

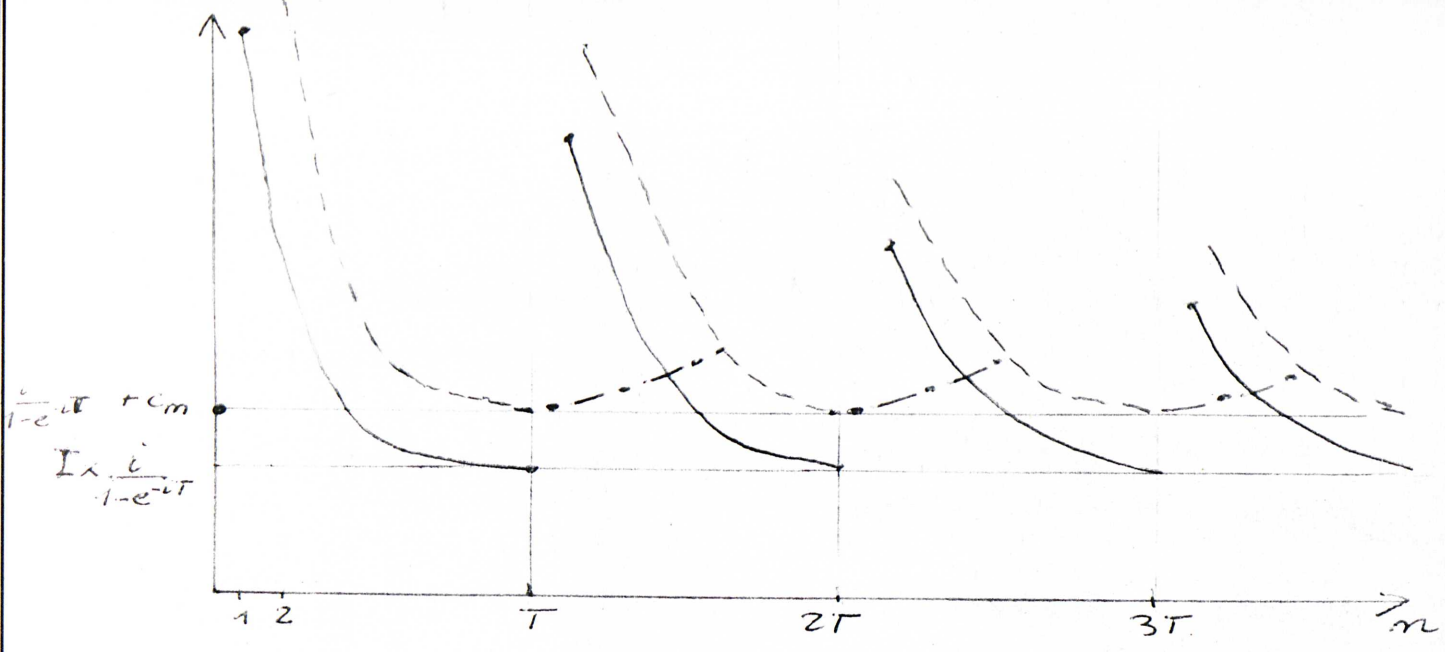


Figure (11)

——— : courbe représentative de $A(n)$

– – – courbe représentative de $d(n) = A(n) + C_m$

•—•— : courbe représentative de $c(T+n-kT)$

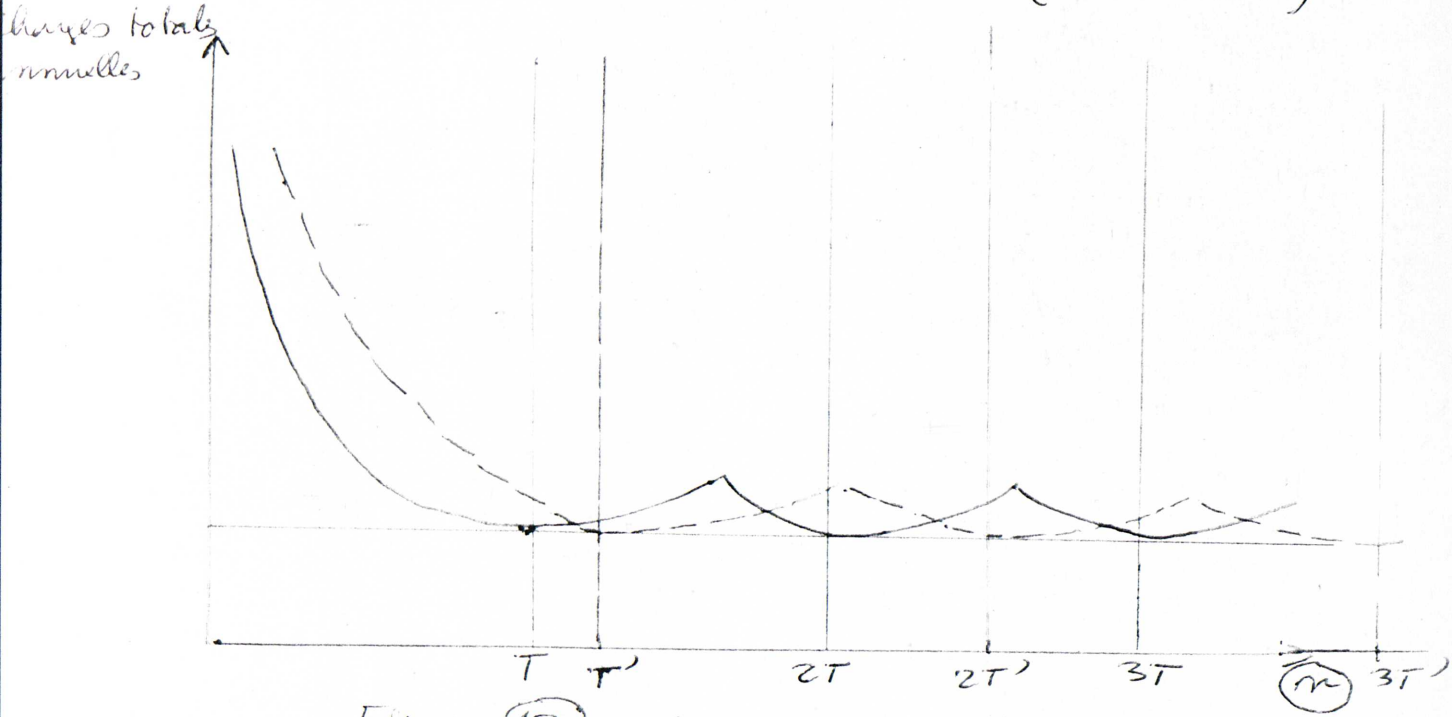


Figure (12) : Cas de deux installations à durées de vie T et T' différentes (et de même coût de développement au sens strict)

Les deux courbes des charges totales annuelles se coupent une infinité de fois

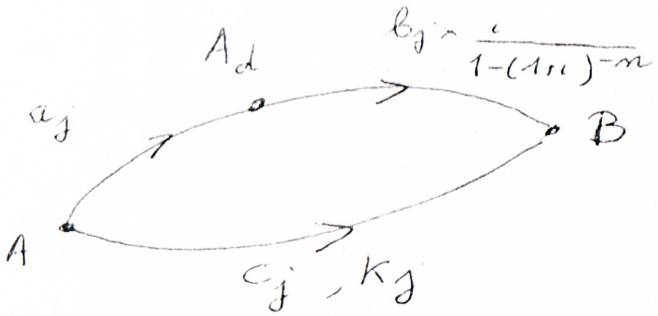


Figure (13) : paramétrisation de la fonction économique

$$\mathcal{F}(n) \equiv \sum c_j \ell_j + a_j \ell'_j + \lambda(n) \sum b_j \ell'_j$$

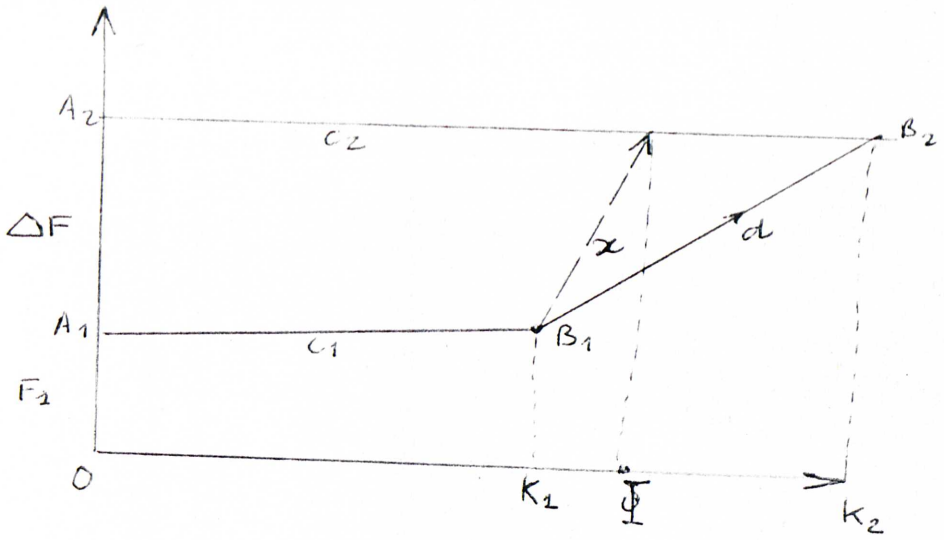


Figure (14)

Cas des mouvements discrets

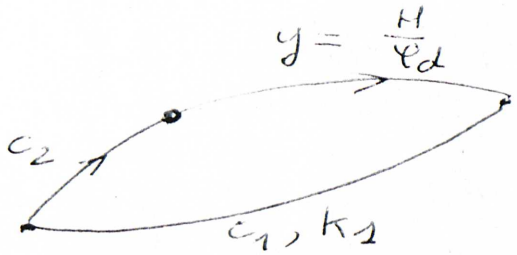


Figure (15)

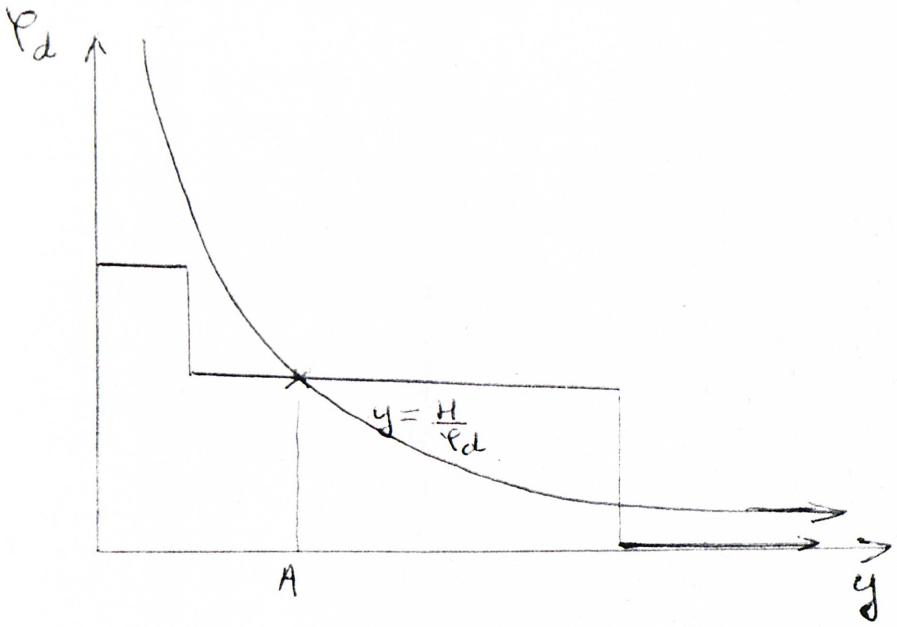
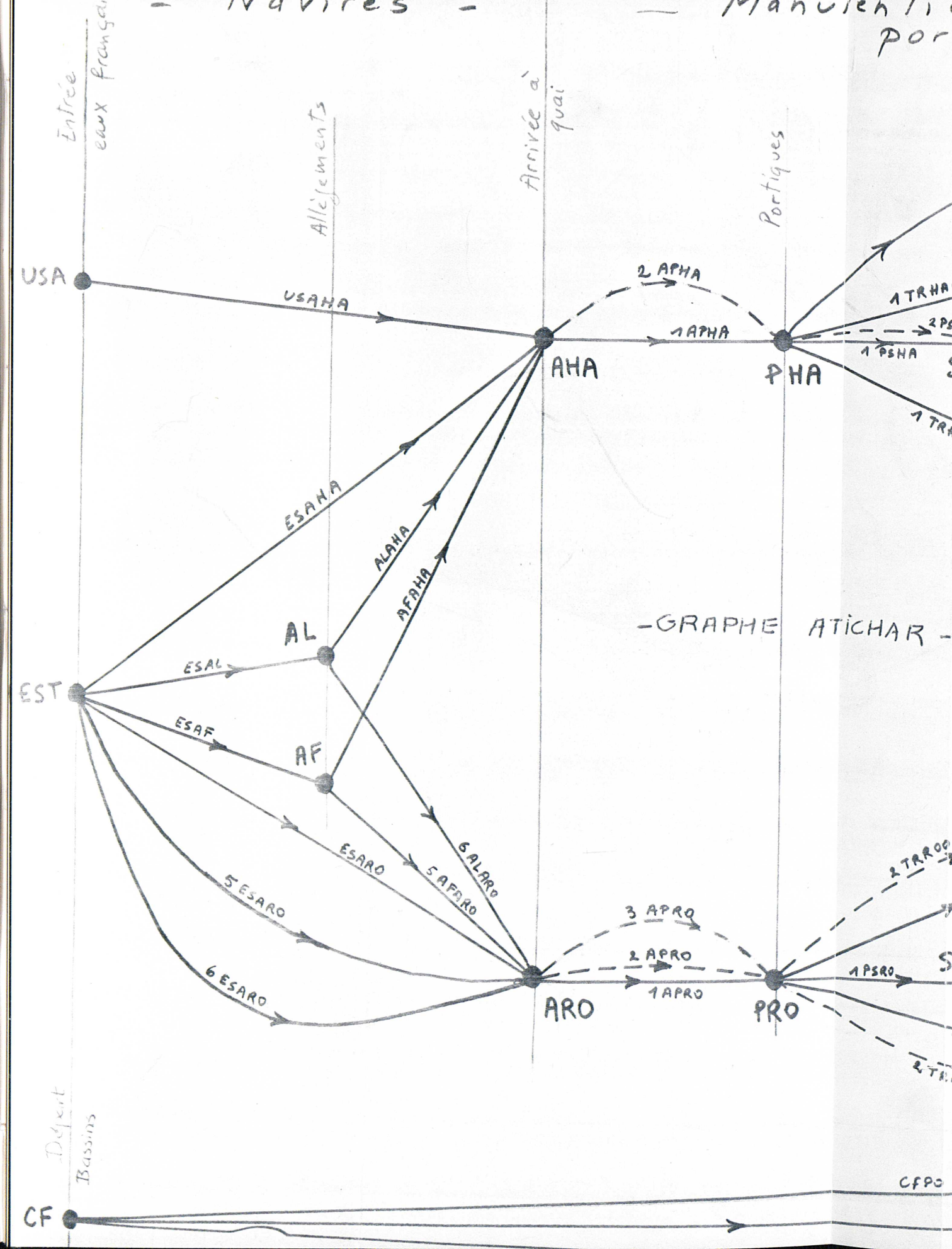


Figure (16)


Entrée eaux françaises
Allèglements
Arrivée à quai
Portiques
USA
USAHA
2 APHA
1 APHA
AHA
PHA
1 TRHA
1 PSHA
ESAHA
ALAHA
AFAHA
AL
ESAL
EST
ESAF
AF
ESARO
5 AFARO
6 ALARO
5 ESARO
6 ESARO
3 APRO
2 APRO
1 APRO
ARO
PRO
1 PSRO
CFPO
CF
Bassins

- Navires -

— Manutentions portuaires —

Intérieur

Terminaux

Entrée eaux françaises

Allégements

Arrivée à quai

Portiques

Stocks

Départ Fer + Eau

Arrivée Fer + Eau

USA

EST

CF

AHA

AL

AF

ARO

PHA

SHA

HAO

HAF

ROO

SRO

BRO

ROF

OPO

FPO

OCH

FCH

OVi

FVi

HAVC

PORC

CHAC

VITC

USAHA

2 APHA

1 APHA

2 PHAVC

1 TRHAO

1 SHAO

2 SHAO

2 PSHA

1 PSHA

HAOPO

1 TRHAF

2 SHAF

1 SHAF

HAOCH

HAOVi

1 OPORC

ESAHA

ALAHA

AFAHA

ESAL

ESAF

ESARO

5 ESARO

6 ESARO

6 ALARO

5 AFARO

3 APRO

2 APRO

1 APRO

2 TRROO

1 TRROO

2 SROO

1 SROO

2 BROO

1 PSRO

2 SROF

1 SROF

2 BROF

1 TRROF

2 TRROF

ROOPO

ROOCH

RODVi

ROFPO

ROFCH

ROFVi

HAFPO

HAFVi

HAFCH

1 FPORC

2 OCHAC

AFCHAC

2 OVITC

2 FVITC

CFPO

CFCH

- GRAPHE ATICHAR -

2. Le domaine de variation des importations de charbon-vapeur

a) Volume global des importations

Pour des raisons qui ont été développées au chapitre I (paragraphe I B 1 c), le domaine raisonnable, dans lequel devrait se situer le volume d'importation annuel global de charbon J est constitué par la fourchette :

Min. = consommation de la centrale du Havre

Max. = consommation des quatre centrales (Le Havre, Porcheville, Vitry, Champagne sur Oise).

Dans ces conditions, les deux hypothèses (forte et faible) de consommation de charbon au Havre se traduisent par deux hypothèses (forte et faible) d'importation de charbon.

Pour chacune de ces hypothèses, le domaine de J est formé par l'évolution dans le temps de la fourchette annuelle Le Havre - Ensemble : il est explicité par le tableau et le graphique qui suivent.

Sur ce tableau ou ce graphique, on peut remarquer qu'en 1970, dans l'hypothèse vraisemblable où les contrats avec l'U.R.S.S. et la Pologne seraient renouvelés, il sera nécessaire de faire appel à des options, soit polonaise, soit américaine, pour assurer l'approvisionnement du Havre.

On peut remarquer enfin que les hypothèses forte et faible (pas de fuel au Havre, ou bien fuel pour les groupes III et IV) donnent à l'importation des physionomies très différentes. On peut, en effet, envisager dans un cas un volume stable annuel d'environ 2 MT à partir de 1970 ; dans l'autre, les importations de charbon devront croître continuellement jusqu'en 1975, pour aboutir au moins à 4 MT.

b) Répartition par origine des importations

Rappelons que, pour un volume global J importé, il y aura lieu d'envisager les cas

US = 1 MT US = 2 MT US = 3 MT

(dans la mesure où l'on respecte US $\leq$ J) en complétant jusqu'à J par du charbon provenant de Pologne ou d'U.R.S.S (Cf. paragraphe I B 1 c).

.../...