

12/91

2 W

وزارة الجامعات

Ministère aux Universités

المدسة الوطنية للتكنولوجيا

BIBLIOTHEQUE — المكتبة

Ecole Nationale Polytechnique

# ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT *GENIE INDUSTRIEL*

## PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*ELABORATION D'UNE HEURISTIQUE*

*DE DIMENSIONNEMENT D'UN*

*RESEAU DE PIPELINES*

Proposé par : SONATRACH

Etudié par : N. TAIRI

Dirigé par : Dr. ABOUN

C. LOUANCHI

PROMOTION JUIN 1991

RESUME

*Cette étude traite le problème de dimensionnement d'un réseau de pipelines dans un environnement désertique, sans obstacles géographiques. Il est montré que le réseau est un arbre. Une méthode efficace est présentée pour déterminer la position optimale des jonctions et le diamètre des canalisations si la configuration de départ donnée.*

ABSTRACT

*In this study, we tackle the problem of designing gas pipeline network in a desert environment, with no physical obstacles (and therefore no constraints on the geometry). It is shown that such networks should be trees. An efficient method is presented for determining the optimal position of the junction points and diameter of the pipes with a given initial configuration.*

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

A NOS PARENTS

## REMERCIEMENTS



Bien que notre thèse soit considérée comme le produit de réflexions et de recherche d'un binôme, elle n'aurait pas vu le jour sans le soutien et la collaboration de plusieurs personnes.

Nous tenons à remercier tout spécialement Monsieur T. LAMRAOUI qui a bien voulu accepter la charge de présider ce jury.

Notre gratitude va à Monsieur H. BOUHADDOUDA pour nous avoir proposé le sujet et à Monsieur H. SARI de nous avoir fait partagé ses riches connaissances et son esprit de chercheur. Nous le remercions également d'avoir accepté de participer au jury de cette thèse.

Nos remerciements vont très sincèrement à Mademoiselle N. ABOUN qui a su nous diriger et nous encourager. C'est bien souvent grâce à ses réflexions fructueuses que ce travail a pu progresser.

Monsieur H. DAMERDJI nous fait l'honneur d'être membre du jury, nous l'en remercions très vivement.

A toute l'équipe des ASPHODELE, nous devons une mention spéciale pour l'ambiance de travail dans l'amitié et la tolérance, qu'ils savent entretenir.

Enfin, nous tenons à exprimer notre très sincère gratitude à ceux qui nous ont soutenu psychologiquement et matériellement. Nous pensons à nos amis, tout particulièrement à T. BENSEDDIK qui a su se montrer d'une grande gentillesse.

## SOMMAIRE



Introduction.

### Chapitre I Position du problème.

I.1 Généralités sur le transport par pipes.	4
I.2 Les problèmes du transport par pipelines.	5
I.3 Présentation du département Engeneering et Construction.	8
I.4 Aperçu de la méthode utilisée par le département E et C.	9

### Chapitre II Formulation mathématique du problème.

II.1 Définition du problème.	12
II.1.1 Description générale du problème.	12
II.1.2 Définition des paramètre principaux.	14
II.1.3 Choix de l'équation d'écoulement.	15
II.1.4 Choix de la fonction dec coûts.	17
II.2 Description du modèle.	18
II.2.1 Remarques préliminaires.	18
II.2.2 Représentation de la structure du réseau.	19
II.2.3 Equation sur les débits.	22
II.2.4 Equation sur les densités.	23
II.3 Formulation du problème pour le réseau de collectes.	24
II.3.1 Formulation de la fonction objectif.	24
II.3.2 Formulation des contraintes.	29
II.3.2.1 Contraintes sur les pertes de charge.	29
II.3.2.2 Contraintes additionnelles.	30
II.3.3 Formulation finale.	33
II.4 Formulation du problème pour le réseau de dessertes.	36

Chapitre III Rappels théoriques.

- III.1 La programmation non linéaire sans contraintes. 38  
III.2 Optimisation unidimensionnelle. 43

Chapitre IV Résolution du problème.

- IV.1 Choix des inputs. 46  
IV.2 Configuration réduite. 48  
IV.3 Analyse des résultats du réseau de collectes. 49  
IV.4 Analyse des résultats du réseau de dessertes. 57  
IV.5 Comparaison avec les résultats de la SONATRACH. 59  
IV.6 Analyse sensitive. 60

Chapitre V Conclusion et suggestions.

- V.1 Suggestions. 63  
V.2 Conclusion. 64

Bibliographie

Annexes

Introduction:

L'Algérie est un pays dont les réserves en hydrocarbures sont importantes, particulièrement celles relatives au gaz naturel. Ces richesses constituent une grande partie des exportations et sont par conséquent la source majeure de revenu du pays.

Malgré les rentes considérables qu'apportent les hydrocarbures, leur exploitation doit d'abord faire face à la mise en place d'installations très coûteuses.

Nous assistons actuellement à l'extension du marché relatif au secteur gazier qui tend à remplacer celui du pétrole dont les réserves s'amenuisent peu à peu.

Une caractéristique principale de l'économie des hydrocarbures tient à des besoins élevés en moyens de transport car les lieux de production sont généralement très éloignés des centres de consommation. Les distances qui doivent être parcourues atteignent parfois des centaines voire des milliers de kilomètres.

La présente étude tente de résoudre un des problèmes attenants à l'exploitation des ressources énergétiques souterraines : le dimensionnement optimal d'un réseau de

pipelines (système de canalisations à haute pression utilisé pour le transport à moyenne et grande distance des hydrocarbures : pétrole brut, produits raffinés et gaz naturel) reliant des puits à une centrale de traitement.

Ce dimensionnement aura pour but de déterminer les caractéristiques principales d'un réseau : la configuration du réseau, les diamètres des diverses canalisations, leurs longueurs, ainsi que les pertes de charges qu'elles engendrent.

La première phase consistera en l'élaboration d'un modèle mathématique traduisant le plus fidèlement possible le modèle réel, en tenant compte des conditions d'exploitations caractérisées essentiellement par la contrainte sur les pertes de charges maximales le long du réseau.

Les données utilisées résultent des informations recueillies à la SONATRACH à la suite de nos entrevues avec les agents concernés.

Après la formulation, nous passerons à la résolution du problème qui se réduira à une forme non linéaire, multidimensionnelle et sans contraintes.

Nous verrons l'importance du choix du vecteur de départ sur la solution optimale, puis les résultats seront comparés à ceux obtenus par la SONATRACH pour ce même réseau.

Nous concluons enfin sur des recommandations quant à l'élaboration de réseau de pipelines, et sur les possibilités entrevues pour l'amélioration de cette étude.

**CHAPITRE I**  
**POSITION DU PROBLEME**

### I.1- Généralités sur les transports par pipelines :

Les débuts du transport par pipeline ont eu lieu avec les premières découvertes de pétrole brut.

Utilisé initialement pour des raisons de commodité, le pipeline s'est rapidement imposé sur le plan économique.

Ainsi, les réseaux en exploitation sont passés de quelques milliers de kilomètres au début du siècle à plus d'un million de kilomètres actuellement.

Les causes de cet accroissement sont à rechercher dans les avantages spécifiques du transport par conduite, parmi lesquels on citera :

-Insensibilité pratique au relief et aux conditions géographiques (traversée de montagnes, de fleuves, des déserts, des bas de mer).

-Forme liquide et gazeuse des hydrocarbures convenant parfaitement à l'acheminement par canalisation.

-Trajets presque rectilignes amenant un raccourcissement des distances par rapport aux moyens de transport classiques (bateaux, wagons).

-Parfaite continuité de marche (pas d'entraves atmosphériques ni climatiques).

-Adaptation très marquée à l'automatisme (main d'oeuvre

réduite par l'emploi de techniques d'automatisation très poussées).

- Pertes d'énergie minimales (dûes aux frottements du liquides sur les parois du tubes).

Les pipelines sont le plus souvent enfouis sous terre, ils peuvent également être au niveau du sol ou encore, sous mer (dans les gisements offshore).

Ils sont formés d'aciers ordinaires à haute limite élastique dont la composition chimique doit permettre de bonnes conditions de soudabilité sur le chantier.

Les pipelines sont recouverts d'une gaine protectrice qui les préserve de l'usure due aux contacts avec le milieu environnant.

### 1.2- Les problèmes du transport par pipelines :

Les différents travaux réalisés jusqu'alors, dans le domaine des transport par pipe cherchent à résoudre l'un des problèmes suivants :

#### - L'implantation et l'extension des réseaux [10] :

Il s'agit sur la base de prévisions d'évolution de la demande et des disponibilités de gaz, d'adapter la

capacité de transport aux besoins exprimés.

Le problème revient à trouver la meilleure structure de réseau, c'est à dire une structure qui, tout en étant réalisable, soit optimale aux sens de certains critères économiques.

C'est une optique de planification<sup>a</sup> et d'analyse portée sur le moyen et le long terme.

- Le contrôle du gaz à court terme [4] :

C'est le cas de la programmation du transport et de distribution du gaz dans des réseaux existants.

L'analyse porte sur des périodes pouvant aller de quelques jours à plusieurs semaines voire plusieurs mois.

Le but de l'analyse est d'une part d'établir si le système est en mesure de satisfaire la demande, compte tenu des installations existantes, et s'il peut respecter les contraintes auxquelles il est soumis. D'autre part, l'investisseur cherche à optimiser les conditions de fonctionnement sur la base de critères pouvant être économiques ou techniques.

- La gestion en ligne d'un réseau [9] :

Il s'agit d'une optique d'opération et d'analyse portée sur le très court terme. Son but est d'élaborer une sorte de "Guide opérateur" fonctionnant en temps réel et servant à orienter la gestion des réseaux.

Dans les deux premiers cas, les variations du débit sont discrètes et l'évolution se fait par paliers. Ceci permet de représenter l'écoulement du gaz à l'aide d'équations dont la forme est relativement simple.

Ce régime d'écoulement est appelé "Régime permanent". Par contre, dans le dernier cas, les débits et les pressions varient de façon continue en fonction du temps.

Il est donc nécessaire d'incorporer des phénomènes transitoires, dont le traitement ne peut être fait que sous une forme différentielle. Ce type d'écoulement est dit "variable".

En Algérie, la société chargée de l'exploitation des hydrocarbures (SONATRACH) dispose des services dont la mission est d'élaborer les réseaux de pipelines. Parmi ces

services nous citerons le département Engineering et Construction qui a soulevé le problème d'élaboration d'un réseau engendrant un coût minimal.

### I.3- Présentation du département Engineering et Construction:

Le rôle principal de la division Engineering et Construction réside dans la réalisation d'usines de traitement de gaz ou de pétrole pour la Division Production laquelle comporte dix régions dont Hassi R'Mel, Hassi Messaoud, In Aménas, etc....

La division Engineering et Construction exécute essentiellement les prestations suivantes :

-la définition et l'estimation du développement des champs de gaz ou de pétrole à développer,

-l'élaboration des dossiers d'appels d'offres,

-l'analyse des offres rendues,

-le suivi des projets pendant les phases de l'engineering et la construction,

-le démarrage des unités.

Certaines de ces études consistent en l'élaboration de réseaux de collectes et de dessertes.

#### I.4- Aperçu de la méthode utilisée par le département E & C:

Dans un réseau consistant à relier des puits à l'usine de traitement, deux ou plusieurs puits peuvent être reliés entre eux; Ces liaisons sont appelées jonctions. Une jonction reliant plus de deux puits est appelée "Manifold". La position des jonctions est déterminée de façon intuitive.

Une fois les coordonnées des jonctions établies, une gamme de diamètres de conduite est sélectionnée. Le calcul des pertes de charges est effectué à l'aide d'abaques (annexe 8).

Les abaques, spécifiques à chaque diamètre, donnent le débit (en fonction des pertes de charge et la vitesses d'écoulement en fonction des pertes de charge.

La lecture des abaques se fait comme suit :

a) Se rapporter à l'abaque du diamètre considéré, ou à celle correspondant à la valeur la plus voisine.

b) Repérer sur l'une des échelles des abscisses la valeur du débit.

c) Suivre la ligne verticale du quadrillage correspondant à la valeur du débit jusqu'à rencontrer la courbe caractérisant la viscosité dynamique. Le point d'intersection donne en ordonnée la valeur de la perte de charge.

d) Multiplier la valeur lue de la perte de charge par la longueur de la conduite en kilomètre et diviser par la moyenne arithmétique des poids spécifiques à l'entrée et sortie de la canalisation.

Remarques [6] :

-Les droites inclinées à  $45^\circ$  correspondent à l'écoulement laminaire et les courbes de plus grandes pentes à l'écoulement turbulent.

-Dans le cas où le diamètre de canalisation ne correspond pas exactement à celui d'un abaque, il est en général suffisant d'apporter une correction à la valeur lue sur l'abaque correspondant au diamètre le plus proche.

Afin d'arriver à une configuration de réseau qui soit la plus économique possible et pour comparer les méthodes de résolution le département Engéneering et Construction de la SONATRACH nous a confiés l'étude de dimensionnement optimal d'un réseau.

Cette étude consistera à appliquer les méthodes mathématiques d'optimisation pour atteindre l'objectif fixé.

## **CHAPITRE II**

### **FORMULATION DU PROBLEME**

II.1- Définition du problème :II.1.1-Description générale du problème:

Le développement du champ de HAMRA, lequel se situe dans la région de RHOURDE-NOUSS, comporte des puits producteurs (puits par lesquels le gaz est extrait), des puits injecteurs (puits par lesquels on réinjecte du gaz afin de stimuler d'autres puits producteurs), ainsi qu'une centrale de traitement et recyclage de gaz.

Cette installation est formée de :

- Deux trains de traitement pour la production du condensat, de G P L et de gaz traité.
- Une station de compression pour les besoins de gaz de vente et/ou de réinjection.
- Des installations de stockage et d'expédition du condensat et du G P L.
- Une centrale électrique.
- Un réseau de collectes (canalisations allant des puits à la centrale).

-Un réseau de dessertes (canalisations allant de la centrale aux puits injecteurs)

-Des infrastructures diverses.

La capacité de traitement est de 15 millions  $m^3/j$  avec des productions escomptées comme suit :

- Condensat 2620 tonne/jour.
- G P L 1410 tonne/jour.
- Gaz traité 13.34 millions  $m^3/j$ .

Dans la réalité, un réseau de gazoducs est un ensemble assez complexe comportant un grand nombre d'éléments (tronçons de conduite, vannes de sectionnement, postes d'approvisionnement, stations de compression, etc...)

Une telle structure ne saurait être représentée d'une manière simple, et il n'est d'ailleurs pas nécessaire de prendre en considération tous ces éléments pour obtenir des résultats satisfaisants.

Il suffira de considérer les éléments principaux, c'est à dire les canalisations, et s'il y a lieu les stations de compression.

La configuration du réseau sera telle que des puits

pourront être reliés entre eux en des points de jonction qui permettront de diminuer la longueur totale du réseau de pipelines.

Le problème consiste alors à déterminer le nombre de ces points de jonctions et leurs emplacements ainsi que les diamètres des différentes conduites.

La configuration optimale du réseau de collectes ou du réseau de dessertes sera celle dont les canalisations engendreront un coût minimal.

### II.1.2-Définition des paramètres principaux :

Afin de modéliser le problème, il convient avant tout, de déterminer les paramètres principaux influant directement sur l'investissement initial.

Une conduite est caractérisée par :

-Le diamètre intérieur : sur lequel sont basées les équations d'écoulement du gaz.

-L'épaisseur du tube : qui va varier suivant le diamètre et le flux traversant la portion de pipe considérée.

-La longueur du tube.

-Les pressions aux extrémités de chaque tronçon du réseau et qui traduisent la pression d'entrée du gaz dans le tube ainsi que sa pression de sortie. Ces pressions serviront au calcul des pertes de charge.

-Le profil du pipe : caractérisant la différence de niveau pouvant exister entre les extrémités d'un pipe et provoquant des pertes de charge.

-La température d'écoulement du gaz.

-Les caractéristiques physiques du gaz (densité).

### II.1.3-Choix de l'équation d'écoulement :

Les paramètres cités précédemment sont liés entre eux par des équations. Les équations d'écoulement ont fait l'objet de plusieurs travaux [13] [8], desquels ils ressort que le choix d'une équation dépend des caractéristiques physiques du gaz, de la taille de la conduite et du régime d'écoulement (turbulent ou laminaire).



L'équation d'écoulement dépend également de l'existence de procédés de compression au cours du cheminement du gaz ainsi que de la différence d'altitude entre les extrémités d'une conduite (facteur de correction pour les conduites non horizontales).

L'expression générale de l'équation de Weymouth [6] pour une conduite horizontale est :

$$P_1^2 - P_2^2 = \left( Q \cdot \frac{P_s}{T_s} \right)^2 \cdot \frac{s \cdot T \cdot L \cdot f \cdot z}{D^5} \cdot 7.65 \cdot 10^9 \quad (2.1)$$

avec :

-D : diamètre intérieur des canalisations (mm).

-S : densité du gaz par rapport à l'air.

-L : longueur de la conduite (Km).

-P<sub>1</sub> : pression en amont (bars).

-P<sub>2</sub> : pression en aval d'une conduite (bars).

-T<sub>s</sub> : température standard (Kelvin).

-P<sub>s</sub> : pression standard (bars).

-Q : débit à la température T et à la pression P ( $M^3/J$ ).

-f : coefficient de frottement.

-z : coefficient de compressibilité du gaz.

-T : température moyenne de la canalisation (Kelvin).

#### II.1.4-Choix de la fonction des coûts :

Les constructeurs de pipes fournissent des tables attribuant à chaque diamètre intérieur de pipe, le coût correspondant par unité de longueur (Annexe 5).

Pour traduire les coûts en fonction du diamètre, à partir de ces tables, nous devons effectuer une régression linéaire afin d'obtenir une fonction approchée.

La fonction des coûts peut être aussi définie en utilisant le coût massique par unité de longueur.

Connaissant le coût par unité de masse et par unité de longueur et à partir des caractéristiques de l'acier utilisé pour la construction du pipe (masse volumique), on peut déduire une relation entre le coût du pipe et son

diamètre intérieur.

D'une manière générale, la fonction des coûts a pour expression [6] :

$$C(d) = k.d^u \quad (2.2)$$

k et u étant des constantes positives.

### II.2-Description du modèle :

Pour l'élaboration du modèle nous nous sommes basés sur les travaux de Baskaran et Salzborn [3].

#### II.2.1-Remarques préliminaires :

Avant de formuler le problème, il convient de préciser quelques hypothèses de départ :

-La méthode est appliquée à des réseaux qui ne comprennent pas de dispositifs de compression.

La pression de sortie des puits producteurs est assez grande pour que l'on puisse satisfaire les conditions d'arrivée à l'usine de traitement.

-la surface du champs considéré est supposée plane. Il n'y a pas de différence d'altitude entre les extrémités des conduites.

-Il n'y a pas d'obstacles géographiques (pas de montagnes ou de dune à traverser ou à contourner).

### II.2.2- Représentation de la structure du réseau [3]

#### II.2.2.1-Notation :

- $(x(0), y(0))$  : coordonnées de l'usine de traitement de gaz.

- $(x(i), y(i))$  : coordonnées des puits ( $i=1, M$ ),  $M$  étant le nombre de puits à raccorder à l'usine de traitement.

- $q(i)$  : le débit à la sortie de chaque puits  $i$  (Pour les puits producteurs) ou à l'entrée de chaque puits  $i$  (pour les puits injecteurs).

- $s(i)$  : densité du gaz du puits  $i$

- $P_0$  : pression d'arrivée du gaz à l'usine de traitement.

$-P_1$  : pression de sortie du gaz des puits producteurs.

#### II.2.2.2-Définition :

Les éléments qui composent le réseau sont :

a-Les noeuds du réseau :

Ces noeuds sont classés comme suit :

$N_f$  : ensemble des noeuds fixes représentant les puits (Producteurs ou Injecteurs).

$N_v$  : ensemble des noeuds variables (jonctions).

Nous définissons également :

$N$  : ensemble formé par tous les noeuds du réseau.

$$N = N_f \cup N_v$$

$\bar{N}$  : ensemble comportant tous les noeuds du réseau excepté celui représentant l'usine de traitement.

$$\bar{N} = N / \{0\}$$

b-Les arcs du réseau :

Les arcs du réseau seront spécifiés grâce à une fonction des prédécesseurs  $(\alpha)$  qui à chaque noeud associe le noeud qui le précède, le sens pris en compte étant celui qui va de la centrale vers les puits producteurs.

La fonction  $(\alpha)$  est définie telle que :

$$\alpha : \bar{N} \rightarrow N$$

L'ensemble des arcs du système est représenté par :

$$A = \{(\alpha(i), i) / i \in \bar{N}\}$$

-  $\alpha(i)$  étant le noeud prédécesseur du noeud  $i$ .

-  $(\alpha(i), i)$  étant l'arc qui joint le noeud  $\alpha(i)$  au noeud  $i$ .

A partir de cette fonction, on définit :

-  $q(i)$  : débit du gaz traversant la section de l'arc  $(\alpha(i), i)$

-  $l(i)$  : longueur de l'arc  $(\alpha(i), i)$ .

- $pp(i)$  : pertes de charge à travers l'arc  $(a(i), i)$ .

- $B(i)$  : ensemble des noeuds successeurs du noeud  $i$ .

$$B(i) = \{j \in N / a(j) = i\}$$

- $\theta$  : ensemble des points extrêmes. Ce sont les noeuds qui n'ont pas de successeurs. Ils sont situés aux extrémités du réseau.

$$\theta = \{j \in N / B(j) = \emptyset\}.$$

Remarques:

-Tous les points extrêmes seront des puits.

-Le graphe  $(N, A)$  ne contient ni boucles ni mailles.

-Le réseau optimal sera un arbre (annexe 2).

II.2.3-Equations sur les débits :

Le débit sortant de chaque noeud est égal à la somme des débits entrants auxquels on doit ajouter le débit propre du noeud  $(Q(i))$ .

Seules les jonctions n'ont pas de débit propre  
( $Q(i) = 0$  pour  $i \in N_j$ ).

Les équations traduisant la continuité du flux [12],  
( $Q(i)$  étant le débit propre du noeud  $i$ ) sont :

$$\begin{aligned} q(i) &= Q(i) & i \in \theta \\ q(i) &= Q(i) + \sum_{j \in B(i)} q(j) & i \in \bar{\theta} \\ q(i) &\geq 0 & \forall i \in \bar{N} \end{aligned} \quad (2.3)$$

#### II.2.4-Equations sur les densités :

Dans le cas où la densité du gaz sortant des différents puits producteurs n'est pas la même, il convient de calculer la densité résultante du gaz.  $S(i)$  étant la densité du gaz provenant du puit  $i$ , nous avons [12] :

$$\begin{aligned} s(i) &= S(i) & i \in \theta \\ s(i) &= \frac{S(i) \cdot Q(i) + \sum_{j \in B(i)} s(j) \cdot q(j)}{Q(i) + \sum_{j \in B(i)} q(j)} & i \in \bar{\theta}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

II.3-Formulation du problème pour le réseau de collectes :II.3.1-Formulation de la fonction objectif :II.3.1.1-Equation d'écoulement :

La formule de Weymouth [13] adaptée à ce type d'écoulement nous donne:

$$Q_s = 0.0037 \frac{T_s}{P_s} \cdot d^{8/3} \cdot \left( \frac{P_1^2 - P_2^2}{L \cdot S \cdot T} \right)^{1/2} \quad (2.5).$$

Avec :

-  $Q_s$  : débit du gaz mesuré dans les conditions standards ( $m^3/j$ ).

-  $d$  : diamètre intérieur du pipe (mm).

-  $P_1$  : pression initiale (KPa).

-  $P_2$  : pression terminale (KPa).

-  $L$  : longueur du pipe (Km).

-  $S$  : densité du gaz par rapport à l'air.

-T : température absolue d'écoulement du gaz (Kelvin).

-T<sub>s</sub> : température standard (Kelvin).

En exprimant le diamètre en fonction des autres paramètres et en adaptant la formule au réseau, nous obtenons :

$$d(l) = \left( \frac{P_s \cdot T^{1/2}}{0.0037 T_s} \right)^{3/8} \cdot s(l)^{3/16} \cdot q(l)^{3/8} \cdot \left( \frac{L(l)}{pp(l)} \right)^{3/16} \quad (2.6).$$

### II.3.1.2-Fonction coût :

Le coût du pipe est déterminé en fonction du coût massique.

Soient :

-C(d) : le coût par unité de longueur d'un pipe de diamètre d.

-C<sub>a</sub> : le coût d'un kilogramme d'acier.

-ρ<sub>a</sub> : masse volumique de l'acier utilisé.

Nous avons :

$$m = \rho_a \cdot v$$

$$m = \rho_a \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) \cdot l$$

d'où :

$$\frac{m}{l} = \rho_a \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2)$$

Avec

$m$  : masse du tube.

$l$  : longueur du tube.

$D$  : diamètre extérieur.

De plus l'épaisseur du tube [13] est donnée par :

$$e = \frac{P \cdot D}{2 \cdot R \cdot C_s \cdot C_t} \quad (2.7).$$

avec :

$P$  : pression interne du tube (bars).

$e$  : épaisseur du tube (mm).

$R$  : résistance ou contrainte admissible (bars).

$C_s$  : coefficient de soudure.

On pose :

$$k' = \frac{2.R.C_s.C_x}{P}$$

le système :

$$D = k'.e$$

$$D = d + 2.e.$$

Nous donne :

$$D = \frac{k'}{k'-2}.d \quad \text{avec :} \quad k' = \frac{k'}{k'-2}$$

d'où :

$$\frac{m}{l} = \rho_s \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (k'^{-2} - 1) \cdot d^2$$

La fonction coût est définie telle que :

$$C(d) = C_s \cdot \rho_s \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (k'^{-2} - 1) \cdot d^2 \quad (2.8)$$

$C(d)$  est exprimée en \$/m.

De plus, les tubes sont protégés par une gaine isolatrice. Les coûts résultants de cette protection sont évalués à 15% du prix du tube. Ce pourcentage nous a été fourni par les agents concernés.

Le coût total engendré par les arcs du réseau se traduit alors par :

$$\text{Coût} = 1.15 \sum_{i \in N} l(i).C(d(i)). \quad (2.9)$$

### II.3.1.3-Fonction objectif :

En plus du coût du réseau précédemment défini, nous devons prendre en considération les coûts engendrés par les tranchées à creuser pour enterrer les canalisations.

Soit  $C_t$  : le coût d'une tranchée par unité de longueur.

La fonction objectif aura pour forme :

$$\text{MinCoût} = 1.15 \sum_{i \in N} l(i).C(d(i)) + C_t \sum_{i \in N} l(i) \quad (2.10)$$

En remplaçant  $d(i)$  et  $C(d(i))$  par leurs expressions, il vient :

$$\text{MinCoût} = 1.15 \sum_{i \in \bar{N}} C_a \cdot \rho_a \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (k^{n^2} - 1) \cdot l(i) \cdot q(i)^{3/4} \cdot \left( \frac{l(i)}{P \rho(i)} \right)^{3/8} + C_e \sum_{i \in \bar{N}} l(i) \quad (2.11)$$

Avec :

$$l(i) = \sqrt{(x(i) - x(a(i)))^2 + (y(i) - y(a(i)))^2}$$

$$k^n = \frac{R \cdot C_1 \cdot C_2}{R \cdot C_1 \cdot C_2 - P}$$

### II.3.2- Formulation des contraintes

#### II.3.2.1- Contrainte sur les pertes de charge

Le réseau à déterminer devra satisfaire la condition sur la pression d'arrivée à l'usine de traitement.

Le gaz démarre en tête de puits avec une pression  $P_1$  et doit arriver à la centrale avec une pression  $P_0$ , il faut donc que les pertes de charge engendrées par les arcs reliant les points extrêmes à la centrale n'excèdent pas la perte de charge maximale  $P^*$  telle que:

$$P^* = p_1^2 - p_0^2 \quad (2.12)$$

Le réseau étant un arbre, il n'y a qu'un chemin possible pour qu'un noeud extrême  $i$  soit atteint à partir du noeud  $i=0$  (c'est à dire la centrale).

Soit  $l \in \theta$ ,  $l_0, l_1, \dots, l_k = l$  le chemin qui relie le noeud  $i$  au noeud 0.

La condition sur les pertes de charge se traduit par:

$$\sum_{j=0}^k pp(l_j) \leq P^* \quad l_k \in \theta \quad (2.13)$$

Il y a une contrainte de ce type pour tous les noeuds de  $\theta$ .

Nous avons aussi :

$$pp(l) \geq 0, \quad l \in \bar{N}. \quad (2.13)$$

### II.3.2.2-Contraintes additionnelles :

a)-Contraintes sur les jonctions :

Le nombre de puits producteurs joints en un même point peut être limité en évitant de relier plus d'un certain nombre d'arcs aux points de jonctions.

Ceci permettra en cas de défection d'un pipe déférent d'une jonction de ne pas trop inquiéter le rendement de l'usine.

Cette contrainte est relative à la souplesse d'exploitation du réseau.

Elle se traduit comme suit :

$$\sum_{j \in B(i)} X_{ij} \leq N_{\max} \quad \forall i \in N, \quad (2.14)$$

Avec

$N_{\max}$  : le nombre maximal d'arcs pouvant arriver à un noeud variable.

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si le pipeline va de } i \text{ à } j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

b)-Contraintes sur la vitesse d'écoulement dans les pipes :

L'écoulement du gaz dans les pipelines peut engendrer, suivant sa vitesse, une dégradation des conduites.

Afin d'éviter les effets érosifs, la vitesse ne doit pas dépasser une vitesse maximale  $v_{\max}$  donnée. La vitesse d'écoulement dépendant du débit  $q$  et du diamètre intérieur  $d$ , nous aurons:

$$v_{\max} = \frac{\Delta P}{16 \cdot \mu \cdot L} d^2 \quad 7$$

Avec :

-  $\Delta P$  : perte de charge

-  $\mu$ : coefficient de viscosité dynamique.

Cette contrainte sera valable pour chaque arc, d'où:

$$v(l)_{\max} = \frac{\Delta P(l)}{16 \cdot \mu \cdot l(l)} d(l)^2 \quad (2.15)$$

Avec :

$-v(i)$  : vitesse d'écoulement du gaz dans l'arc  $(a(i), i)$

En exprimant la contrainte  $d(i)$  en fonction de  $q(i)$  et  $v_{max}$ , nous obtenons :

$$d(i) \geq \sqrt{\frac{16 \cdot \mu L(i) v(i)_{max}}{\Delta P(i)}} \quad (2.16)$$

### II.3.3- Formulation Finale :

Pour le problème que nous étudions, le nombre assez restreint de puits (12 pour les puits producteurs et 8 pour les puits injecteurs (Annexes 3 et 4)) et leurs positions par rapport à la centrale font que le nombre de raccords sur une même jonction ne peut pas être élevé.

D'autre part, la limitation de la vitesse d'écoulement pour minimiser la dégradation des conduites n'est pas une contrainte fondamentale vu que ce problème est en partie résolu par un choix judicieux de matériaux constituant le tube ainsi que par l'injection d'inhibiteur de corrosion.

Ceci nous amène à considérer uniquement la contrainte liée aux pertes de charge :

$$\sum_{j=0}^k pp(l_j) \leq P^* \quad l_k \in \theta \quad (2.17)$$

$$pp(l) \geq 0 \quad l \in \bar{N}$$

le coût étant une fonction monotone décroissante des variables  $pp(l)$ , à l'optimum, la contrainte (2.17) sera toujours satisfaite pour la stricte égalité :

$$\sum_{j=0}^k pp(l_j) = P^* \quad (2.18)$$

En substituant  $pp(l_k)$  par :

$$pp(l_k) = P^* - \sum_{j=0}^{k-1} pp(l_j) \quad l_k \in \theta \quad (2.19)$$

Les contraintes se traduisent alors par :

$$P^* - \sum_{j=0}^{k-1} pp(l_j) \geq 0 \quad \forall l_k \in \theta \quad (2.20)$$

$$pp(l) \geq 0 \quad \forall l \in \bar{N} / \theta$$

Si dans la solution optimale d'un problème de localisation de jonction on obtient  $l(i) = 0$  pour un certain arc  $(a(i), i)$  alors ce problème est dit *réductible*.

Pour un problème *non réductible* dont la solution de départ vérifie les strictes inégalités :

$$\begin{aligned}
 P^* - \sum_{j=0}^{k-1} p p(i_j) &> 0 && \forall i_k \in \theta \\
 p p(i) &> 0 && \forall i \in \bar{N}/\theta
 \end{aligned} \tag{2.21}$$

et utilisant une procédure itérative pour améliorer la solution, les limites de (2.20) ne seront jamais atteintes quelque soit  $i_k \in \theta$  et  $i \in \bar{N}/\theta$  car le coût est infini aux limites. Ainsi les inégalités (2.20) sont inactives. En définitive, nous devons résoudre un problème non contraint multidimensionnel et non linéaire.

Formulation du réseau de collectes :

$$\text{Mincoût} = 1.15 \sum_{i \in \bar{N}} C_o \cdot \rho_o \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (k^{r^2} - 1) \cdot l(i) \cdot q(i)^{3/4} \cdot \left( \frac{l(i)}{p p(i)} \right)^{3/8} + C_T \sum_{i \in \bar{N}} l(i)$$

Les variables de décisions sont :

- $x(i), y(i), i \in N_j$ ,
- $p p(i), i \in \bar{N}/\theta$ .

#### II.4-Formulation du problème pour le réseau de dessertes :

Ce réseau sert à l'acheminement du gaz traité de l'usine de traitement vers les puits injecteurs.

Le procédé de formulation est le même que pour les collectes.

Le sens du flux a néanmoins changé des puits vers la centrale pour les collectes et de la centrale vers les puits pour les dessertes.

Les équations (2.3) et (2.4) sur les débits et les densités restent valables.

Seules quelques données (débits à l'entrée des puits et à la sortie de la centrale, de perte de charge maximale) sont modifiées.

Les données complètes figurent dans l'annexe (4)

Formulation du réseau de dessertes :

$$Mincoût = 1.15 \sum_{i \in \bar{N}} C_e \cdot \rho_e \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (k^{-2} - 1) \cdot l(i) \cdot q(i)^{3/4} \cdot \left( \frac{l(i)}{\rho P(i)} \right)^{3/8} + C_r \sum_{i \in \bar{N}} l(i) \quad (11)$$

Les variables décisions sont :

$$-x(l), y(l), l \in N,$$

$$-pp(l), l \in \bar{N}/\theta$$

Les problèmes (I) et (II) peuvent être résolus en utilisant une des méthodes de programmation non linéaire, multidimensionnelle et sans contraintes.

Le chapitre suivant, nous donne un aperçu sur ces méthodes.

Remarque :

Si les contraintes (2.15) et (2.16) sont incluses dans la formulation, la résolution se fera par des méthodes de programmation non linéaire avec contraintes.

**CHAPITRE III**

**RAPPELS THEORIQUES**

III.1- La programmation non linéaire sans contraintes :

Les différentes méthodes de résolution des problèmes d'optimisation non linéaires sans contraintes sont regroupées en trois familles.

III.1.1- Méthode du gradient [7] :

Elle consiste à calculer le gradient  $\nabla f(x^0)$  en  $x^0$ , puis à se déplacer d'une quantité  $\lambda_0$  dans la direction opposée du gradient ( $\nabla f(x^0)$  indique la position de plus grande augmentation  $f$ ).

Le nouveau point ainsi défini sera tel que :

$$x^1 = x^0 - \lambda_0 \frac{\nabla f(x^0)}{|\nabla f(x^0)|}$$

La procédure est répétée et engendre les points  $x^0, x^1, \dots, x^k$  suivant la relation :

$$x^{k+1} = x^k - \lambda_k \frac{\nabla f(x^k)}{|\nabla f(x^k)|} \quad (\lambda_k > 0)$$

Dans cette famille de méthodes, il convient de signaler :

Les méthodes de gradient à pas déterminé dans lesquelles on choisit à priori la valeur du déplacement  $\lambda_k$ . Le principal intérêt de ces méthodes est qu'elles peuvent être généralisées aux cas des fonctions non partout différentiables. Toutefois, elles présentent l'inconvénient de converger lentement.

Les méthodes de la plus forte pente dans laquelle on choisit  $\lambda_k$  de façon à minimiser la fonction  $h$  telle que :

$$h(\lambda) = f(x^k - \lambda \nabla f(x^k))$$

sur l'ensemble des  $\lambda \geq 0$ . La convergence de cette méthode est lente pour des fonctions mal conditionnées.

### III.1.2- Méthodes des directions conjuguées [2] [1] :

Le principe des méthodes de directions conjuguées consiste à partir d'un point  $x_0$  et à minimiser une fonction suivant  $n$  directions linéairement indépendantes  $d_0, d_1, \dots, d_{n-1}$ .

Parmi ces méthodes, nous distinguerons :

a- la méthode des directions conjuguées pour les fonctions quadratiques :

Soit à minimiser une fonction de la forme :

$$q(x) = \frac{1}{2}x^T Ax + b^T x + c$$

L'idée de la méthode est de construire des directions  $d_0, d_1, \dots, d_k$  mutuellement conjuguées par rapport à la matrice  $A$ . A chaque étape  $k$ , la direction  $d_k$  est obtenue par combinaison linéaire du gradient  $-\nabla q(x^k)$  en  $x^k$ , et des directions précédentes  $d_0, d_1, \dots, d_{k-1}$ . Les coefficients de la combinaison linéaire sont choisis de telle sorte que  $d_k$  soit conjugué par rapport à toute les directions précédentes.

b-la méthode des directions conjuguées appliquée aux fonctions quelconques:

C'est le cas de la méthode Fletcher et Reeves qui est une extension directe de la méthode précédente appliquée aux fonctions quelconques.

### III.1.3- Les méthodes Newtoniennes :

L'idée consiste à remplacer, au voisinage du point  $x^k$ , la fonction  $f$  par son approximation quadratique :

$$q(x) = f(x^k) + \nabla f^T(x^k)(x - x^k) + \frac{1}{2}(x - x^k)^T \nabla^2 f(x^k)(x - x^k)$$

La fonction  $f$  est supposée deux fois continûment différentiable.

Le point  $x^{k+1}$  sera le minimum de  $q(x)$  lorsqu'il existe. Ceci ne peut être le cas que si  $\nabla^2 f(x^k)$  est une matrice définie positive,  $q(x)$  est alors strictement convexe et a un minimum  $x^{k+1}$  défini par :

$$\nabla q(x^{k+1}) = 0$$

D'où la formule itérative :

$$x^{k+1} = x^k - (\nabla^2 f(x^k))^{-1} \cdot \nabla f(x^k)$$

Une propriété intéressante de la méthode est qu'elle converge en une seule itération lorsqu'elle est appliquée à une fonction quadratique strictement convexe.

Cependant, pour des fonctions quelconques, des difficultés apparaissent dues à la convergence globale.

Si le point de départ  $x^0$  est trop éloigné de l'optimum  $x^*$  la méthode peut ne pas converger.

Les méthodes quasi-newtoniennes sont une extension directe des méthodes précédentes, elles consistent à

remplacer  $(\nabla^2 f(x^k))^{-1}$  par une matrice  $H_k$  définie positive donnant la direction de déplacement à partir du gradient  $\nabla f(x^k)$ . La formule itérative devient :

$$x^{k+1} = x^k - \lambda_k H_k \nabla f(x^k)$$

$\lambda_k$  minimisant

$$g(\lambda) = f(x^k + \lambda d)$$

dans la direction  $d_k = -H_k \nabla f(x^k)$ .

#### Choix de la méthode :

La méthode de programmation non linéaire sans contraintes choisie, est la méthode Fletcher et Reeves [2] [3] [4] qui est une extension directe de la méthode du gradient conjugué au cas des fonctions quelconques.

Le choix de cette méthode est dû d'une part à la nature de la fonction objectif de notre problème (fonction quelconque) et d'autre part au fait que les méthodes de directions conjuguées ne nécessitent pas une méthode d'optimisation unidimensionnelle exacte. De plus, cette méthode est intéressante par le faible stockage

a-La méthode de Newton-Raphson :

Où  $\lambda^{k+1}$  est donnée par :

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k - \frac{h'(\lambda^k)}{h''(\lambda^k)}$$

b-La méthode de la sécante :

Cette méthode essaye de palier à un inconvénient de la méthode de Newton qui nécessite l'évaluation de la dérivée première et seconde en chaque point.

La dérivée seconde sera approximée par :

$$\frac{h'(\lambda^k) - h'(\lambda^{k-1})}{\lambda^k - \lambda^{k-1}}$$

La formule de newton devient alors :

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k - h'(\lambda^k) \frac{\lambda^k - \lambda^{k-1}}{h'(\lambda^k) - h'(\lambda^{k-1})}$$

c-Méthode de dichotomie utilisant les dérivées :

Elle consiste à déterminer un premier intervalle  $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$  telque  $h'(\lambda_{\max}) > 0$  et  $h'(\lambda_{\min}) < 0$  puis à réduire progressivement cet intervalle.

III.2.2- Les méthodes n'utilisant pas les dérivées :

Par rapport aux précédentes, ces méthodes présentent l'avantage de ne pas nécessiter le calcul des dérivées premières et secondes. Parmi ces méthodes, on citera la méthode d'interpolation quadratique, la méthode de dichotomie et la méthode utilisant la suite de fibonacci.

Choix de la méthode :

La méthode d'optimisation unidimensionnelle utilisée dans la résolution est la méthode de dichotomie avec dérivées.

Son Avantage est de nous donner un intervalle initial sans que l'on ait à l'introduire nous même avec le risque que l'optimum ne soit pas contenu à l'intérieur.

**CHAPITRE IV**

**RESOLUTION**

IV.1- Choix des inputs :

La vitesse de convergence est en partie dépendante du choix des valeurs de départ.

Cependant, pour des fonctions dont les variations ne sont pas connues, il paraît difficile de déterminer un point de départ qui soit proche de l'optimum, ce dernier n'étant pas localisé.

IV.1.1- Positions des jonctions :

Avant de déterminer les positions des jonctions, il convient de trouver le nombre de noeuds variables (jonctions) qui vont être considérés dans le vecteur de départ.

Pour un réseau comportant  $M$  noeuds fixes (puits), le nombre maximal de jonctions possibles sera pris égal à  $M-1$ . Donc l'ensemble  $N$ , comportera  $M-1$  noeuds de départ.

La détermination des positions des points de jonctions se fera de la façon suivante :

En étudiant la position des puits et de la centrale, il est possible d'isoler les puits en groupes. Un groupe de

puits caractérisera un certain nombre de noeuds fixes qui ont pour particularité d'être dans une même situation géographique.

-A partir du puits le plus éloigné de l'usine, pour chaque groupe, une droite sera tracée reliant ce puits à l'usine.

-Puis, tous les puits d'un même groupe auront une jonction située sur ces droites.

#### IV.1.2- Pertes de charges :

Après avoir déterminé la position des jonctions, les pertes de charge pour chaque noeud variable devront être spécifiées pour le lancement du programme.

Les pertes de charges initiales devront satisfaire la condition (2.17) .

Ainsi, la somme des pertes de charges sur le chemin reliant un point extrême à la centrale, ne devra pas dépasser la perte de charge maximale  $P^*$ . Nous prendrons comme valeurs initiales :

$$pp(l) = 0.1 P^* \quad l \in N_j.$$

IV.1.3- Prédécesseurs :

Le choix des prédécesseurs découle de la détermination des positions des jonctions. Le prédécesseur de chaque noeud doit être spécifié au départ.

Une numérotation des points fixes ainsi que celle des points variables s'imposent pour repérer ces derniers dans le résultat final du programme.

IV.2- Configuration réduite :

Chaque problème réductible (problème pour lequel nous avons  $l(i) = 0$  pour un arc  $(i, a(i))$ ) est non réductible pour certaines configurations dégénérées (configurations pour lesquelles une ou plusieurs jonctions ont été supprimées)

Pour un problème réductible, rien ne nous assure que les limites des inégalités (2.20) ne seront pas atteintes ou approchées si  $l(i) \rightarrow 0$  pour un noeud  $i$  quelconque.

Il est donc nécessaire de toujours se ramener à un problème non réductible.

La procédure consiste à se placer dans la configuration dégénérée la plus proche de  $s_k$ , durant la résolution,  $l(i)$  est inférieure, pour un certain  $i$  à un nombre positif  $\epsilon$  préspecifié.

Le problème de localisation de jonction sera alors résolu pour la nouvelle configuration qui servira de point de départ pour le réseau formé alors de  $M$  noeuds fixes et  $M-2$  noeuds variables.

Cette procédure sera répétée autant de fois que la longueur d'un arc tendra vers zéro, et elle engendrera à chaque fois l'élimination d'un noeud variable, c'est à dire d'une jonction.

#### IV.3- Analyse des résultats du réseau de collectes :

Parmi les configurations possibles pour le choix du vecteur de départ, nous avons retenus trois types de réseau, les autres configurations étant considérées comme intuitivement moins bonnes ou se ramenant à une des configurations choisies.

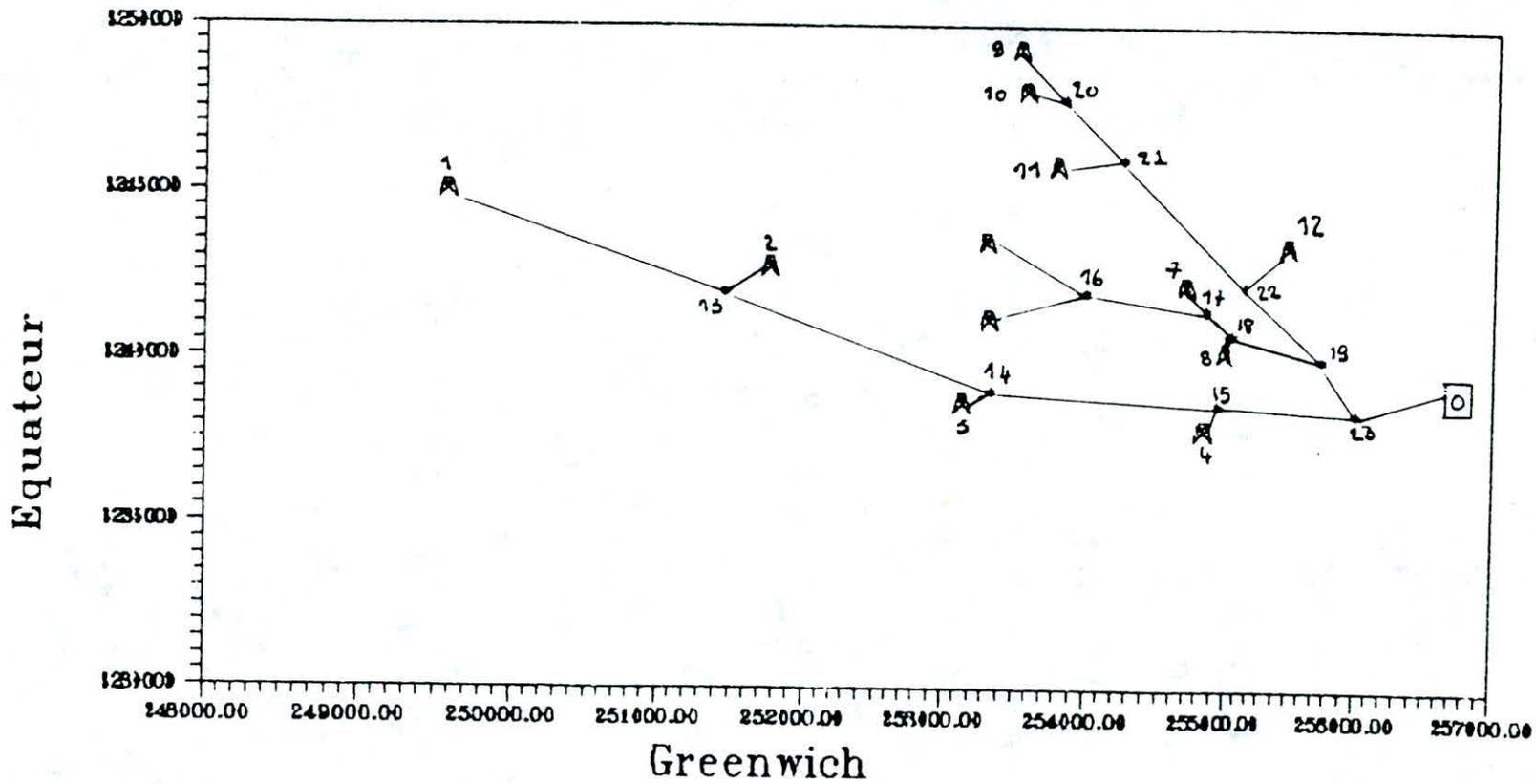
Pour la résolution, nous avons élaboré un programme informatique en pascal (Annexe 8).

IV.3.1- Première résolution (configuration 1) :

Les puits sont répartis en trois groupes, chaque groupe rejoignant la centrale. Sur les M-1 jonctions de la configuration de départ (M étant le nombre de puit), cinq ont été éliminées.

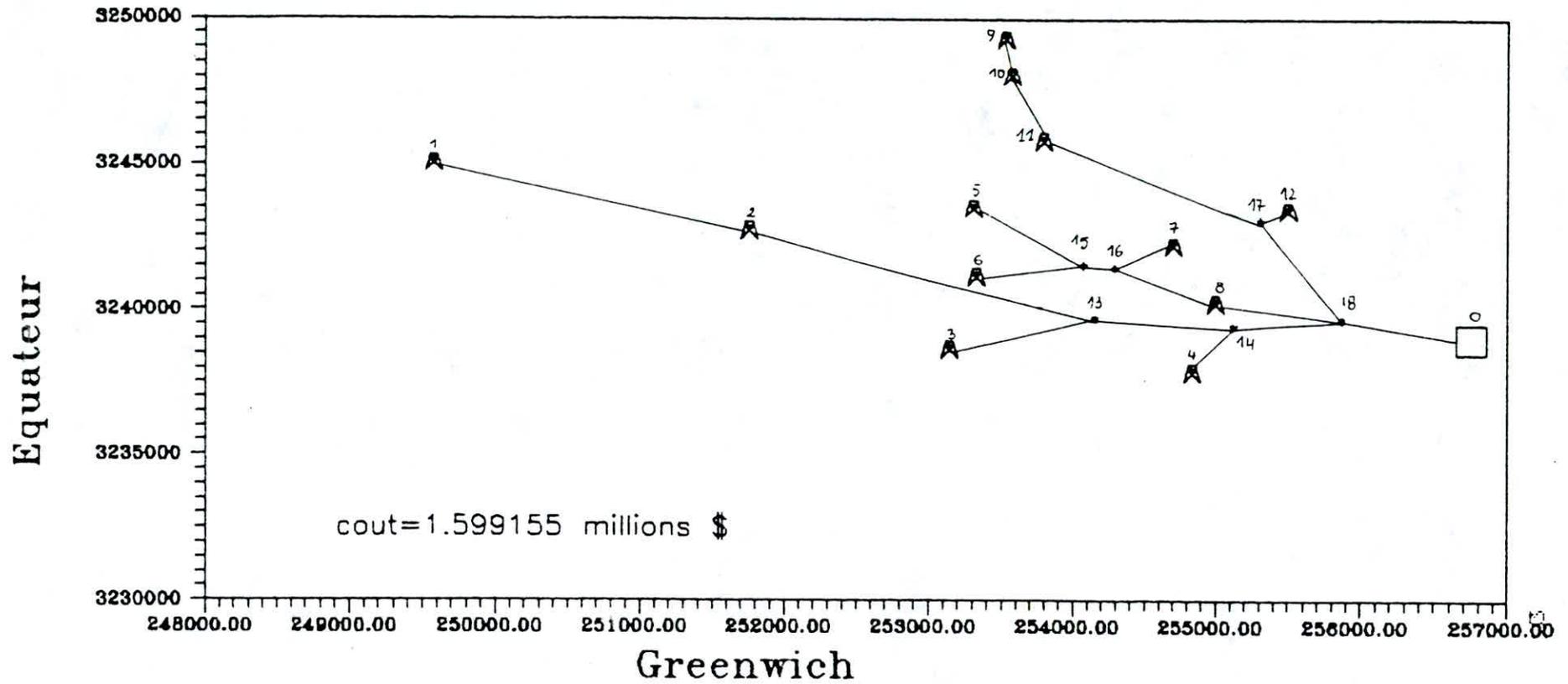
Arcs (i, a(i))	Longueur (m)	diamètre (mm)	perte de charge (Bars) <sup>2</sup>	débit 10 <sup>6</sup> (m <sup>3</sup> /j)
(1, 2)	3169.08	134.09	4018.50	1.25
(2, 13)	3842.38	165.80	6282.82	2.50
(3, 13)	1472.13	97.34	10301.69	1.25
(4, 14)	1613.78	95.56	12462.69	1.25
(5, 15)	2090.35	143.91	1818.26	1.25
(6, 15)	847.42	121.50	1818.26	12.50
(7, 16)	852.19	118.41	2076.09	12.50
(8, 16)	1033.86	152.41	10593.21	5.00
(9, 10)	1238.57	158.82	636.77	12.5
(10, 11)	2273.02	169.89	3264.02	2.5

Solution de depart



Configuration 1

Solution optimale



cout=1.599155 millions \$

Configuration 1

(11, 17)	3110.85	183.62	6640.08	3.75
(12, 17)	382.45	75.28	10540.87	12.5
(13, 14)	1008.93	183.49	2161.37	3.75
(14, 18)	770.02	200.06	1849.22	5
(15, 16)	244.30	179.98	1257.82	25
(16, 8)	1415.15	205.83	1642.62	3.75
(17, 18)	3456.81	231.97	3771.04	5
(18, 0)	1103.68	345.82	1288.09	15

Tableau (1)

Le tableau (1) nous donne le détail des résultats; pour chaque arc, il est spécifié sa longueur, son diamètre intérieur, la perte de charge qu'il engendre et le débit.

La longueur totale des canalisations pour ce réseau est de 29925.17 mètres. Cette longueur va engendrer un coût de 1.599155 Millions de Dollars.

IV.3.2- Deuxième résolution (configuration 2) :

Les puits sont toujours répartis en trois groupes, mais ces derniers ne réunissent pas les mêmes puits que dans l'exemple précédent.

La première ligne relie les puits (3) et (4) par la jonction 16.

La deuxième ligne rassemble les puits (1), (2), (5), (6), (7) et (8) par les jonctions (13), (14), (15) et (18).

La troisième ligne est formée des puits (9), (10), (11), (12) et la jonction (17).

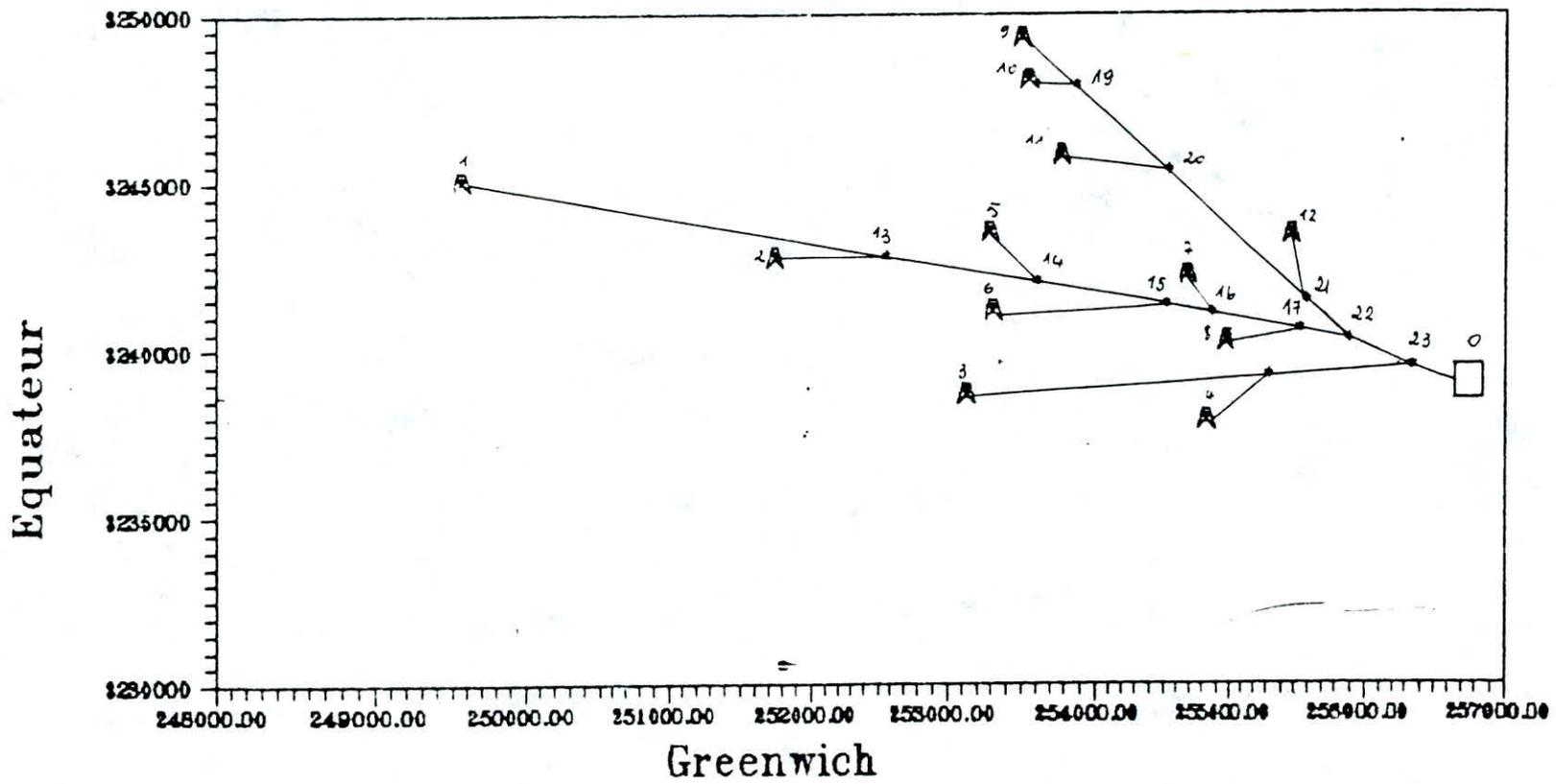
Ces trois lignes confluent vers la jonction (19) qui est près de l'usine de traitement.

Dans ce réseau 4 jonctions ont été éliminées par rapport à la configuration de de départ.

La longueur totale du réseau est de 26172 mètres. Le coût résultant s'élève à 1.274 850 Millions de Dollars,

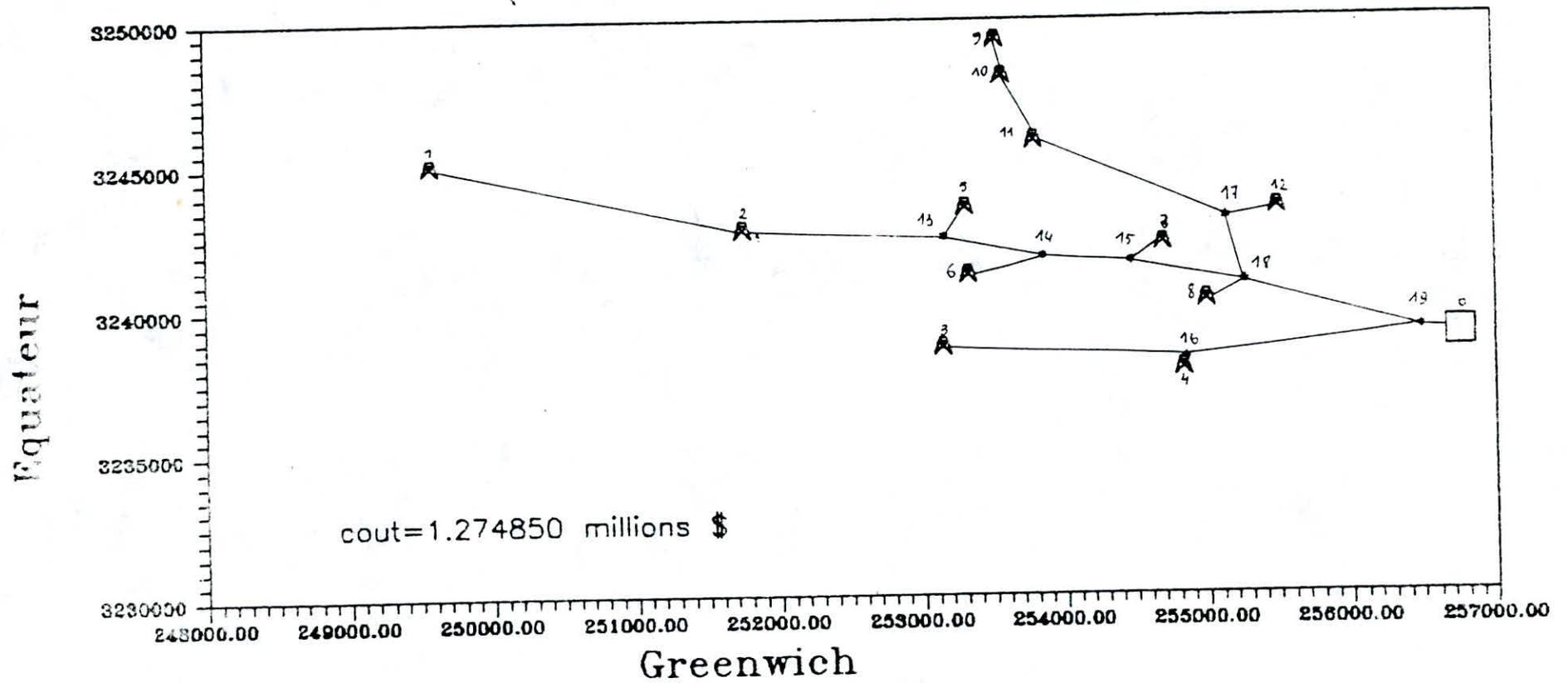
Les résultats sont regroupés dans le tableau (2).

Solution de depart



Configuration 2

Solution optimale



Configuration 2

Arcs ( $i, a(i)$ )	Longueur (m)	diamètre (mm)	perte de charge	débit $10^6(m^3/j)$
(1, 2)	3169.08	139.93	3201.24	1.25
(2, 13)	1429.64	153.72	3499.76	2.50
(3, 16)	1767.88	110.39	6324.81	1.25
(4, 16)	348.52	81.42	6324.81	1.25
(5, 13)	1054.54	99.12	6701.00	1.25
(6, 14)	788.2	89.91	8423.32	1.25
(7, 15)	678.77	85.12	9718.01	1.25
(8, 18)	672.34	81.58	12068.21	1.25
(9, 10)	1238.57	155.53	712.13	1.25
(10, 11)	2273.02	168.46	3414.56	2.50
(11, 17)	3035.54	191.19	5222.54	3.75
(12, 17)	483.33	80.45	9349.23	1.25
(13, 14)	990.18	190.80	1722.32	3.75
(14, 15)	652.89	207.38	1294.69	5.00
(15, 18)	1067.09	221.08	2350.20	6.25

(16, 19)	1899.46	136.45	8776.96	2.50
(17, 18)	2233.04	227.24	2718.98	5.00
(18, 9)	2061.73	309.23	3033.56	12.50
(19, 0)	319.23	327.48	498.23	15.00

Tableau(2)

IV.3.3- Troisième résolution (configuration 3)

Pour ce vecteur de départ, les puits ont été regroupés en quatre groupes.

A l'optimum nous avons :

-Une ligne formée des puits (1), (2), (6), (8) et de la jonction (14).

-Une ligne formée des puits (9), (10), (11), (12) et de la jonction (13).

-Une ligne formée des puits (3), (4) et de la jonction (15).

-Une ligne formée des puits (5), (7) et de la jonction (14).

Ces quatre lignes arrivent à la jonction (16) qui les relie à la centrale.

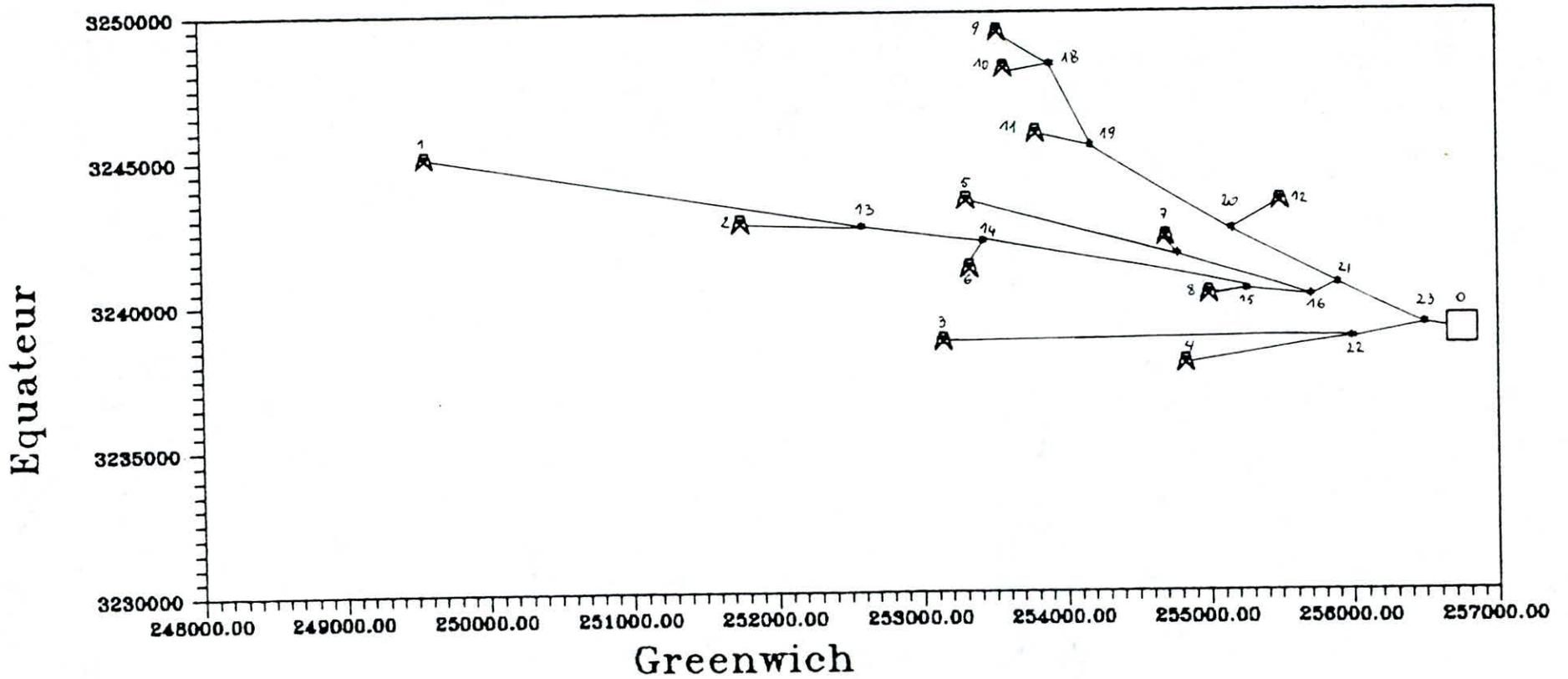
La longueur totale des pipes formant ce réseau est de 27 064.28 mètres.

Cette configuration engendre un coût de 1.324149 Millions de Dollars.

Les résultats sont donnés dans le tableau (3).

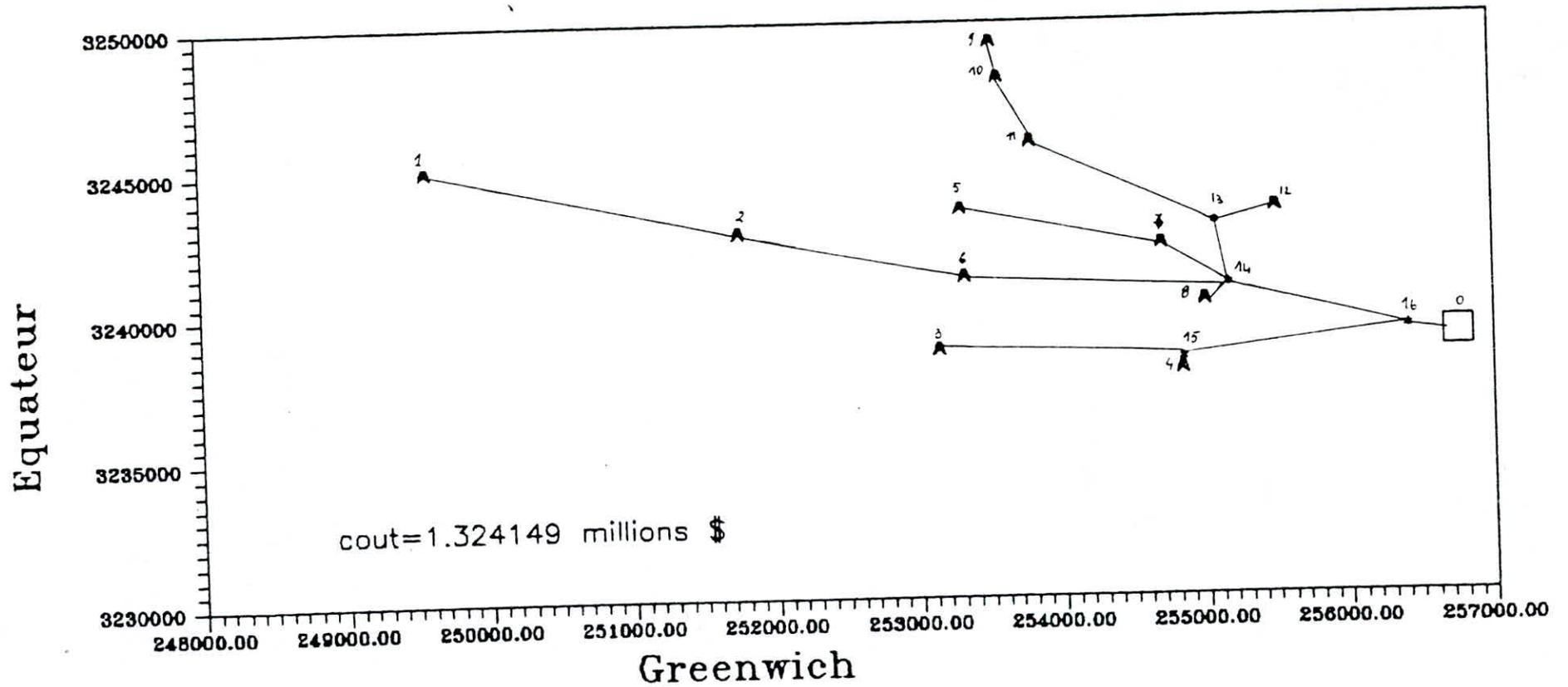
Arcs (1,a(1))	Longueur (m)	diamètre (mm)	perte de charge	débit $10^6(m^3/j)$
(1,2)	3169.08	132.83	4226.96	1.25
(2,6)	2215.37	201.50	1280.25	2.50
(3,15)	1753.67	110.08	6368.46	1.25
(4,15)	379.62	82.62	6368.46	1.25
(5,7)	1906.89	132.35	2592.20	1.25
(6,14)	1977.97	166.32	6793.51	3.75
(7,14)	1476.52	127.72	9708.52	2.50
(8,14)	599.07	79.55	12300.72	1.25
(9,10)	1238.57	157.54	664.96	1.25

Solution de depart



Configuration 3

Solution optimale



Configuration 3

(10, 11)	2273.02	180.67	2350.80	2.50
(11, 13)	3160.45	182.87	6893.56	3.75
(12, 13)	647.46	84.06	9909.32	1.25
(13, 14)	2105.73	230.22	2391.40	5.00
(14, 16)	2010.51	314.24	2715.47	12.50
(15, 16)	1844.74	136.09	8647.73	2.50
(16, 0)	405.61	332.49	583.81	15.00

Tableau (3)

Des trois réseaux que nous venons de construire, il apparait que la deuxième configuration est la meilleure vu qu'elle engendre le plus petit coût.

Remarque :

Dans la pratique, un réseau de pipelines, ne comprend pas de liaison directe entre deux puits producteurs. Cette liaison ne peut se faire qu'à l'aide d'une jonction dont la position ne doit pas être comprise dans un rayon de 100 mètres autour d'un puit.

IV.4- Analyse des résultats du réseau de dessertes :

Les puits du réseau de dessertes ont été réunis en deux groupes.

Le premier est composé, à l'optimum, des puits (2), (4), (5), (6) et de la jonction (9).

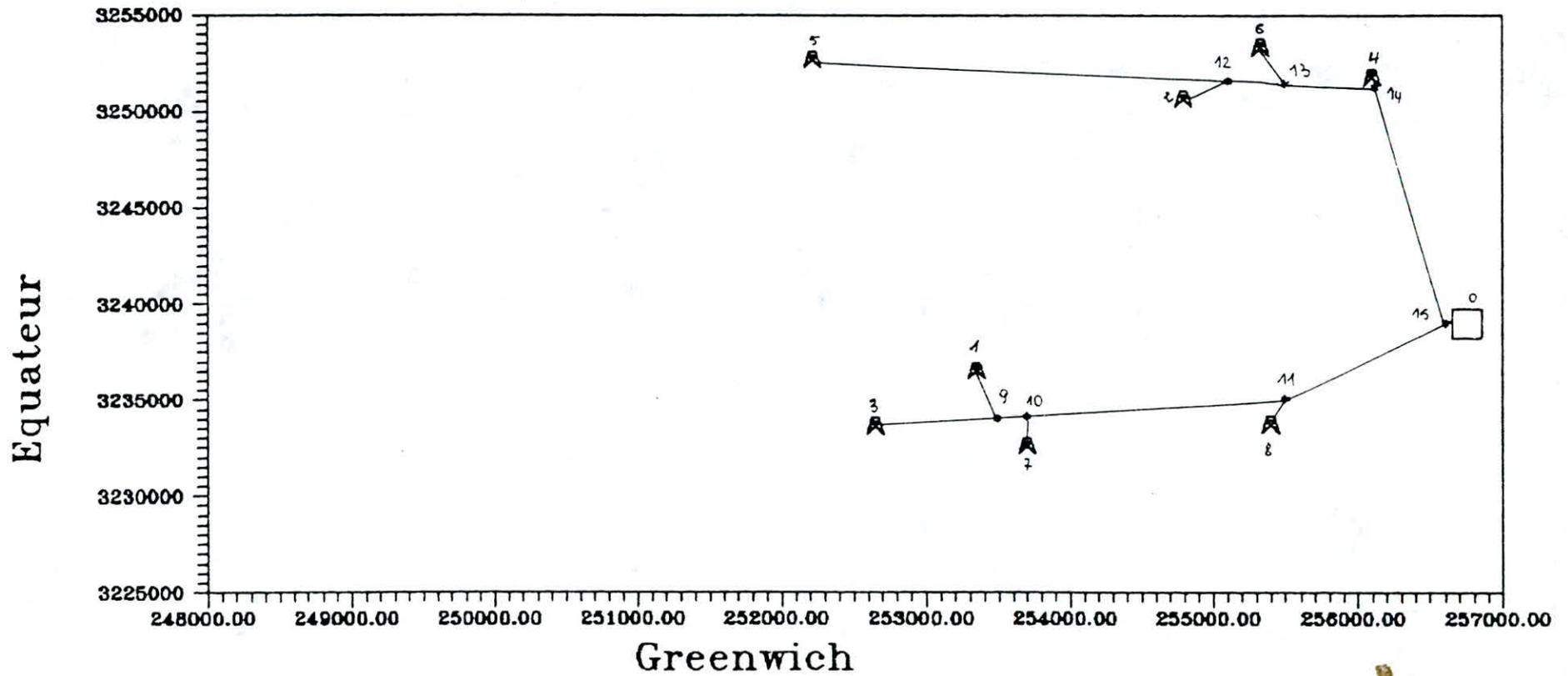
Le deuxième groupe est formé des puits (3), (7), (8) et (1) et des jonctions (10) et (11).

La configuration finale a éliminé quatre jonctions.

Le réseau a une longueur totale de 30 721.79 mètres, ce qui représente un coût de 2.408501 Millions de Dollars.

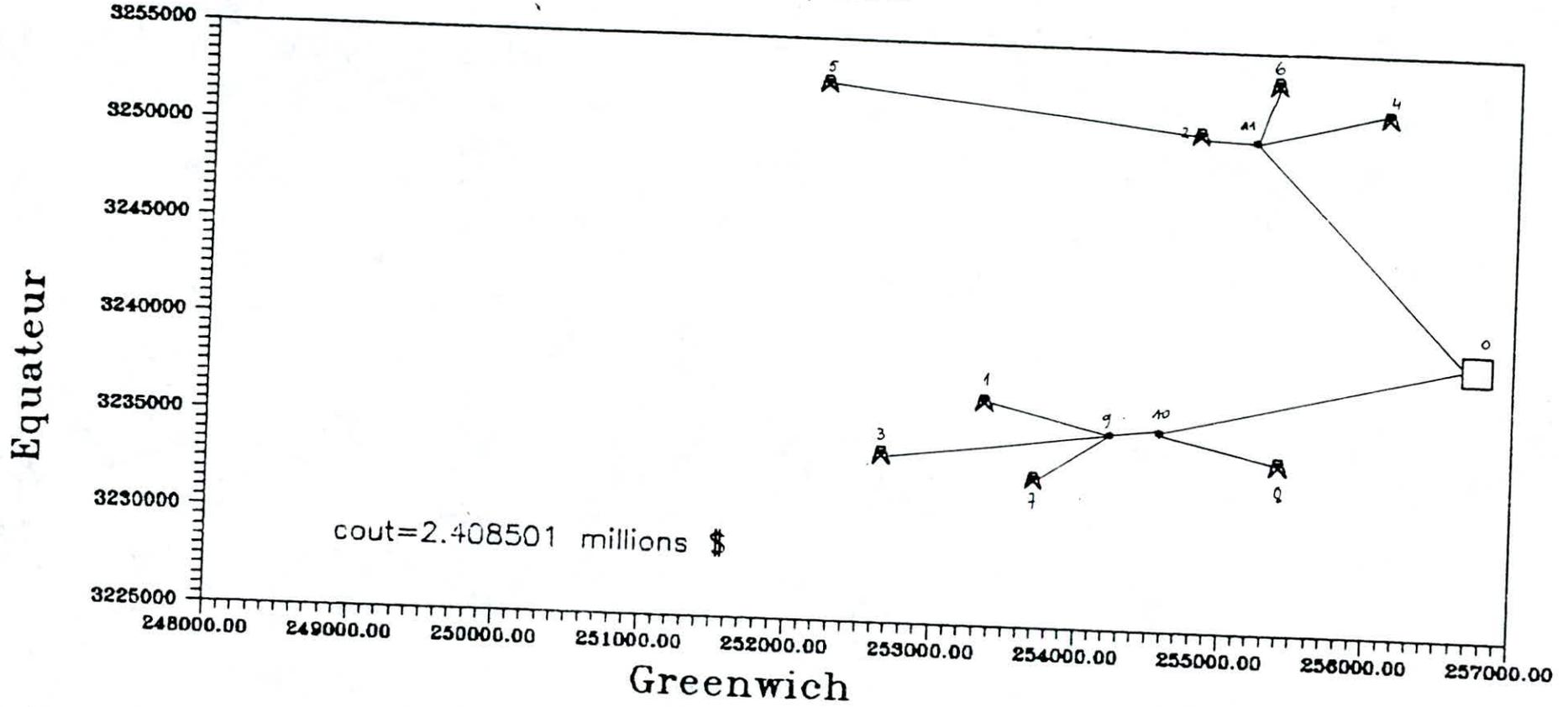
Le tableau (4) regroupe les résultats.

Solution de depart



Configuration 4

Solution optimale



Configuration 4

Arcs ( $i, a(i)$ )	Longueur (m)	diamètre (mm)	perte de charge	débit $10^6(m^3/j)$
(1,9)	1699.16	128.54	5116.46	1.69
(2,11)	454.11	145.81	2792.05	3.37
(3,9)	213.72	134.13	5116.46	1.69
(4,11)	1657.19	131.54	4411.92	1.69
(5,2)	3277.52	180.38	1619.87	1.69
(6,11)	2928.04	146.36	4411.92	1.69
(7,9)	2519.18	138.39	5116.46	1.69
(8,10)	1772.10	126.14	5900.60	1.69
(9,10)	392.35	209.58	784.14	5.06
(10,0)	4286.23	233.92	8474.40	6.75
(11,0)	11522.19	273.16	9963.08	6.75

Tableau (4)

IV.5- Comparaison avec les résultats de SONATRACH :

Les réseaux de collectes et dessertes de la SONATRACH sont composés comme suit :

IV.5.1- Réseau de collectes

\* 32 850 mètres de canalisation répartis en :

- 10 900 mètres de pipe de diamètre 207.9 mm.
- 9 850 mètres de pipe de diamètre 310.6 mm.
- 12 100 mètres de pipe de diamètre 388.9 mm.
- 8 points de jonctions

d'où le coût du réseau : 3.297 775 Millions de Dollars.

IV.5.2- Réseau de dessertes :

\* La longueur totale est de 35 675 mètres telle que :

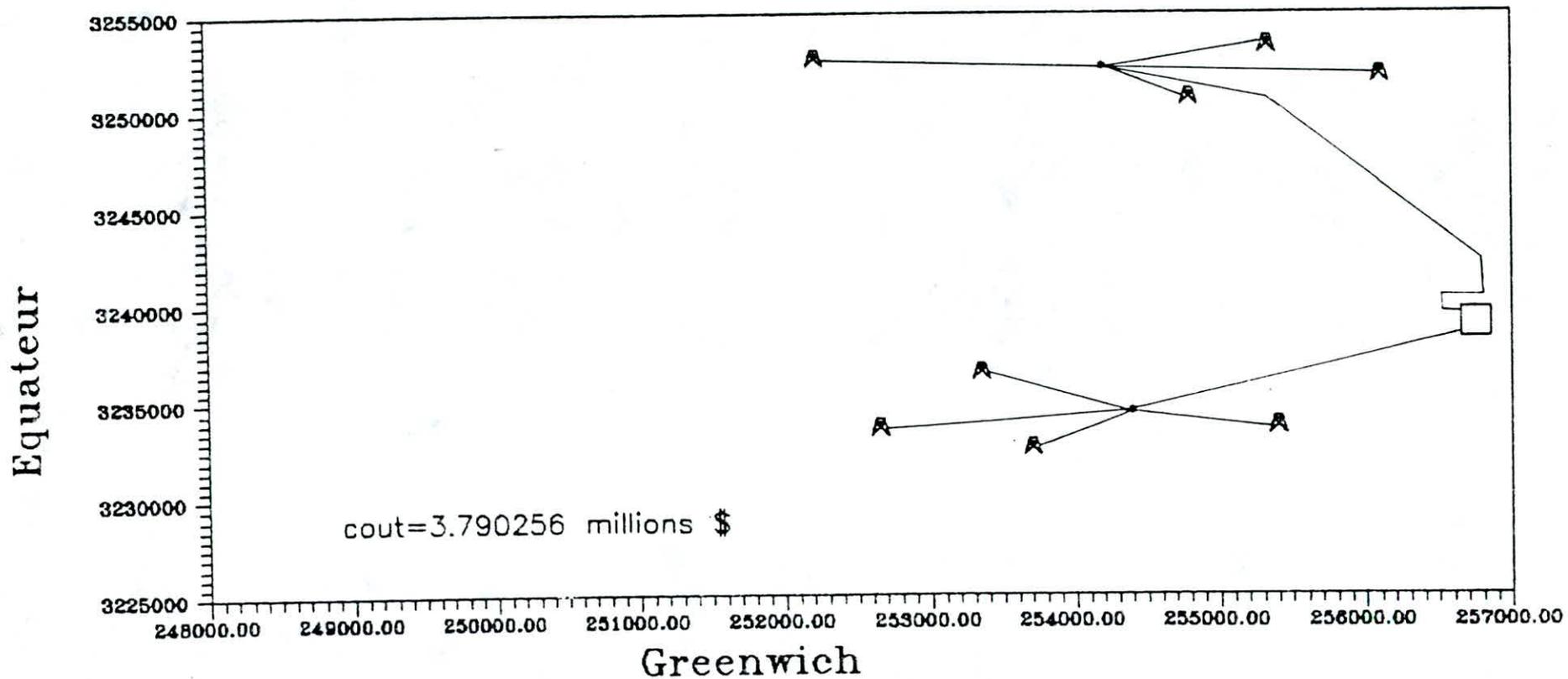
- 15 400 mètres de pipe de diamètre de 131.8 mm.
- 20 275 mètres de pipe de diamètre de 305.8 mm.
- Deux jonctions servent à relier les puits à la

centrale.

d'où le coût du réseau: 3.790 256 Millions de Dollars.



Reseau de desserte obtenu par la sonotrach



La différence de coût entre les résultats obtenus par la SONATRACH et les résultats découlant de notre étude est due :

-D'une part à une meilleure configuration finale qui minimise les longueurs totales du réseau de pipelines tout en satisfaisant aux conditions opératoires.

-D'autre part, les réseaux de la SONATRACH sont systématiquement surdimensionnés en considérant des surépaisseurs pour chaque tube et en prenant un débit d'écoulement supérieur au débit moyen qui nous a été donné.

#### IV.6- Analyse sensitive :

Afin d'étudier le degré de dépendance de la fonction objectif vis à vis de certains paramètres, nous analyserons l'effet de la variation de ces derniers sur la solution optimale.

Les paramètres qui serviront pour cette analyse sont :

-le coût du kilogramme de l'acier utilisé dans la composition des pipes.

-le débit sortant des différent puits.

IV.6.1- Effet de la variation du coût massique de l'acier:

Le tableau ci-dessous nous montre que la variation du coût de l'acier entraine d'importants écarts sur le coût total du réseau.

Variation du coût massique	Variation du coût total
10 %	7.28 %
20 %	9.26 %

De plus, seules trois jonctions sont éliminées par rapport à la configuration de départ (A l'optimun 4 jonctions avaient été éliminées)

Donc, la configuration du réseau est sensible à ce paramètre.

IV.6.2- Effet de la variation du débit :

L'étude de la variation due est importante vu qu'elle nous renseigne sur l'effet d'une augmentation de consommation (ce qui nécessitera un débit plus grand) sur l'optimum.

Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau suivant :

Variation du débit	Variation du coût total
-10 %	-1.45 %
-5 %	-0.48 %
+5 %	+4.18 %
+10 %	+6.01 %

Il apparait que la fonction objectif est sensible aux variations de débit. Ceci s'explique par le fait qu'une augmentation ou une diminution du débit engendrera une variation du diamètre intérieur des pipes qui influera à son tour sur le coût total du réseau.

**CHAPITRE V**

**CONCLUSION ET SUGGESTIONS**

## Chapitre V

### V.1-Suggestions :

Au terme de notre travail, nous donnons ici quelques suggestions qui peuvent amener à un approfondissement de l'étude.

Pour que le solutionnement du problème ait un caractère plus général, nous pensons d'une part qu'une procédure visant à la génération d'une solution de départ peut être envisagée. Cette procédure nous donnerait une configuration pour le réseau de départ en introduisant uniquement les positions des puits et de la centrale de traitement.

D'autre part, les contraintes citées lors de la formulation et non considérées dans la résolution, à causes des particularités des réseaux étudiées, pourront être introduites.

Enfin, étant donné que le surdimensionnement systématique des réseaux ne peut être considéré comme une solution optimale à la variation du débit, il nous semble utile que le présent problème soit étudié parallèlement à un problème de prévision de consommation, cela éviterait aussi d'avoir à construire un nouveau réseau si la structure actuelle devait s'avérer insuffisante par rapport aux nouvelles exigences.

## Chapitre V

### V.2-Conclusion :

Le but de cette étude était d'élaborer une procédure de dimensionnement optimal d'un réseau de pipelines. Pour arriver à cet objectif deux parties principales ont été abordées.

La première visant à la formulation du problème en établissant d'abord une formulation générale puis en aboutissant à un modèle réduit.

Ce modèle a servi dans la seconde partie à la résolution du problème et à la comparaison des résultats avec le réseau déterminé par la SONATRACH.

Diverses suggestions ont été apportées qui peuvent servir, il nous semble, à un approfondissement ultérieur de cette étude.

**BIBLIOGRAPHIE**

## BIBLIOGRPHIE

- [1] : Mordecai Avriel.  
" Non Linear programming ". Analysis and Méthods  
Prentice-hall
- [2] : Mokhtar S.Bazaraa and C.M Stretty.  
" Non linear progammng ". Theory and algorithms.  
Wiley (1979).
- [3] : Sita Bhaskaran and Franz J.M Salzbom.  
" Optimal design of pipeline networks ".  
Operational research society. Ltd (1979).
- [4] : O.Falngan.  
" Constrained analyses pipeline design ".  
The oil and gaz journal. vol 68 n° 51,21 (1970).
- [5] : Hyman, Stoner and Karnitz  
" Gas formulas, an evluation pipeline and gas pipeline  
system "  
(Partie 1)
- [6] : Institut Français du Pétrole.  
"Formulaire du producteur "  
Technip. (1970).
- [7] : M.Minoux.  
" Programmation mathématique "  
Dunod. Tome 2 (1979)

[8] : Mirka.

" Selectivity of formulas employed in design of high pressure gas transmission ".

[9] : Streeter (V.L) et Wylie (E.B).

" Natural gas pipeline transients "

4 th AFM of SPE. Colorado.

[10] : M.A Stoner.

" Steady-state analysis of gas production, transmission and distribution system ".

44 th AFM of the SPE of AIME. Colorado.

[11] : J.Vincent.

" le transport des hydrocarbures liquides ".

GENOD (1979).

[12] : Notes de cours de mécanique thermique. 3<sup>eme</sup> Année.

[13] : Document " Fluide flow and piping ".

## **ANNEXES**

Convexité du problème de localisation des jonctions [3] :

Dans les problèmes d'optimisation avec ou sans contraintes, la convexité joue un rôle très important. En effet, dans la plupart des algorithmes de programmation mathématique, la convergence vers un optimum global ne pourra être assurée qu'avec l'hypothèse de convexité.

Rappel :

Théorème [7]: Pour une fonction convexe, tout optimum local est un optimum global.

Montrons que la fonction coût :

$$\text{coût} = \sum_{i \in \bar{N}} l(i) \cdot C \left( g_i \left( \frac{l(i)}{pp(i)} \right) \right) + C_1 \cdot \sum_{i \in \bar{N}} l(i)$$

est une fonction convexe de variables  $X(i), Y(i) \ i \in N$ , et  $pp(i) \ i \in \bar{N}$ .

Démonstration :

Démontrons d'abord le lemme suivant :

Lemme [3] :

$$\Phi = l \cdot C \left( g \left( \frac{l}{pp} \right) \right) \text{ avec } l = \sqrt{(z_1 - z_2)^2 + (z_3 - z_4)^2}$$

est une fonction convexe de la variable  $pp$  et  $z_i$ ,  $i=1, \dots, 4$  si  $F(t) = t.C(g(t))$  est une fonction convexe monotone croissante, deux fois dérivable, de variables  $t$  ( $t=l/pp$ ). Pour cela on utilise le résultat suivant :

Si  $f(z_1, \dots, z_n)$  est deux fois dérivable dans un ensemble  $D$  convexe ouvert alors elle est convexe dans  $D$  si et seulement si elle a une forme quadratique :

$$QQ(f) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\delta^2 f}{\delta z_i \delta z_j} \lambda_i \lambda_j \geq 0 \quad \forall \lambda_i, \lambda_j \quad \forall (i, j) \in D^2$$

aussi la forme quadratique peut être considérée pour  $\phi$  :

$$QQ(\phi) = \sum_{i=1}^4 \alpha_i^2 \frac{\delta^2 \phi}{\delta z_i^2} + \gamma^2 \frac{\delta^2 \phi}{\delta pp^2} + 2 \sum_{i=1}^4 \alpha_i \alpha_j \frac{\delta \phi^2}{\delta z_i \delta z_j} + 2 \cdot \gamma \sum_{i=1}^4 \alpha_i \frac{\delta^2 \phi}{\delta pp \delta z_i}$$

où  $\gamma$  et  $\alpha_i$ ,  $i=1, \dots, 4$  sont des multiplicateurs

on a :

$$\phi(z_1, \dots, z_4, \phi) = ppF(l/pp)$$

$$\frac{\delta \phi}{\delta z_i} = \frac{\delta l}{\delta z_i} F'(l/pp)$$

$$\frac{\delta^2 \phi}{\delta z_i \delta z_j} = F'(l/pp) \frac{\delta l}{pp \delta z_i \delta z_j} + \frac{l}{pp} \frac{\delta l}{\delta z_i} \frac{\delta l}{\delta z_j} F''(l/pp)$$

Calculs intermédiaires :

$$\begin{aligned}
 * \frac{\delta \phi}{\delta p p} &= (p p F(l/p p))' \\
 + \frac{\delta \phi}{\delta p p} &= -l/p p F(l/p p) + F(l/p p) \\
 * \frac{\delta^2 \phi}{\delta p p^2} &= -l \left( \frac{\delta}{\delta p p} \left( \frac{F(l/p p)}{p p} \right) + \frac{\delta F(l/p p)}{\delta p p} \right) \\
 &= -l \left( \frac{-l/p p^2 F(l/p p) p p - F(l/p p)}{p p} - l/p p^2 F(l/p p) \right) \\
 &= l^2/p p^3 F(l/p p) + l \frac{F(l/p p)}{p p^2} - l/p p F(l/p p)
 \end{aligned}$$

d'v

$$+ \frac{\delta^2 \phi}{\delta p p^2} = l^2/p p^3 F(l/p p)$$

$$* \left[ \frac{\delta \phi}{\delta z_i} - \frac{\delta l}{\delta z_i} F'(l/p p) \right]$$

$$+ \frac{\delta^2 \phi}{\delta p p \delta z_i} = \frac{\delta}{\delta p p} \left( \frac{\delta l}{\delta z_i} F'(l/p p) \right) = \frac{\delta l}{\delta z_i} \frac{\delta}{\delta p p} F'(l/p p)$$

$$+ \frac{\delta \phi}{\delta p p \delta z_i} = -\frac{\delta l}{\delta z_i} l/p p^2 F''(l/p p)$$

$$\frac{\delta^2 \phi}{\delta z_i^2} = \frac{\delta}{\delta z_i} \left( \frac{\delta l}{\delta z_i} F'(l/p p) \right) = \frac{\delta^2 l}{\delta z_i^2} F'(l/p p) + \left( \frac{\delta l}{\delta z_i} \right)^2 \frac{F''(l/p p)}{p p}$$

$$\frac{\delta^2 \phi}{\delta z_i^2} = \frac{\delta^2 l}{\delta z_i^2} F'(l/p p) + \left( \frac{\delta l}{\delta z_i} \right)^2 l/p p F''(l/p p)$$

En remplaçant dans QQ( $\phi$ ) on obtient :

$$QQ(\phi) = F'(l/p p) QQ(l) + F''(l/p p) \left( \sum_{i=1}^4 \alpha_i \frac{\delta l}{\delta z_i} - \frac{\gamma l}{p p} \right)^2$$

Comme  $l$  est une fonction convexe de  $z$  on a :  $QQ(l) \geq 0$

de plus  $F'(l/pp) \geq 0$   $F''(l/pp) \geq 0$  (condition du lemme)  
 par suite  $QQ(\phi) \geq 0$ . Ceci prouve que  $\phi$  est une fonction convexe.

Pour que la fonction coût soit convexe il faut que :

$$F_i(t) = tC(g_i(t)), t \in \bar{N}$$

soit convexe monotone croissante, définie par :

$$N_i = N \cdot q^{\beta_1}(l) \cdot s^{\beta_2}(l),$$

$$\begin{aligned} C(g_i(t)) &= C(Nq^{\beta_1} \cdot s^{\beta_2}(l) \cdot t^{\beta_3}) \\ &= C(N_i t^{\beta_3}) = k \cdot d^{\beta_3} = C(d) \end{aligned}$$

$$C(g_i(t)) = k \cdot N_i \cdot t^{\beta_3 \mu}$$

$$F_i(t) = t \cdot k \cdot N_i^{\mu} \cdot t^{\beta_3 \mu}$$

$$F_i(t) = k \cdot N_i^{\mu} \cdot t^{\beta_3 \mu + 1} \quad k, N_i > 0$$

et  $\beta_3 \mu \geq 0$

$$\frac{dF_i(t)}{dt} = (1 + \beta_3 \cdot \mu) \cdot k \cdot N_i^{\mu} \cdot t^{\beta_3 \mu}$$

$$\frac{d^2 F_i(t)}{dt^2} = k \cdot N_i^{\mu} \cdot (1 + \beta_3 \cdot \mu) \cdot \beta_3 \cdot \mu \cdot t^{\beta_3 \mu - 1} \geq 0.$$

c. q. f. d

Le réseau optimal est un arbre :

L'expression de  $d$  est :

$$d = h(q, s, l, pp) = N \cdot q^{p_1} \cdot s^{p_2} \cdot \left(\frac{l}{pp}\right)^{p_3}$$

Où  $q, s, l, pp$  sont des variables définies au cours du deuxième chapitre.

Le coût du réseau est :

$$\text{Coût} = \sum_{(i,j) \in A} H(q(i,j), s, l(i,j), pp(i,j)) + \sum_{(i,j) \in A} l(i,j)$$

avec :

$A = \{\text{ensemble des arcs du système}\}$

$A = \{(i,j) / i, j \in N, i \neq j\}$

$d(i,j)$  : diamètre de l'arc  $(i,j)$ .

$q(i,j)$  : diamètre du gaz dans l'arc  $(i,j)$ .

$pp(i,j)$  : perte de charge à travers l'arc  $(i,j)$ .

$l(i,j)$  : longueur de l'arc  $(i,j)$ .

$s$  = densité du gaz, (le gaz a même densité dans le réseau).

Les débits  $q(i,j)$  et les pressions  $pp(i,j)$  doivent satisfaire :

-La conservation du flux :

Le flux entrant dans chaque noeud doit être égal au flux sortant de ce même noeud. Ceci se traduit par :

$$\left( Q(l) + \sum_{(k,l)} q(k,l) - \sum_{(l,j) \in A} q(l,j) \right) \quad (1)$$

où  $q(l,j) \geq 0 \quad \forall (l,j) \in A \quad Q(l) = 0 \quad l \in N,$

-perte de charge :

La perte de charge maximale entre les puits et l'usine ne doit pas dépasser  $P^* = P_1^* - P_0^*$

Théorème :

Si H est une fonction strictement concave en fonction de q alors le réseau optimal est un arbre.

Démonstration :

On suppose que le réseau optimal existe avec l'ensemble N. des puits et jonctions, A' l'ensemble des arcs,  $d^*(l,j)$  les diamètres optimaux,  $Q^*(l,j)$  le débit au niveau de chaque noeud,  $pp^*(l,j)$  perte de charge au niveau de chaque arc et  $l(i)$  les longueurs optimales.

La fonction H dépend seulement de q à l'optimum. Toutes les autres variables seront prises fixe.

Le problème peut être considéré comme une minimisation d'une fonction à une seule variable sous la condition (1).

si H est une fonction concave de la variable q alors le coût est une fonction strictement concave de la variable q(i,j). Le problème devient une minimisation d'une fonction strictement concave sous la contrainte linéaire (1). Le minimum est atteint en un point extrême du polyèdre formé par (1).

Rappel :

Une fonction f est dite concave par rapport à x si  $\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} < 0$ .

Donc on doit avoir :

$$\frac{\partial^2 H}{\partial q^2} = \delta^2 \left( LC \left( \frac{h(q, s, l, pp)}{\delta q^2} \right) + \sum_{i \in N} l(i) \right)$$

Comme  $l > 0$  l'inégalité devient

$$C''(d) \cdot \left( \frac{\partial h}{\partial q} \right)^2 + C'(d) \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial \lambda^2} < 0$$

en remplaçant h par son expression :

$$N \cdot \beta_1 \cdot q^{\beta_1 - 2} \cdot s^{\beta_2} \cdot \left( \frac{l}{pp} \right)^{\beta_3} \cdot (d \cdot C''(d) \cdot \beta_1 + C'(d) \cdot (\beta_1 - 1)) < 0$$

Cette inégalité sera vérifiée si :

$$(d \cdot C''(d) \cdot \beta_1 + C'(d) \cdot (\beta_1 - 1)) < 0$$

Soit encore

$$d.C'' \frac{(d)}{C'(d)} < \frac{1-\beta_1}{\beta_1}$$

En utilisant une fonction C de la forme  $C(d) = k.d^\mu$  la contrainte devient  $\beta_1 < 1$

Si on considère l'équation générale d'écoulement donnée par Weymouth on aura :

$$\mu < 8/3 \quad \beta_1 = 3/8$$

Dans la pratique cette condition n'est pas difficile à satisfaire.

Données du réseau de collectes :

$$M = 12.$$

$$P_s = 101.325 \text{ Kpa.}$$

$$T_s = 288.15 \text{ K.}$$

$$T = 333.15 \text{ K.}$$

$$S(i) = S = 0.6 (\text{t}\overline{N}).$$

$$Q(i) = 1.25 \text{ m}^3/\text{j.}$$

$$P_1 = 160 \text{ Bars.}$$

$$P_0 = 100 \text{ Bars.}$$

$$C_s = 1 \text{ \$/Kg.}$$

$$\rho_s = 7851 \text{ Kg/m}^3.$$

$$P = 180 \text{ Bars.}$$

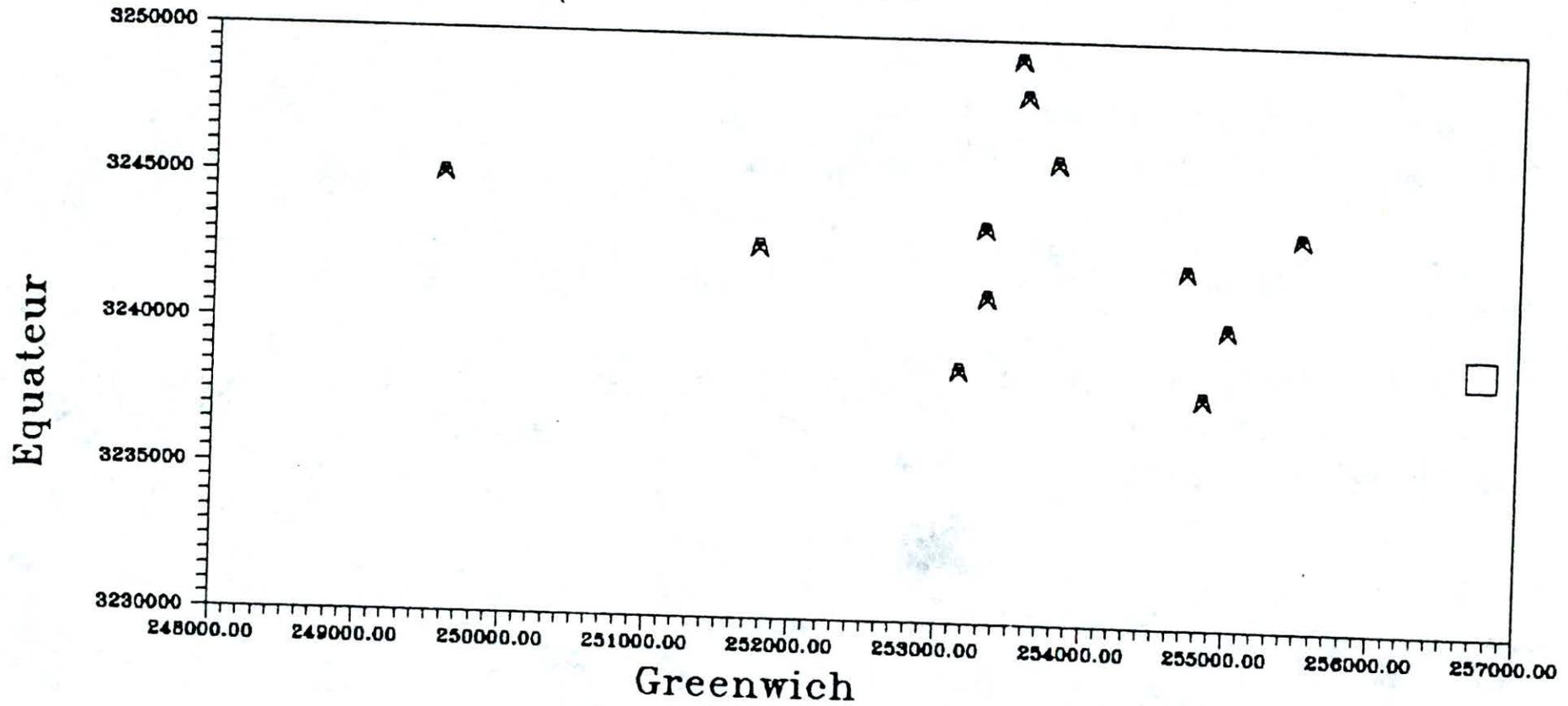
$$R = 60 \text{ 000 Psi.}$$

$$C_r = 1.$$

$$C_x = 0.8.$$

$$C_t = 28 \text{ \$/m.}$$

Puits Producteurs



Données du réseau de dessertes :

$$M = 8.$$

$$P_s = 101.325 \text{ Kpa.}$$

$$T_s = 288.15 \text{ K.}$$

$$T = 388.15 \text{ K.}$$

$$S(i) = S = 0.5 \text{ (le } \bar{N}\text{)}.$$

$$Q(i) = 1.675 \text{ m}^3/\text{j}.$$

$$P_1 = 300 \text{ Bars.}$$

$$P_0 = 275 \text{ Bars.}$$

$$C_a = 1 \text{ \$/Kg.}$$

$$\rho_a = 7851 \text{ Kg/m}^3.$$

$$P = 330 \text{ Bars.}$$

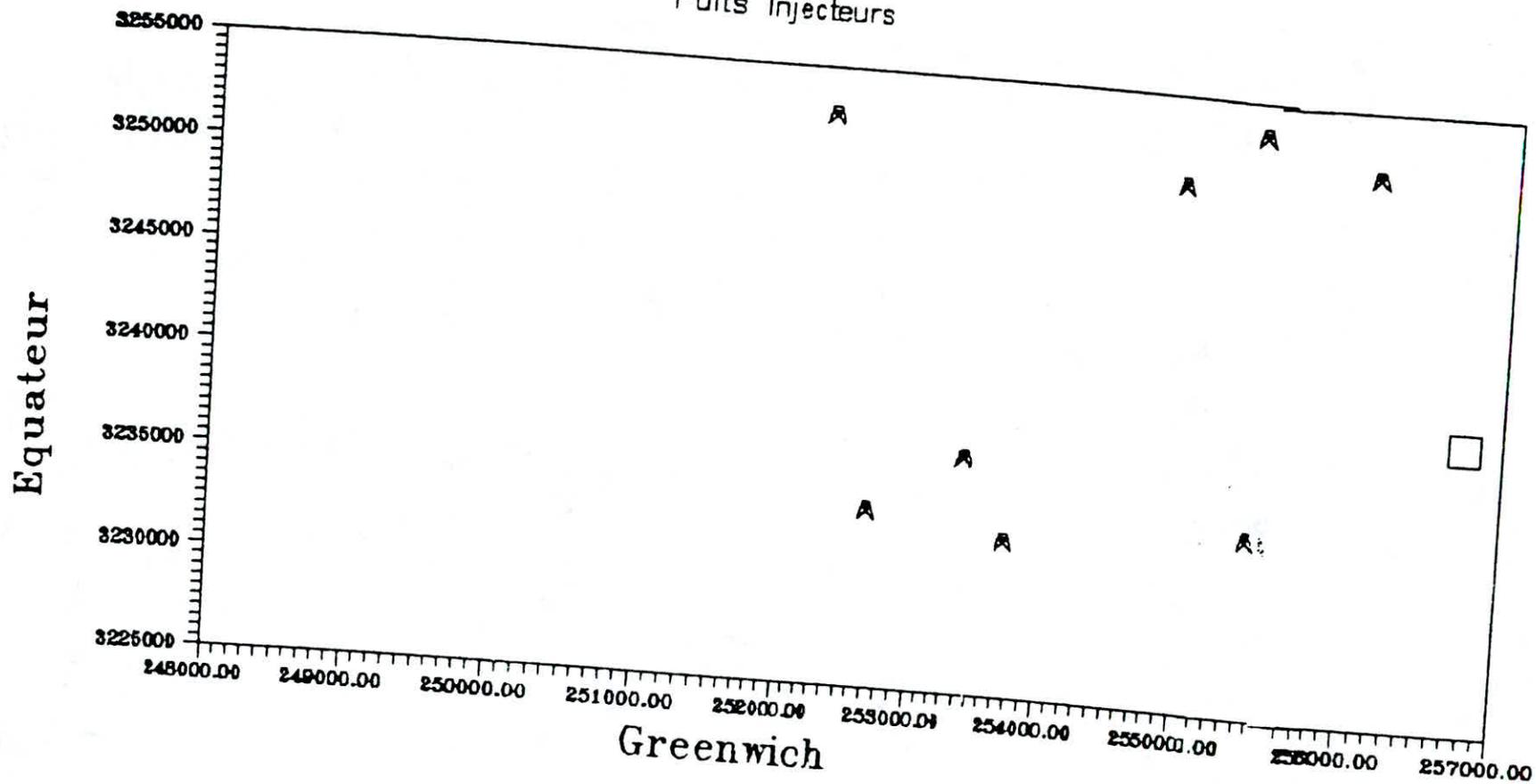
$$R = 60 \text{ 000 Psi.}$$

$$C_s = 1.$$

$$C_r = 0.8.$$

$$C_t = 28 \text{ \$/m.}$$

Puits Injecteurs



Annexe 5

Coût en fonction du diamètre intérieur

Diamètre intérieur (inches)	Coût du pipe (\$/mile)
4.000	28,200
6.125	40,500
8.001	50,080
15.250	135,680
21.124	250,800
38,750	470,000

Algorithme de Fletcher & reeves :

Pas 0 : Choisir  $\epsilon, x_1$ . Soit  $y_1 = x_1, d_1 = -\nabla f(y_1), k = 1,$   
 $j = 1$

Pas 1 : Si  $|\nabla f(y_j)| < \epsilon$  stop, sinon soit  $\alpha,$  la solution optimale de  $\min (f(y_j) + \alpha d_j)$

$$\alpha \geq 0.$$

$$\text{Soit } y_{j+1} = y_j + \alpha, d_j.$$

Si  $j < n,$  aller au pas 2, sinon aller au pas 3

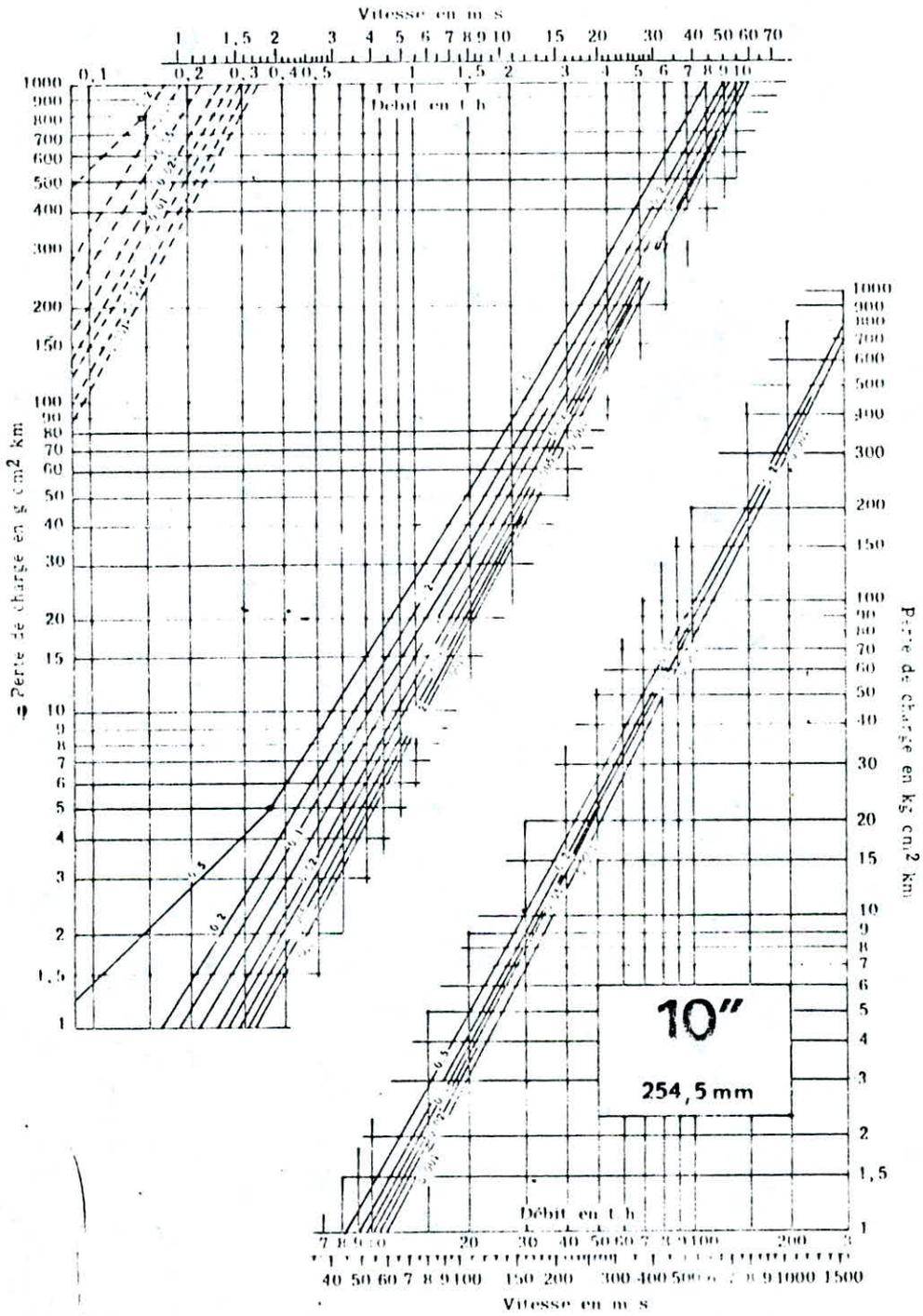
Pas 2 :  $d_{j+1} = -\nabla f(y_{j+1}) + \beta_j d_j$

$$\beta_j = \frac{|\nabla f(y_{j+1})|^2}{|\nabla f(y_j)|^2}$$

$j = j+1,$  aller au pas 1

Pas 3 :  $x_{k+1} = y_{n+1}, y_1 = x_{k+1}, d_1 = \nabla f(y_1) j=1, k=k+1$   
 aller à au pas 1

Fig. IV.13. — PERTES DE CHARGE  
DANS LES ÉCOULEMENTS GAZEUX (10" - 254,5 mm)



```

PROGRAM PIPELINE(INPUT,OUTPUT);
LABEL 10;
LABEL 20;
CONST EPS=0.05 ;H=0.001;
TYPE T1=ARRAY [0..2*M] OF REAL;
T2=ARRAY [1..3*(M-1)] OF REAL ;
T3=ARRAY [0..2*M-1] OF REAL;
T5=ARRAY [1..2*M-1] OF INTEGER;
T6=ARRAY [1..2*M-1,1..2*M-1] OF INTEGER;
VAR X,Y:T1;DB,Q,L,diam,PP:T3 ; W,V,D,D1:T2 ; A,K:T5;B:T6;
I,J,NI,nj,z,IND:INTEGER ;som,L1,N,M1,BETA:REAL
;INXY,INPRED,OUT,Outxy:TEXT;
(*-----SUCCESEURS-----*)
( Cette procédure nous permet de déterminer les successeurs
de chaque
noeud à partir de la fonction des prédecesseurs introduite au
départ )
PROCEDURE SUCCESS(A:T5;VAR B:T6;VAR K:T5);
BEGIN
FOR I:=1 TO 2*M-1-z DO
begin
K[I]:=0;
FOR J:=1 TO 2*M-1-z DO
IF A[J]=i THEN BEGIN K[I]:=K[I]+1;B[I,K[I]]:=J END
end
END;
(*-----DEBIT-----*)
( Cette procedure calcule ,à l'aide des équations de
conservation définies
dans le chapitre 2, le débit traversant chaque arc.)
PROCEDURE DEBIT(VAR Q:T3);
BEGIN
FOR I:=1 TO 2*M-1-z DO
IF K[I]=0 THEN Q[I]:=DB[I]
ELSE
BEGIN
Q[I]:=DB[I];
FOR J:=1 TO K[I] DO Q[I]:=Q[I]+Q[B[I],J]
END
END;
(*-----PERTES DE CHARGES-----*)
( Les pertes de charge au niveau des points extremes sont
déterminées en
retranchant à la perte de charge totale la somme des pertes
de charge
résultant des arcs reliant ces points à la centrale.)

```

```

PROCEDURE PERTE (VAR PP:T3);
BEGIN
  FOR I:=1 TO M DO
    IF K[I]=0 THEN
      BEGIN
        PP[I]:=PPM;
        J:=I;
        REPEAT
          PP[I]:=PP[I]-(PP[A[J]]);
          J:=A[J];
        UNTIL (J=0)
        END
      END;
  (*----- CALCUL DES LONGUEURS-----*)
  ( Procedure servant au calcul des longueurs des différents arcs )
PROCEDURE LONG(VAR L:T3 );
VAR I:INTEGER;
BEGIN
  FOR I:=1 TO 2*M-1-z DO
    BEGIN
      L[I]:=SQRT(SQR(X[I]-X[A[I]])+SQR(Y[I]-Y[A[I]]))
    END
  END;
  (*----- FONCTION objectif-----*)
FUNCTION F(V:T2):REAL ;
VAR I:INTEGER;
BEGIN
  SOM:=0;
  FOR I:=1 TO M-1-z DO
    BEGIN
      X[I+M]:=V[3*I-2];Y[I+M]:=V[3*I-1];PP[I+M]:=V[3*I]
    END ;
    LONG(L);
    PERTE(PP);
    njonc(jon);
    FOR I:=1 TO 2*M-1-z DO
      BEGIN
        SOM:=SOM+0.18*L[I]*EXP((0.75)*LN(Q[I]))
          *EXP((3/8)*LN(L[I]/((PP[I])*1E7)))+28*I[I]
      END;
    F:=SOM
  END;
  (*----- DIRECTION -----*)
PROCEDURE GRADIENT (V:T2;VAR D:T2) ;
CONST H=0.001 ;
VAR F1:REAL ;I:INTEGER ;
BEGIN
  F1:=F(V);
  FOR I:=1 TO 3*(M-1-z) DO
    BEGIN
      V[I]:=V[I]+H ;D[I]:=-(F(V)-F1)/H;V[I]:=V[I]-H;

```

```

        END
    END ;
    (*----- NORME -----*)
    PROCEDURE NORM(D:T2 ;VAR N:REAL) ;
    VAR I:INTEGER ;S:Real;
    BEGIN
        S:=0 ;
        FOR I:=1 TO 3*(M-1-z) DO S:=S+D[I]*D[I] ;
        N:=SQRT (S)
    END ;
    (*----- VECTEUR -----*)
    FUNCTION G(L1:REAL):REAL ;
    VAR I:INTEGER ;
    BEGIN
        FOR I:=1 TO 3*(M-1-z) DO BEGIN W[I]:=V[I]+L1*D[I] END;
        G:=F(W)
    END;
    (*----- PREMIERE DERIVEE -----*)
    FUNCTION DIG(L1:REAL):REAL;
    BEGIN
        DIG:=(G(L1+H)-G(L1))/H
    END;
    (*----- DICHOTOMIE -----*)
    { Méthode d'optimisation unidimensionnelle servant à la
    détermination du pas pour la méthode principale.}
    PROCEDURE OPTIMA (VAR L1:REAL);
    CONST e=0.0001;
    VAR max,min,p:REAL;
    BEGIN
        p:=0.0001;
        min:=0;
        while(dig(p)<0) do
            begin
                min:=p;
                p:=p+p
            end;
        max:=p;
        while (max-min)>e do
            begin
                l1:=(min+max)/2;
                if dig(l1)>0 then max:=l1 else min:=l1
            end
        END
    END;
    (*-----elimination-----*)
    { Cette procedure permet d'eliminer une jonction
    dès que celle-ci est très proche d'un puit ou d'une autre
    jonction.}

```

```

procedure elimination;
VAR T,j,R:INTEGER;
begin
  for i:=1 to m-1-z do
    begin
      x[i+m]:=v[3*i-2];
      y[i+m]:=v[3*i-1];
      pp[i+m]:=v[3*i]
    end;
  long(1);
  for i:=1 to 2*m-1-z do
    begin
      if (l[i]<100) then
        begin
          IF (I<=M) THEN
            BEGIN
              R:=A[I];
              FOR T:=1 TO K[R] DO A[B[R,T]]:=I;
              A[I]:=A[R];
              i:=R;
            END
          ELSE
            BEGIN
              for T:=1 to k[i] do A[B[I,T]]:=A[I]
            END;
            IND:=1;
            FOR J:=I+1 TO 2*M-1-Z DO
              BEGIN
                FOR T:=1 TO i-1 DO
                  BEGIN
                    IF A[T]=J THEN A[T]:=J-1
                  END
                END;
            FOR J:=I+1 TO 2*M-1-Z DO
              BEGIN
                FOR T:=I+1 TO 2*M-1-Z DO
                  BEGIN
                    IF A[J]=T THEN A[J-1]:=T-1
                  END;
                FOR T:=0 TO M DO
                  BEGIN
                    IF A[J]=T THEN A[J-1]:=T
                  END
                END;
            ENd;
            Z:=Z+1;
            IF I<>2*M-Z THEN
              FOR J:=I+1-M TO M-Z DO
                BEGIN
                  V[3*(J-1)-2]:=V[3*J-2];
                  V[3*(J-1)-1]:=V[3*J-1];
                  V[3*(J-1)]:=V[3*J]
                END
              END
            END

```

```

        END
      END
END;
(*-----
-----*)
PROCEDURE IMPRESSION;
  VAR I:INTEGER;
  BEGIN
    FOR I:=1 TO M-1-z DO
      BEGIN
        X[I+M]:=V[3*I-2];
        Y[I+M]:=V[3*I-1];
        PP[I+M]:=V[3*I]
      END;
      for i:=1 TO 2*M-1-Z DO
        begin
          diam[i]:=14.89*exp((3/8)*ln(q[i]))*exp((3/16)*ln(1[i]/(pp[
i]*1e7)))
        END;
        for i:=1 to 2*m-1-z do
          begin
            writeln(out, '(' , i , ',' , a[i] , ') ' , '      ' , l[i]:8:2 , '
', diam[i]:4:2
            , '      ' , pp[i]:8:2 , '      ' , q[i]:8:3);
            writeln(outxy, i , '      ' , x[i]:8:2 , '      ' , y[i]:8:2)
            end;writeln(out, 'cout=' , f(v))
          END;
        (*----- PROGRAMME PRINCIPAL -----*)
        BEGIN
          ASSIGN(INXY, 'INXY.DAT'); ( Fichier contenant les coordonnées
          des puits et
          des jonctions )
          ASSIGN(INPRED, 'INPRED.DAT'); ( Fichier contenant les
          prédecesseurs de
          chaque point )
          RESET(INXY);
          RESET(INPRED);
          assign(outxy, 'outxy.dat'); ( Fichier de sortie donnant la
          nouvelle position
          des joctions )
          ASSIGN(OUT, 'OUT.DAT'); ( Fichier de résultat )
          REWRITE(OUT);rewrite(outxy);
          z:=0;
          writeln('INTRODUIRE LE NOMBRE DE PUIITS A
          RACCORDER');readln(M);
          FOR I:=0 TO 2*M-1 DO READLN(INXY,X[I],Y[I]); CLOSE(INXY);
          FOR I:=1 TO M DO
            BEGIN
              WRITELN('INTRODUIRE LE DEBIT SORTANT DU PUIT
              ' , I);readln(Q[I])
            END;
            WRITELN('INTODUIRE LA PRESSION D'ENTREE A L'USINE DE

```

```

TRAITEMENT ');READLN(P2);
WRITELN ('INTRODUIRE LA PRESSION A LA SORTIE DES
PUITS');READLN('P1');
PPM:=(P1*P1)-(P2*P2);
FOR I:=M+1 TO 2*M-1 DO
  BEGIN
    PP[I]:=0.1*PPM;
    DB[I]:=0
  END;
FOR I:=1 TO 2*M-1 DO READLN(INPRED,A[I]);CLOSE(INPRED);
FOR I:=1 TO M-1 DO
  BEGIN
    V[3*I-2]:=X[I+M];
    V[3*I-1]:=Y[I+M];
    V[3*I]:=PP[I+M]
  END;
10:   for i:=m+1 to 2*m-1-z DO
  BEGIN
    PP[I]:=0.1*PPM;
    DB[I]:=0
  END;
  FOR I:=1 TO M-1 DO V[3*I]:=PP[I+M];
  success(a,b,k);
  debit(q);
  GRADIENT(V,D);
  IND:=0;
  NI:=1;
  nJ:=1;
  (*-----
  -----*)
  REPEAT
  BEGIN
    NORM(D,N);writeLn('norme=',n);
    M1:=N;
    OPTIMA(L1);
    FOR I:=1 TO 3*(M-1-z) DO V[I]:=V[I]+L1*DB[I] ;
    ELIMINATION;
    IF IND=1 THEN GOTO 10 ;
    IF M-1=Z THEN BEGIN WRITELN(OUT4,'AUCUNE
JONCTION:');GOTO 20 END;
    IF nJ<=3*(M-1-z) THEN
      BEGIN
        FOR I:=1 TO 3*(M-1-z) DO D1[I]:=D[I];
        GRADIENT(V,D);
        NORM(D,N);
        BETA:=(N/M1)*(N/M1);
        FOR I:=1 TO 3*(M-1-z) DO D[I]:=D[I]+BETA*D1[I] ;
        nJ:=nJ+1;writeLn('nj=',nJ)
      END
    ELSE
      BEGIN
        GRADIENT (V,D);

```

Fletcher &amp; Reeves

```
        NI:=NI+1;
    nJ:=1;writeLn('nj:',nj)
    END
END;
UNTIL(N<EPS);
BEGIN
20:  IMPRESSION
    END;
CLOSE(OUT);close(outxy)
END.
```

