

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

1/96

وزارة التربية الوطنية

MINISTRE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة - BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT

GENIE INDUSTRIEL

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*ELABORATION D'UN OUTIL D'AIDE A LA
DECISION POUR L'AFFECTION DES
RESSOURCES D'EXPLORATION.
APPLICATION SONATRACH*

Proposé par :

M. BENCHERIF
(E.P.P.- SONATRACH)

Etudié par :

M. AIB
O. HAMMOUDI

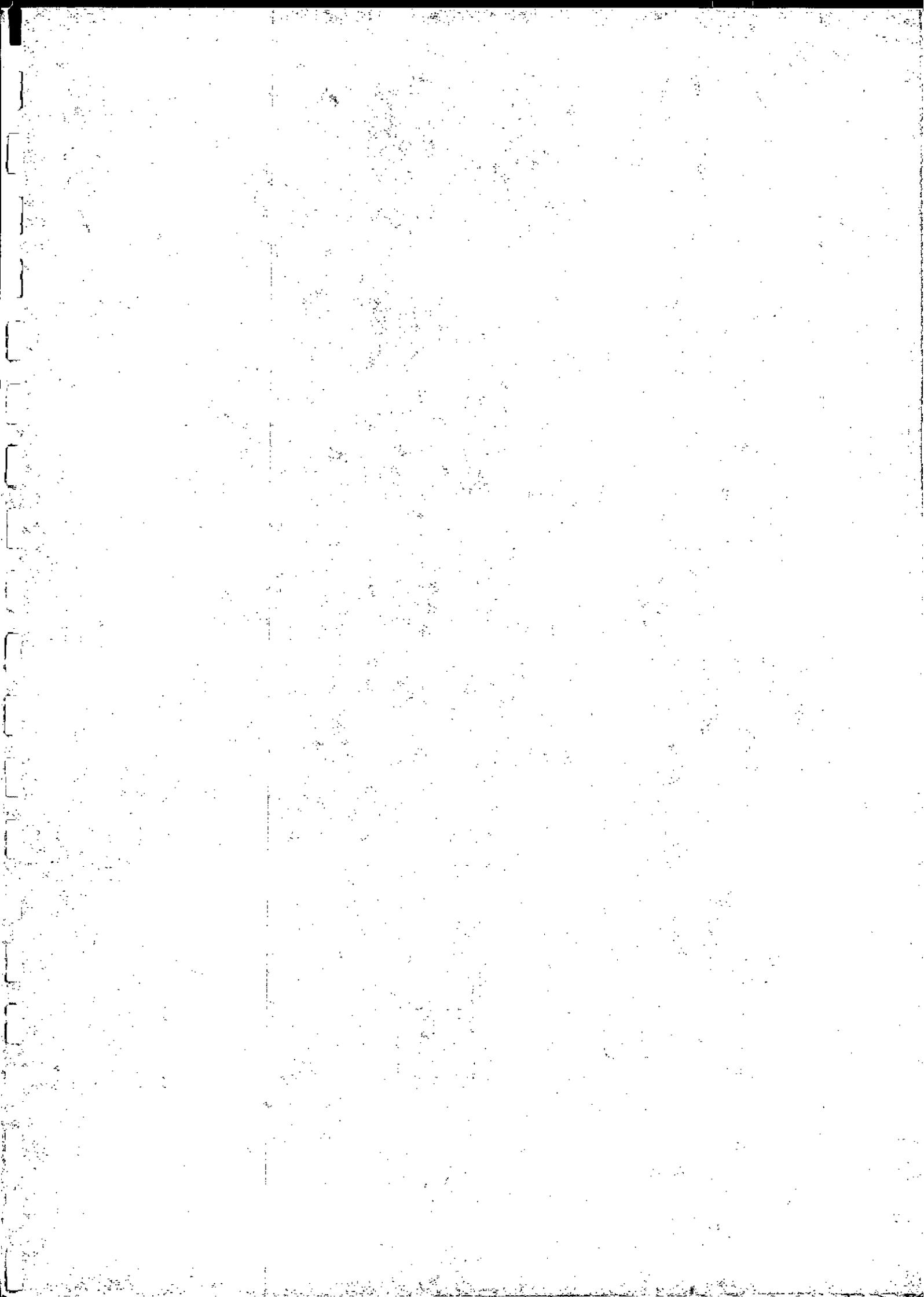
Dirigé par :

Dr N.ABOUN

PROMOTION

Juin 1996

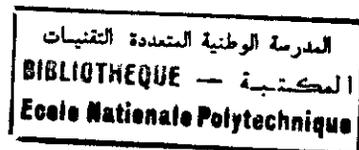
E. N. P 10, Avenue Hassen Badi - EL-HARRACH - ALGER



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

*ELABORATION D'UN OUTIL D'AIDE A LA
DECISION POUR L'AFFECTATION DES
RESSOURCES D'EXPLORATION.
APPLICATION SONATRACH*

Remerciements



Sincères remerciements à:

M. BENCHERIF pour nous avoir proposé ce sujet, son soutien et ses orientations nous ont beaucoup aidé tout au long de notre étude.

Mlle ABOUN, notre promotrice; ses conseils et ses corrections ont été décisifs pour notre travail.

M. MEKARNIA pour ses conseils avisés et ses encouragements sincères.

M. OUABDESSELAM et M. LAMRAOUI pour nous avoir fourni des informations très utiles à notre travail.

Mme BELMOKHTAR pour avoir accepté de présider notre jury.

Tous les enseignants du département pour avoir contribué à notre formation.

Billel, Aicha, Djaffar et Khaled sans qui le tirage de ce document n'aurait pu se faire.

El Hadi, Mehdi et Zahir pour leur contribution à notre travail.

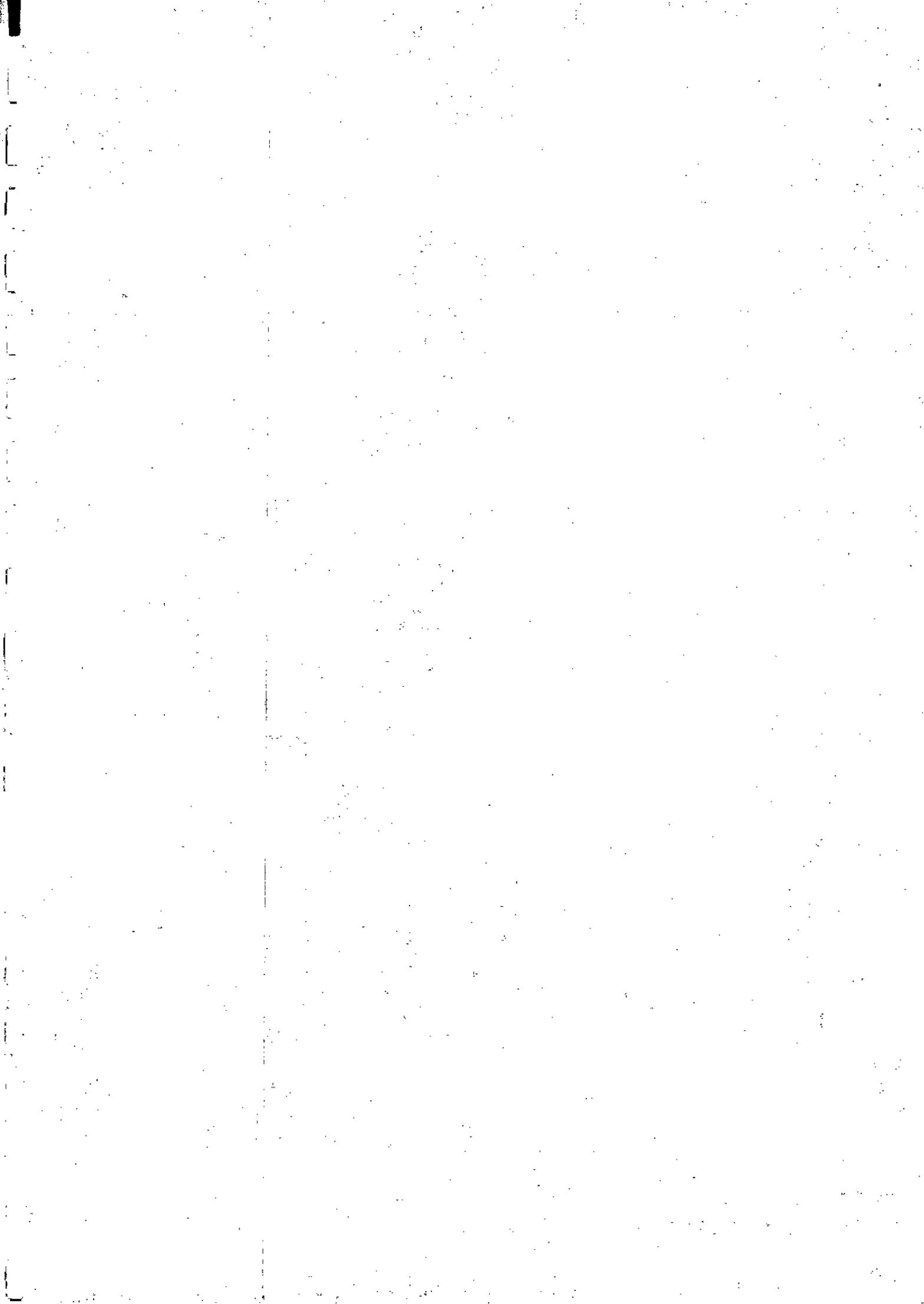
Sabrina, Chafik, Kiki, Nabila, Nono, Hacen, Rachid, Said, Lyes, Hakima, Chafika, Abdelali, Youyou, Halim, Mourad, Samir, Amel, Nidhal, Lotfi, Sid, Amar, Hassen, Wassila, Myriam, Salima, Mohamed, Radia, Nassima et tous les autres pour nous avoir soutenu.

*Je dédie ce travail
à ma mère et à mon père qui n'ont cessé de se sacrifier pour leurs enfants,
à mes frères et soeurs,
à mes amis, tout particulièrement Hassen, Zahir, Mehdi et Lyes.*

Mabrouk

*A ma très chère grand-mère,
à ma mère et à mon père qui ont toujours tout fait pour ma réussite,
à ma sœur, son mari, mon frère et toute ma famille,
à mon oncle Antar ,
à Jasmin ma cousine préférée,
à la mémoire de Missoum qui n'a pas eu, comme moi, la chance de soutenir,
à tout le groupe de la Madrague
je dédie ce travail.*

Ouiza



ككل شركة بحث عن البترول يريد لها البقاء تستر على شرط لارحمة
 فيه يتشمل في انتاج مشاريع كشف بصفة دائمة
 تودي الي غدد جيد لعملية الحفر.

تمثل حفريات الكنتيف العملية الاكثر كلفة في البحث
 ولذا يجب ان يكون غذاها بصفة مثالية. في هذا الاطار قد
 الدراسة المقدمة تتحل لهذا ، اداة عون في اتخاذ
 القرار يمتح في المرحلة الاولى ، توزيع جيد
 لموارد الكنتيف لكل ناحية جيولوجية في
 المرحلة الثانية ، يحدد في كل ناحية اماكن
 الحفر التي تكون لها اوفر الحظوظ في
 الاكتشافات .

Résumé

Une condition sine qua non pour qu'une société de recherche pétrolière soit viable est l'élaboration ininterrompue de projets d'exploration pouvant donner lieu à l'implantation efficace de forages.

Les forages d'exploration représentent l'opération la plus onéreuse dans la prospection, c'est pourquoi leur implantation, doit se faire de manière optimale. C'est dans cette optique que s'inscrit la présente étude.

Nous développons, à cet effet, un outil d'aide à la décision qui fournit, dans un premier temps, une allocation optimale des ressources d'exploration par région géologique; puis dans un second temps, détermine, pour chaque région, la séquence des sites de forage qui maximisera les chances de découvertes. Une application sera faite pour la SONATRACH.

Abstract

A sine qua non condition for a company of petroleum research to be viable is the unremitting elaboration of exploration projects which could give place to the efficient settling of exploratory wells.

As drilling exploratory wells represent the heaviest charge operation in prospecting, their location has to be made in the optimal way. It is in this sense that the present survey is conceived.

We develop, in this purpose, a helping tool for decision which provides, in a first time, an optimal allowance of exploration resources by geological region; then in a second time, determines, for each region, the sequence of the drilling sites that will maximize the chances of discoveries. An application will be carried out for SONATRACH.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE	3
PRESENTATION DE LA PROBLEMATIQUE	5
I. NOTIONS FONDAMENTALES DE RECHERCHE PETROLIÈRE	5
I.1. NATURE DU PÉTROLE ET DU GAZ	5
I.2. ORIGINE DES HYDROCARBURES	6
I.3. FORMATION DES GISEMENTS DE PÉTROLE ET DE GAZ	6
I.4. CLASSIFICATION DES RÉSERVES D'HYDROCARBURES	8
I.5. LES DIFFÉRENTES ÉTAPES DE LA VIE D'UNE RÉGION PÉTROLIFÈRE	10
II. PRÉSENTATION GÉNÉRALE ET CONTEXTE DU PROBLÈME	12
III. OBJET DE L'ÉTUDE	16
L'EXPLORATION PETROLIÈRE	17
INTRODUCTION	17
I. MÉTHODES DE PROSPECTION	18
I.1. MÉTHODES DIRECTES	18
I.2. MÉTHODES INDIRECTES	18
II. LE FORAGE	20
II.1. DONNÉES NÉCESSAIRES A L'ÉLABORATION D'UN Puits	21
II.2. DÉPENSES DE FORAGE	21
COMPLEXITE DU PROBLEME ET DIVERSITE DES APPROCHES DE RESOLUTION	23
I. NATURE DU SYSTEME	23
II. REVUE DE LITTÉRATURE	27
MODÉLISATION ET APPROCHES DE RÉOLUTION	31
I. OBJECTIF	31
II. MODÈLE DE RÉPARTITION INTER-DISTRICTS	32
II.1. DÉFINITION DU PROBLÈME	32
II.2. CHOIX ET FORMULATION DU MODÈLE	33
II.3. ALGORITHMES DE RÉOLUTION	37
III. MODÈLE DE RÉPARTITION INTRA-DISTRICT	59
III.1. FORMULATION DU MODELE	60
III.2. RÉOLUTION	65
III.3. DISCUSSION SUR LA COMPLEXITE	65
IMPLÉMENTATION ET APPLICATION SONATRACH	66
I. MODÈLE DE RÉPARTITION INTER-DISTRICTS	66
I.1. PRÉSENTATION DU CAS TRAITE	66
I.2. CONSTRUCTION DES COURBES LOGISTIQUES	68
I.3. IMPLÉMENTATION DES APPROCHES DE RÉOLUTION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	76
II. MODELE DE REPARTITION INTRA-DISTRICT	92
II.1. PRESENTATION DU CAS TRAITE	92
II.2. RESULTATS ET INTERPRETATIONS :	95
CONCLUSION GENERALE	96
GLOSSAIRE	98

BIBLIOGRAPHIE	103
ANNEXES	110
ANNEXE I: HISTORIQUES ET COURBES LOGISTIQUES	110
ANNEXE II: PROGRAMMES ET RÉSULTATS	118
ANNEXE III: PRÉSENTATION DES LOGICIELS UTILISÉS	137
ANNEXE IV: APERÇU SUR LA DERNIÈRE LOI SUR LA RECHERCHE PÉTROLIÈRE EN ALGÉRIE	139
ANNEXE V: ESTIMATION DES RÉSERVES D'HYDROCARBURES	141
ANNEXE VI: LES TECHNIQUES GÉOLOGIQUES ET GÉOPHYSIQUES	143

NOTE

*Les mots suivis d'un astérisque * * **
sont définis en Glossaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Lorsque le 31 décembre 1963 , le décret 63-491 fut paraphé, l'acte de naissance de la **SONATRACH** venait d'être signé. La Société Nationale de Transport et de Commercialisation des Hydrocarbures n'avait alors pour objet que de " *préparer et de mettre au point les études préalables à la construction des moyens de transport terrestres ou maritimes permettant de véhiculer les hydrocarbures liquides ou gazeux* ".

Aujourd'hui son plan de développement s'articule autour des objectifs suivants:

- Intensification des travaux d'exploration.
- Amélioration du taux de récupération des réserves en place dans les gisements de pétrole actuellement en exploitation.
- Développement de gisements de gaz découverts et non encore exploités.
- Augmentation des capacités d'exportation de gaz naturel.

On conçoit aisément l'importance capitale de l'exploration pétrolière dans les activités de la **SONATRACH**. Il faut savoir que dans ce domaine, le décideur doit faire face à un degré d'incertitude important sous un risque d'envergure considérable. C'est pourquoi, la **SONATRACH** doit se munir d'outils d'aide à la décision rationnels et efficaces conformes à ses objectifs de gains et son désir de sécurité.

C'est dans cette perspective que s'inscrit la présente étude, dont l'objet est de doter la **SONATRACH** d'un outil d'aide à la décision permettant de fournir une programmation optimale d'exploration.

Notre étude s'articule autour de 5 chapitres : le premier chapitre introduit le contexte du problème, nous y décrivons quelques notions fondamentales dans la recherche pétrolière nécessaires à la compréhension de l'étude puis nous terminerons par y exposer le problème de base ainsi que les fins de notre étude.

Le chapitre II est consacré aux méthodes de l'exploration pétrolière. Nous mettons en évidence l'importance des résultats obtenus par ces méthodes pour la compréhension du système à étudier et pour la programmation des implantations de forages. Après avoir montré la complexité du système en mettant en relief les divers paramètres intervenant

dans son évolution, nous exposons succinctement, dans le chapitre III, quelques travaux relatifs à des problèmes s'inscrivant dans le même cadre que la présente étude.

Le chapitre IV est consacré à une modélisation du problème ainsi qu'à la présentation de quelques approches de résolution en analysant leur applicabilité. Nous y développons par ailleurs un algorithme de résolution et un test de validation.

L'implémentation et l'application à un cas **SONATRACH** feront l'objet du chapitre V.

Enfin, une conclusion et quelques suggestions viendront terminer le présent travail.

"Le passé est un prologue"

Shakespeare

CHAPITRE I

PRÉSENTATION DE LA PROBLÉMATIQUE

PRESENTATION DE LA PROBLEMATIQUE

I. NOTIONS FONDAMENTALES DE RECHERCHE PETROLIÈRE

[CHA, 61], [NGU, 93], [SON, 88]

Pour bien saisir l'essence de la problématique il est indispensable de prendre connaissance des phénomènes liés à la genèse des hydrocarbures.

Un bref exposé de la complexité et de la multitude des phénomènes, souvent mal compris, intervenant dans la formation des hydrocarbures permettra de prendre conscience de la difficulté de la recherche des hydrocarbures.

Par ailleurs, on ne peut éviter la présentation de la terminologie en vigueur dans la classification des réserves d'hydrocarbures, la nécessité de la normalisation des termes employés n'étant plus à démontrer.

Enfin, un léger aperçu des différentes étapes de la vie d'une région pétrolifère sera donné.

I.1. NATURE DU PÉTROLE ET DU GAZ

Le pétrole, comme le gaz naturel, est un mélange de substances appelées hydrocarbures. Ces hydrocarbures sont composés, selon leur définition même, d'atomes d'hydrogène et d'atomes de carbone. Chacun d'eux est constitué d'un nombre différent d'atomes de carbone et d'atomes d'hydrogène, donc de molécules de taille et de structure différentes. Ceci détermine leur état physique : à savoir état solide, liquide, ou gazeux.

Les hydrocarbures formés de molécules très lourdes sont solides. Ceux dont les molécules sont plus légères sont liquides. Enfin, ceux dont les molécules sont très légères sont gazeux.

Le pétrole brut est un mélange de ces divers types d'hydrocarbures. Le gaz naturel, par contre, ne contient que des hydrocarbures très légers.

I.2. ORIGINE DES HYDROCARBURES

Dès la découverte des premiers gisements pétroliers, vers le milieu du 19^{ème} siècle, l'origine du pétrole et la formation de ses gisements* étaient devenues l'une des plus grandes préoccupations des sciences naturelles modernes.

Outre son aspect purement théorique, le problème présente un grand intérêt pratique, permettant d'agir en connaissance de cause dans la recherche de nouveaux gisements de pétrole et dans l'estimation de ses réserves¹ commerciales. Ce problème est, pour l'essentiel, résolu à l'heure actuelle.

Différentes théories sur l'origine minérale* du pétrole avaient été avancées. Les hypothèses retenues se sont avérées en contradiction avec les données géologiques et géophysiques. La théorie de l'origine minérale, qui fut acceptée au début du 20^{ème} siècle par la majorité des chimistes, et une partie des géologues, ne présente plus à l'heure actuelle qu'un intérêt historique.

Il existe aujourd'hui une théorie scientifique argumentée sur l'origine organique* du pétrole, qui permet d'énoncer que les hydrocarbures naturels tirent leur origine des matières organiques, à savoir, les graisses présentes dans les organismes végétaux et animaux, et les protéines.

I.3. FORMATION DES GISEMENTS DE PÉTROLE ET DE GAZ

La structure chimique des hydrocarbures s'explique alors : ils proviennent de corps organiques riches en carbone et en hydrogène, et contenant de l'oxygène.

Ces corps organiques en question (animaux, végétaux) vivaient il y a des millions d'années dans les fonds marins, ou bien y avaient été entraînés par les érosions. Les sédiments* qui se sont formés au cours du temps les y ont enfouis. C'est ainsi, qu'à l'abri de l'air, donc en milieu réducteur, ils ont subi un phénomène de fermentation, au cours duquel l'oxygène qu'ils contenaient était consommé par des bactéries. Ceci a eu pour résultat la naissance des hydrocarbures qui sont donc le produit d'une réduction* chimique.

Du fait de leurs propriétés physiques (liquides ou gazeux), le pétrole et le gaz se déplacent; on dit qu'ils migrent*.

¹ Cf. Chapitre I: Éléments de recherche pétrolière, Section I.4. Classification des réserves d'hydrocarbures.

En effet, ils quittent le milieu où ils se sont formés, appelé roche-mère*, sous l'effet, soit de la pression des couches de sédiments qui les recouvrent, soit de la poussée d'Archimède lorsqu'ils rencontrent un milieu aqueux. Leur migration se poursuit jusqu'à ce qu'ils soient arrêtés par une couche de terrain imperméable : la roche-réservoir* (argile ou sel), on dit alors qu'ils sont piégés*.

Pour qu'un gisement d'hydrocarbures se constitue, il faut que soient réunies les conditions favorables à :

- leur genèse (roche mère);
- leur protection contre l'oxydation;
- leur migration;
- leur accumulation (piège).

Les gisements de pétrole et de gaz sont l'aboutissement de longs et multiples phénomènes sédimentaires, structuraux, hydrogéologiques, ... qui s'ordonnent suivant les caractéristiques propres des bassins* sédimentaires. Au point de vue géologique, un bassin est un état temporaire, susceptible de discontinuités dans son extension, à différentes époques.

Le chercheur devra pouvoir se baser sur de nombreuses données géologiques et trouver la réponse à des questions telles que celles-ci :

- De quel type de bassin sédimentaire s'agit-il ?
- Où, dans ce bassin, se trouvent des roches réservoirs ?
- Quelle est la relation entre une couche réservoir considérée et les éventuelles roches-mères de la même formation ou celles immédiatement sous-jacentes ou sus-jacentes ?
- Telle couche a-t-elle subi l'érosion ou s'est-elle déposée sur une surface d'érosion ?
- Quelles sont les zones charnières dans le bassin étudié ?
- Quelle est la structure actuelle ?
- Dans quelle formation géologique a-t-on découvert des hydrocarbures dans ce bassin ?
- Quel est le rapport entre leur présence et les facteurs précités ?

Chaque région géologique est un cas particulier. On conçoit donc aisément la difficulté de modélisation d'un tel système.

I.4. CLASSIFICATION DES RÉSERVES D'HYDROCARBURES

Afin d'éviter toute confusion entre les différents termes employés dans le domaine de l'exploration pétrolière, il a été nécessaire d'élaborer une classification internationale et uniforme.

Il existe plusieurs systèmes internationaux de classification des réserves :

- American Petroleum Institute (A.P.I)
- Society of Petroleum Engineer (S.P.E)
- United States of Geological Survey (U.S.G.S)

Ils reposent essentiellement sur deux principes fondamentaux : le degré de connaissance géologique des réserves et l'intérêt économique de la production.

En Algérie, pour l'estimation et la classification des réserves d'hydrocarbures, il est institué une nomenclature nationale décrite dans le Journal Officiel de la République Algérienne du 26 octobre 1988 (Arrêté du 11 juillet 1988 relatif à l'inventaire périodique des réserves nationales d'hydrocarbures liquides et gazeux, articles 4 à 8).

La SONATRACH est tenue de procéder à un inventaire annuel des réserves en se conformant à la classification nationale présentée ci-dessous. Notons que celle-ci est inspirée du système U.S.G.S.

I.4.1. Réserves en place

Ce sont les volumes estimés à une date donnée, de pétrole brut, de condensats, de gaz naturel, de gaz de pétrole liquéfié (GPL) et de substances associées, de qualité commerciale, susceptibles d'être contenus dans les gisements d'hydrocarbures.

Ces volumes doivent être exprimés dans les conditions standards usuelles de quinze degrés centigrades et d'un bar de pression.

On entend par gaz naturel, le gaz libre contenu dans les gisements de gaz, les gisements de gaz cap*, et le gaz associé au pétrole brut.

On entend par gaz de pétrole liquéfié (GPL), les gaz qui sont issus du traitement des gaz libres et des gaz associés à l'exception des GPL extraits du raffinage du pétrole brut ou de la liquéfaction du gaz naturel en vue de son exportation.

Les réserves en place sont classées en :

A. Réserves prouvées:

Ce sont les réserves mises en évidence avec une certitude raisonnable, au moyen de forages productifs et à l'aide de données géologiques et d'études de réservoir.

Les réserves prouvées se subdivisent elles-mêmes en :

Réserves récupérables:

Ce sont les réserves prouvées susceptibles d'être extraites commercialement des réservoirs d'hydrocarbures, à partir d'une date donnée, dans les conditions économiques existantes, par l'utilisation de méthodes d'exploitation éprouvées et dans le respect de la législation en vigueur. Dans cette catégorie on distingue :

a) Les réserves développées:

Ce sont celles qui sont récupérables au moyen de puits et d'installations existants ou en cours de réalisation, ainsi que par les moyens et méthodes mis en œuvre en matière de récupération assistée.

b) Les réserves non développées:

Ce sont celles qui sont récupérables au moyen de forages complémentaires, de récompléments de puits existants sur de nouveaux horizons ou de futures installations de récupération améliorée.

Réserves non récupérables:

Ce sont celles dont l'exploitation est jugée non rentable dans les conditions économiques existantes.

B. Réserves probables:

Les réserves probables sont connues avec une moindre certitude que les réserves prouvées. Elles sont décelées sur la base de données géologiques et techniques favorables,

l'absence de tests directs ne permettant pas toutefois leur classification comme réserves prouvées.

C. Réserves possibles:

Ce sont celles estimées à partir de résultats de travaux de prospection dans les zones favorables à la présence d'hydrocarbures, ou à partir d'extrapolations de réserves probables sur la base de données structurales ou géophysiques.

I.5. LES DIFFÉRENTES ÉTAPES DE LA VIE D'UNE RÉGION PÉTROLIFÈRE

La vie d'une région pétrolifère peut être caractérisée principalement par deux étapes (qui peuvent coexister) : l'exploration et l'exploitation.

I.5.1. L'EXPLORATION

L'exploration est un travail de recherche extrêmement important dont le but est la découverte de gisements d'hydrocarbures. Cette partie concerne directement notre problème. Elle sera développée dans un chapitre consacré.

I.5.2. L'EXPLOITATION

L'exploitation représente l'ensemble des opérations permettant d'extraire la plus grande partie possible des réserves, de collecter les produits et de les rendre aptes à la livraison aux clients, de les stocker s'il y a lieu, et de les expédier.

L'exploitation comporte deux phases de durée très inégale :

1. La première phase est la mise en exploitation, elle comporte le forage des puits, leur mise en production, leur équipement et les essais correspondants, et simultanément la création de toutes les installations nécessaires à l'exploitation : réseaux de canalisations, traitements de la production, stockage, expédition, moyens d'entretien, etc.. Cette première phase peut durer de 2 à 6 ans suivant l'importance du gisement et sa situation géographique.
2. La deuxième phase est celle de l'exploitation proprement dite qui peut durer 20, 30 à 40 ans, éventuellement plus suivant qu'il s'agisse d'un gisement de pétrole ou de gaz

naturel, en fonction des caractéristiques du gisement, de l'état des techniques d'exploitation, des conditions économiques,...

Au cours de cette période, des interventions dans les puits sont nécessaires : mesures périodiques au fond des puits, remplacement ou modification de l'équipement intérieur des puits,...

II. PRÉSENTATION GÉNÉRALE ET CONTEXTE DU PROBLÈME

Parmi les sources d'énergie les plus utilisées aujourd'hui on citera : le pétrole brut, le gaz naturel, le charbon, l'hydroélectricité et le nucléaire. Néanmoins, les hydrocarbures représentent 75% du bilan énergétique mondial .

Le secteur des hydrocarbures réalise dans notre pays plus de 40% du PNB, 96% des exportations et contribue à près de 50% des recettes définitives de l'État [ROC, 96]. On comprend donc son rôle stratégique dans l'économie nationale.

Avec un volume de réserves initiales en place de 16 milliards de mètres cubes équivalent-pétrole découvert depuis 1948, l'Algérie occupe le troisième rang parmi les pays producteurs de pétrole en Afrique, et le douzième rang dans le monde [ATT, 95].

Une grande partie des réserves récupérables a déjà été produite surtout pour le pétrole comme indiqué sur la Figure I-1:

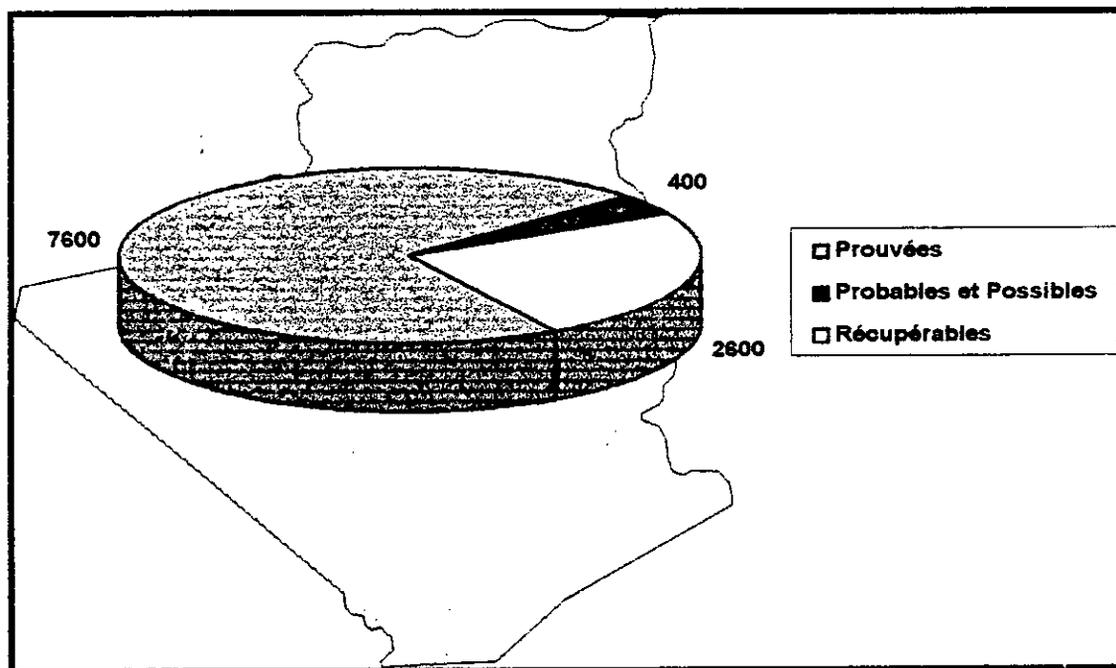


Figure I-1: Réerves initiales de pétrole en Algérie. (en millions de m³)

Source: [ATT, 95].

Les ressources ultimes générées, ayant migré, puis piégées dans les différents bassins sédimentaires, tout au long de leur histoire géologique, sont loin d'avoir été toutes explorées et encore moins découvertes.

Il faut signaler que les découvertes les plus aisées ont déjà été réalisées. La consommation moyenne annuelle des réserves est de 110 millions de tonnes équivalent pétrole (t.e.p). La plus grande partie de la production d'hydrocarbures provient de deux bassins, à savoir le bassin Triassique et le bassin d'Illizi. Avec un taux de remplacement* des réserves excessivement faible, de l'ordre de 20%, la découverte de nouveaux gisements dans les zones peu ou pas explorées devient cruciale.

C'est pourquoi la SONATRACH intensifie l'effort d'exploration et compte l'élargir vers des zones à potentiels nouveaux. En effet, l'effort de recherche a connu une nette impulsion suite à la loi² sur les hydrocarbures promulguée en 1986 et aux amendements votés en 1991.

Le développement de l'activité d'exploration est aujourd'hui une réalité, puisque plus de 50% du domaine minier fait actuellement l'objet de travaux. Les partenaires étrangers³ sont, à eux seuls, sur près de 50% du domaine minier.

Les bassins sédimentaires algériens couvrent plus de 1,5 millions de km² avec une épaisseur dépassant 3000 mètres dans la plupart des cas. La présence de roches mères épaisses, riches en matière organique, les conditions de génération des hydrocarbures et les multiples réservoirs et couvertures font que le potentiel en hydrocarbures de l'Algérie est très important et ce aussi bien en gaz qu'en huile.

Alors que dans le monde la densité moyenne d'exploration est de 95 puits par 10.000 km² (voir figure I-2), l'Algérie reste insuffisamment et inégalement explorée avec une densité moyenne d'exploration de 7 puits par 10.000km² (allant de moins d'un puits à Tindouf à 29 puits à Illizi), le tableau I-1 indique les densités de forage de chaque bassin [SAD, 95].

² La loi 86-14 sur les hydrocarbures du 19 août 1986 offre un cadre souple et moderne en mesure de relancer l'exploration et l'exploitation rationnelle des gisements d'hydrocarbures. Pour plus d'informations, se conférer à l'Annexe V : Aperçu sur la dernière loi sur la recherche pétrolière en Algérie.

³ Depuis 1988, près de 35 contrats de recherche et de prospection ont été passés avec plus de 20 sociétés étrangères [SON, 93].

La plupart des puits ont été forés avant le milieu des années 70 avec des concepts et des technologies aujourd'hui dépassés.

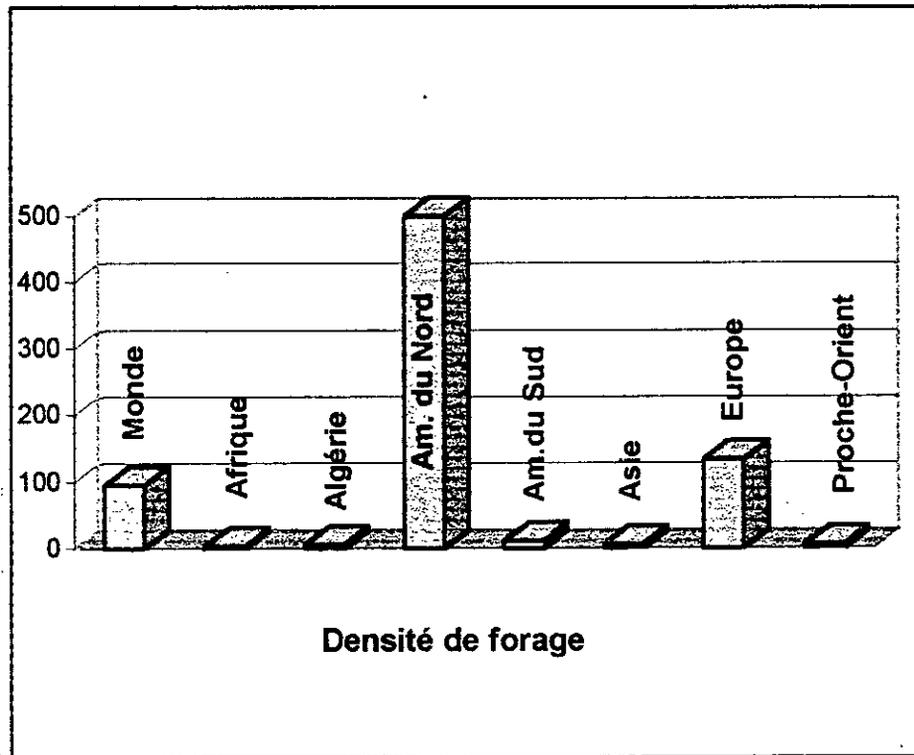


Figure I-2 : Densité moyenne de forage dans le monde

(en nombre de puits par 10.000 km²)

Source: [SAD, 95]

Un nouvel effort adapté, basé surtout sur l'introduction de nouveaux concepts, de nouvelles technologies, et le principe de **forer mieux** et non pas plus, est en mesure d'accroître de façon très sensible les découvertes en hydrocarbures aussi bien dans les régions déjà explorées ou développées que dans celles encore sous explorées.

Bassins	Densité de forage
Triassique	9
Ilizi	23
Grand erg oriental Ghadamès	10
Ahnat Moydir	4
Grand erg occidental Timimoun	5
Reggane	2
Bechar	2
Tindouf	< 1
Nord Algérie	5

**Tableau I-1: Densité de forage des différents bassins algériens
(en puits par dizaine de milliers de km²)**

Source: [ATT, 95]

Si nous considérons maintenant certaines études relatives au potentiel ultime en hydrocarbures du sous-sol algérien, nous constatons que les chiffres avancés dans tous les cas (évaluations géochimiques ou statistiques) sont de plusieurs dizaines de milliards de mètres cubes aussi bien pour l'huile que pour le gaz [ATT, 95]. Les questions qui se posent sont alors:

- Où peut-on trouver ce pétrole et ce gaz ?
- Avec quel degré de difficulté ?
- En grandes ou en petites accumulations ?

III. OBJET DE L'ÉTUDE

Parmi les objectifs retenus par la SONATRACH, on s'intéressera à l'affectation des ressources destinées aux forages d'exploration.

Pour que la SONATRACH réussisse, pour qu'elle soit viable comme société de recherche pétrolière, une condition essentielle est l'élaboration ininterrompue de projets d'exploration pouvant donner lieu à l'implantation efficace de forages.

Quand on sait qu'elle consacre un budget annuel de 150 à 200 millions de \$ pour l'exploration, et que chaque forage revient en moyenne à 8 millions de \$, on comprend aisément que la SONATRACH doive obligatoirement programmer ses efforts d'exploration en utilisant avec un maximum d'efficacité les informations obtenues par les études géologiques et géophysiques.

L'enjeu hautement stratégique auquel doit faire face le décideur est de savoir, compte tenu des différentes contraintes, des risques et de l'information disponible, où forer et combien forer.

Dans cette optique, et à la demande de la SONATRACH, nous nous proposons d'élaborer un outil qui l'aidera à prendre la décision la plus judicieuse pour atteindre les objectifs fixés.

L'outil proposé est un logiciel permettant de fournir, dans un premier temps, une allocation optimale des efforts d'exploration par région géologique, puis dans un second temps, de déterminer, pour chaque région, la séquence de sites de forage qui maximisera l'espérance des découvertes, compte tenu des contraintes budgétaires, stratégiques, techniques et temporelles.

"Devine si tu peux et choisis si tu l'oses"

Corneille

CHAPITRE II

L'EXPLORATION PÉTROLIÈRE

L'EXPLORATION PETROLIERE

INTRODUCTION [SON, 88], [NGU, 93]

L'exploration pétrolière est la clé de la découverte d'accumulations d'hydrocarbures, liquides ou gazeux, dont l'exploitation est intéressante du point de vue économique.

Un profil sismique*, un sondage* ne sont pas seulement les instrument d'un succès éventuel, mais sont d'abord une source d'informations sur les zones profondes et cachées des bassins sédimentaires et des mécanismes géologiques à l'origine de la formation des accumulations d'hydrocarbures.

D'étroites relations lient les résultats de l'exploration, et portent sa conduite à la connaissance des caractéristiques géologiques. Ces dernières seront progressivement dévoilées au fur et à mesure de l'exécution des profils géophysiques et des sondages.

La connaissance géologique permet ainsi de diminuer les risques de la prospection, mais, celle-là, progressant plus ou moins au rythme des découvertes - et réciproquement - le nombre et la taille des gisements restant à découvrir tendent inéluctablement à décroître au fur et à mesure du progrès d'exploration. La diminution du risque va de pair avec l'amenuisement des objectifs.

I. MÉTHODES DE PROSPECTION

La prospection concerne tous les travaux d'approche directe ou indirecte qui permettent de soupçonner ou non l'existence d'accumulation d'hydrocarbures.

I.1. MÉTHODES DIRECTES

I.1.1. Méthode des indices

Elle consiste à déceler la présence souterraine de gisements d'hydrocarbures à partir d'indices superficiels d'huile ou de gaz .

I.1.2. Étude microchimique et microbactériologique

Les quantités de gaz et le nombre de bactéries sont théoriquement liés à la présence de gisements souterrains.

Toutefois, si ces méthodes ont conduit à quelques découvertes, elles demeurent d'emploi limité et leur utilisation est le plus souvent sujette à caution.

I.2. MÉTHODES INDIRECTES

I.2.1. La géologie de surface

Elle consiste à observer et à rechercher tout signe indiquant la présence de terrains sédimentaires en utilisant diverses techniques : étude des roches à l'affleurement, examen d'échantillons en laboratoire, datation, photogéologie, sondages ou excavations de faible profondeur.

I.2.2. La géologie de subsurface

L'objet principal est le contrôle des sondages, l'observation et l'analyse des échantillons extraits du puits, la mesure de différents paramètres (vitesse d'avancement du forage, caractéristiques physiques et chimiques des boues, etc.).

L'analyse des résultats de toutes ces opérations permet de reconstituer une image aussi précise que possible du bassin en cours d'exploration.

I.2.3. La géophysique

Elle utilise différentes méthodes de prospection⁴ :

a. La prospection gravimétrique

Cette méthode a pour objet de déterminer, à partir de la surface du sol, les différences de densité des assises du sous-sol par la mesure des variations locales du champ de la pesanteur.

b. La prospection magnétométrique

Elle utilise, pour la reconnaissance des formations du sous-sol, les variations du champ magnétique terrestre.

c. La prospection sismique

Elle consiste à provoquer, à la surface du sol, une série d'explosions dont les ondes de choc sont réfléchies par les différentes couches géologiques du sous-sol. L'enregistrement de ces ondes par des appareillages spéciaux permet de reconstituer d'une manière précise les formes structurales du sous-sol. L'étude de ces enregistrements par les géologues et les géophysiciens permet de localiser la présence de structures pouvant être des " pièges ".

Ces différentes méthodes doivent être mises en œuvre de la façon la plus efficace et au moindre coût. Cependant, elles ne sauraient jamais supprimer un risque d'échec qui est partie intégrante de l'exploration. L'objectif est de parvenir au plus faible risque compatible avec l'objectif recherché et, en général, le risque est d'autant plus grand que la cible est plus prometteuse. Mais, même si la chance est partie intégrante, en aucun cas l'exploration ne doit être assimilée à un jeu de hasard.

⁴ Pour un complément d'information, se référer à l'annexe VI : Les techniques géophysiques et géologiques.

II. LE FORAGE

Les forages sont l'aboutissement de la prospection pétrolière. Ils permettent donc de confirmer la présence ou l'absence de gisements.

Les forages constituent, au même titre que les études géologiques et géophysiques, un moyen permettant d'atteindre certains buts qui diffèrent suivant les problèmes posés et suivant le stade des recherches.

Dans les cas de sondages géologiques il s'agit de reconnaître un ou plusieurs horizons-repères permettant de déterminer la structure du sous-sol et de préciser les données fournies par la géologie de surface et la géophysique.

Pour les forages d'exploitation, leur but est d'atteindre la ou les couches productives et d'en obtenir, au moindre prix, les débits les meilleurs.

Les sondages d'exploration enfin, qui sont les plus intéressants et les plus difficiles à exécuter, doivent permettre d'étudier les assises traversées et de reconnaître, dans les horizons-réservoirs rencontrés, la nature et la pression des fluides.

Un puits de pétrole ou de gaz est donc un trou foré dans le sous-sol afin de donner accès à un gisement d'hydrocarbures.

Les rôles essentiels d'un puits sont donc:

- permettre l'accès au gisement souterrain,
- assurer la liaison entre les formations productrices et le puits,
- permettre de remonter l'effluent hydrocarbure en toute sécurité et efficacement vers la surface,
- être équipé dans sa partie supérieure, en surface, d'équipements permettant le contrôle de la production et la maintenance du puits.

II.1. DONNÉES NÉCESSAIRES A L'ÉLABORATION D'UN PUIITS

Insistons sur le fait qu'il n'existe pas de moyens ou de techniques permettant, à partir de la surface, de déceler avec certitude la présence d'hydrocarbures dans le sous-sol. Des forages pétroliers sont effectués afin de confirmer cette présence possible, et la nature des hydrocarbures éventuellement contenus dans la roche réservoir.

La profondeur d'un forage pétrolier peut varier de quelques centaines de mètres à 12000 mètres mais, en moyenne, elle est de 2 000 mètres. Un puits est considéré comme profond au-delà de 3 500 mètres, et super profond au-delà de 4500 mètres.

C'est donc un ouvrage coûteux. Comme tout investissement industriel, il doit être étudié et planifié avant de procéder à sa réalisation.

Il faudra définir dans ce cadre :

- l'emplacement du forage, sa localisation (coordonnées, altitude ou profondeur d'eau),
- le ou les objectifs du forage (nature, importance relative, profondeur estimée).

Les données de base exploitées :

- les contraintes et échéances à respecter,
- les données géologiques et géophysiques,
- les renseignements sur les puits voisins s'il y a lieu.

II.2. DÉPENSES DE FORAGE

Le forage joue un rôle capital dans l'exploration pétrolière. Ce rôle est d'autant plus important que le forage représente, dans toute prospection l'opération la plus onéreuse.

En effet, les dépenses de forage constituent l'essentiel des dépenses de recherche et production de pétrole : 80% du prix de revient technique de la tonne produite.

Le coût des forages varie suivant un grand nombre de facteurs dont les principaux sont, la profondeur, la nature des assises traversées et les difficultés de transport et d'installation des ateliers de sondages. Leur prix dépend également du type des forages exécutés : "forage d'exploration" traversant des terrains inconnus ou mal connus à priori, au cours

desquels diverses opérations accessoires doivent être effectuées (diagraphies*, prises de carottes*, etc.) ou "forages d'exploitation" et d'extension réalisés dans des terrains connus à l'avance et ne comportant que peu ou pas d'opérations accessoires.

On ramène généralement le coût du forage au coût du mètre foré. Il faut cependant bien remarquer que ce coût augmente de manière quadratique avec la profondeur jusqu'à 3000 m environ, et que pour le forage profond les dépenses augmentent encore plus vite.

Le prix de revient d'un forage peut s'exprimer de deux façons. L'une, fonction de la durée de l'opération, est le prix par jour ou prix entrepreneur; l'autre est le prix total ramené au mètre foré ou prix exploitant. Cette distinction n'est pas purement formelle car les grandes compagnies pétrolières possèdent en propre de moins en moins d'appareils de forage, et trouvent plus rentable de louer les services d'entrepreneurs spécialisés.

Un forage est donc une opération économiquement très complexe, avec de nombreux paramètres et des catégories de dépenses très diverses. La complexité des installations⁵ de forage ainsi que les coûts importants engendrés rendent le choix des lieux d'implantation très délicat.

⁵ Pour les méthodes et appareillages de forage se référer à : « Le forage », Nguyen , 1993 IFP.

"Savoir pour savoir, mais encore plus

savoir pour pouvoir"

Teilhard de Chardin

CHAPITRE III

COMPLEXITÉ DU PROBLÈME ET DIVERSITÉ DES APPROCHES DE RÉOLUTION

COMPLEXITE DU PROBLEME ET DIVERSITE DES APPROCHES DE RESOLUTION

I. NATURE DU SYSTEME

Que ce soit dans la vie de tous les jours, la vie professionnelle ou dans une activité scientifique, il existe toujours une situation d'incertitude.

Chaque fois que l'on doit prendre *une décision* dans une situation *d'incertitude*, il faut accepter *un risque* inhérent.

L'importance et l'impact de ces notions de risque et d'incertitude sur la prise de décision ont amené de nombreux chercheurs à s'y pencher sérieusement, et c'est ainsi qu'un grand nombre de travaux ont été publiés.

Le domaine de l'exploration pétrolière n'échappe pas à cette réalité, le risque et l'incertitude associés à la prise de décision décroissent au fur et à mesure que les travaux d'exploration progressent. Malheureusement, les décisions les plus importantes doivent être prises très tôt, lorsque risque et incertitudes sont les plus élevés.

Tout en fournissant des résultats conformes aux exigences du décideur, l'approche utilisée pour décrire le système devra exploiter au mieux les informations disponibles.

Notre système est composé de structures géologiques supposées renfermer des dépôts d'hydrocarbures. Le travail des experts consiste à reconstituer ces structures à partir d'une série d'études et d'analyses des informations collectées sur le terrain. Citons notamment: les études sismiques, les enregistrements pétrophysiques, les interprétations géologiques, les essais de puits (well-testing), les mesures effectuées en laboratoire, l'étude de faciès par l'élaboration des cartes isopaques*, des cartes de faciès* et des cartes de manifestations* de pétrole, et les calculs de reservoir-engineering*.

Quelles que soient leur intelligence, la qualité de leurs observations, la précision de leurs mesures et la valeur de leurs interprétations, les géologues et les géophysiciens ne peuvent apporter, en conclusion de leurs travaux, que des probabilités (au sens commun) sur l'existence de pièges susceptibles de contenir des hydrocarbures.

L'aptitude de ces experts, largement tributaire de la quantité et de la qualité des informations disponibles, à décrire le système conditionnera le choix de la méthode.

Les méthodes existantes peuvent être classées selon différents critères (type des informations utilisées, tailles des zones en étude, approche mathématique employée, etc.).

Nous pouvons en particulier classer ces méthodes selon deux grandes familles: méthodes déterministes et méthodes stochastiques.

Les méthodes déterministes sont suffisantes dans bien des cas, particulièrement lorsque l'on dispose de données fiables et en quantité importante.

Cependant, il peut être nécessaire de manipuler plus convenablement les informations par l'application de méthodes probabilistes. Ces méthodes ne sont pas seulement plus flexibles pour le traitement de l'incertitude mais elles constituent une meilleure base pour les décisions d'investissement.

En effet, les modèles probabilistes sont les plus représentatifs dans le cas où :

- soit le système est très complexe, impliquant des processus ou des situations qui ne sont pas entièrement compris;
- soit lorsque le comportement ou l'état du système total doit être décrit en terme d'incertitude associée aux différents éléments du système.

La théorie de la probabilité est dotée, avec abondance, de lois et de théorèmes permettant d'estimer de nombreux types de paramètres. Pourtant, une fois encore, il est souvent très difficile de tirer profit de ces avantages pour les problèmes de recherche pétrolière par manque de séries statistiques ou d'échantillons de taille suffisante

La simulation peut surmonter ce handicap. Elle permet de générer des données manquantes dues à une information incomplète.

Utilisée parallèlement, la construction de scénarios est également un moyen très efficace pour décrire un système aussi complexe. De surcroît, elle offre la possibilité de mettre en valeur l'expérience des experts (raisonner par analogie, fournir des probabilités subjectives, etc.).

Outre l'avantage de fournir de la complexité du système une vision multiforme simple, la méthode des scénarios peut se substituer à la méthode strictement analytique. En effet, lorsque de nombreuses expertises spécifiques sont requises pour un projet (c'est le cas : géologie, réservoir-engineering, testing, ...) la compétence globale de l'organisation est le résultat d'un processus d'agrégation des compétences individuelles.

Donnons à présent un exemple pour illustrer nos propos:

Si l'on tente d'étudier l'évolution des découvertes pétrolières, il faudrait les lier à tous les paramètres dont elles dépendent, à savoir : le volume des travaux de recherche, les concepts et technologies utilisés et l'environnement géopolitique.

Le cas de base devrait être un bassin sédimentaire simple, ayant fait l'objet d'une exploration continue avec introduction progressive de tout nouveau concept ou toute nouvelle technologie susceptible de permettre de déceler toute accumulation d'hydrocarbures existante. Dans ce cas, la distribution des découvertes en volume et dans le temps devrait être Normale (figure III-1, courbe 2), les découvertes étant faites surtout en milieu de la période de recherche.

Selon le degré de complexité du bassin rencontré, la distribution des découvertes va tendre vers une distribution statistique Lognormale. Dans ce cas, les découvertes les plus importantes se feraient en début ou en fin de période de recherche (figure III-1, courbes 1 et 3).

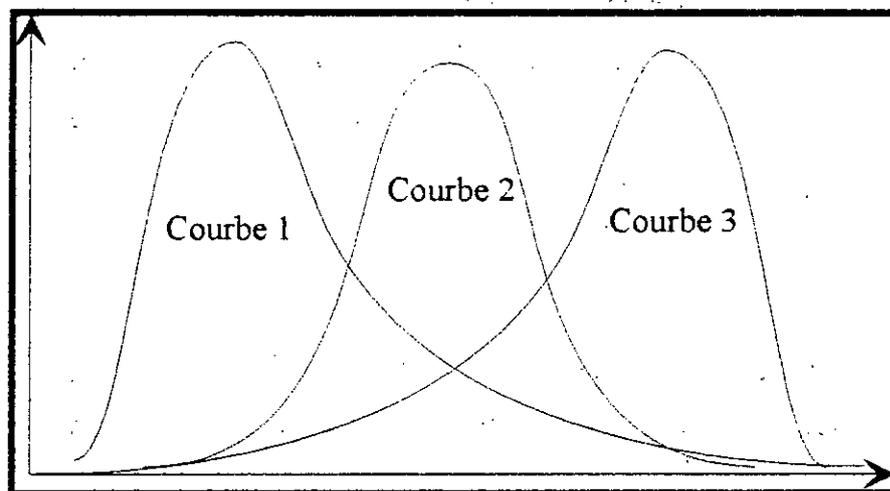


Figure III-1 : Distributions Normale et Lognormale des réserves

Lorsque la région pétrolière n'est pas homogène du point de vue géologique, ou n'a pas fait l'objet d'un effort de recherche continu avec des concepts et des techniques adaptés, l'application de ce modèle probabiliste va échouer.

Si cette approche est appropriée pour des régions géologiques comme celles que l'on trouve en Amérique du Nord où l'effort de recherche et d'exploration a toujours été intense et continu, cela est loin d'être le cas pour les régions où les travaux de recherche ont été très irréguliers comme c'est le cas dans certaines régions du sud-est algérien (qui reste le mieux exploré en Algérie).

Cet exemple illustre le fait que chaque région géologique est un cas particulier et que souvent les modèles proposés ne sont pas applicables à tous les systèmes.

La diversité des systèmes fait que différentes approches de résolution sont proposées. Certaines d'entre elles sont brièvement présentées dans la partie qui suit.

II. REVUE DE LITTÉRATURE

Dans le domaine de l'exploration pétrolière, il faut faire face à un degré d'incertitude important sous un risque d'envergure considérable. Ceci explique que de nombreux travaux y ont été consacrés. Dans ce qui suit, nous en présentons quelques uns

Marvin B. Smith [*SMI, 70*] s'est intéressé principalement au problème de l'incertitude et du risque liés aux investissements pétroliers.

Lorsque des investissements sont envisagés dans l'activité pétrolière, il est possible de définir quatre différentes phases dans les décisions d'exploration et de production: -phase de tendance - phase de prospects - phase de développement - phase de production. Ainsi, afin de mesurer le risque et l'incertitude, quatre modèles stochastiques sont proposés, un pour chacune des quatre phases.

Les modèles sont basés sur la méthode de simulation de Monté Carlo qui semble être la plus appropriée pour les problèmes impliquant le risque et l'incertitude. On suppose que toute variable aléatoire sera définie par une distribution triangulaire ou uniforme; ce choix est justifié par le fait que l'investigateur expérimenté peut mieux décrire son jugement à propos d'une variable aléatoire à travers les paramètres de ces distributions.

D. White et H.M. Gehman [*GEH, 79*] se sont également penchés sur le problème du risque et de l'incertitude dans le cadre de l'estimation des ressources de pétrole et de gaz.

L'estimation peut être faite et présentée sous un format probabiliste reflétant le risque et l'incertitude inhérents.

Une courbe de probabilités cumulées montre les chances d'occurrence des volumes possibles d'hydrocarbures, le risque qu'il y ait peu ou pas d'hydrocarbures, la moyenne et le potentiel " highside". La courbe peut être construite en multipliant plusieurs facteurs dont le produit est soit des barils de pétrole soit des m³ de gaz. Chaque facteur, généré par la méthode de simulation de Monté Carlo, est introduit sous forme de plage de valeurs dont la dispersion dépend de l'incertitude sur le facteur.

Selon les buts et les niveaux géologiques, différentes méthodes sont nécessaires. Les auteurs présentent huit différentes méthodes à savoir, la méthode par analogie géologique, la méthode Delphi, la méthode des rendements de surface, la méthode des rendements volumétriques, la balance des matières, l'analyse de la taille et du nombre des champs, l'extrapolation des taux de découvertes et la méthode de la modélisation des découvertes, ainsi que leurs limitations et leurs avantages.

Ces méthodes devraient permettre de répondre à deux questions fondamentales :

- Existe-t-il des champs conventionnels de pétrole et de gaz dans la région ?
- Combien ou en quel volume ?

D.J. Forman et A.L. Hinde [FOR, 85] se sont également intéressés à l'estimation des réserves d'hydrocarbures non découvertes.

Il existe une corrélation linéaire, statistiquement significative, entre le logarithme des tailles des champs de pétrole ou de gaz et leur ordre de découvertes. Cette corrélation repose sur deux hypothèses :

1. La probabilité de découverte de chaque champ est proportionnelle à sa taille élevée à une constante (λ).
2. Les champs sont découverts, sans remplacement, parmi une population de taille de distribution Lognormale.

Dans cette étude, les auteurs recherchent des relations empiriques entre des données spécifiques à une région australienne. Ils examinent la distribution des tailles des champs, leur ordre de découverte et le taux de succès de forage dans différentes zones.

L'étude indique qu'il existe, une relation linéaire entre le logarithme des tailles des champs et l'ordre de leur découverte, dans quelques régions d'Australie. Cette relation leur permet de faire une extrapolation sur les découvertes futures.

Les auteurs citent les travaux de Meisner and Demirman (The creaming method: a bayesian procedure to forecast future oil and gas discoveries in mature exploration provinces, 1981). Ces derniers affirment que la meilleure méthode d'estimation des ressources non découvertes dépend d'abord de la capacité de l'explorateur à trouver les

grands champs le plus tôt, durant l'exploration, et de la modélisation du taux de succès de cette exploration. Le modèle empirique est basé sur l'hypothèse (1).

P. Kolesar [KOL, 82] a proposé un modèle mathématique en $\{0, 1\}$ pour la répartition des ressources d'exploration. Il a pour but la détermination de la séquence des sites de forage et leur intensité (où forer et combien forer) qui maximise la probabilité des découvertes en se basant sur des probabilités objectives et subjectives estimées par des experts.

Le principe du modèle est le suivant :

Pour chaque zone géologique une grille de points (sites) potentiels favorables au forage est établie puis différents scénarios sont construits par les experts. Chaque scénario précise où et combien forer pour trouver les dépôts d'hydrocarbures.

La fonction objectif du modèle maximise le nombre de scénarios pour lesquels au moins une découverte est faite. Ce modèle sera développé dans notre étude.

Selon **J.D. Fuller [FUL, 91]** le processus d'exploration est vu comme un tirage sans remise dans une population de nappes de tailles différentes. Il suppose connus le nombre et les tailles des nappes. Les nappes sont regroupées en classe suivant leur taille, ainsi la probabilité qu'une nappe découverte appartienne à une classe donnée peut être déterminée.

Le modèle permet d'estimer la valeur moyenne et l'écart type du volume des découvertes pour un effort d'exploration donné (ou pour un nombre de forages donné).

Selon **P. Behrenbruch, G. J. Turner et A. R. Backhouse [BAC, 85]** l'estimation probabiliste des réserves utilisant une approche de Monte Carlo généralisée a plus d'avantages que les simples méthodes déterministes ou que les autres méthodes probabilistes. La méthode décrite traite entièrement les dépendances géologiques structurelles et offre en même temps un haut degré de précision.

Un avantage supplémentaire est l'élimination de certaines décisions arbitraires relatives au nombre très limité de situations possibles. Les sensibilités relatives à l'incertitude et aux erreurs sont aisément manipulées.

L'estimation des réserves peut être basée essentiellement sur l'évaluation volumétrique initiale ou, à une étape plus tardive dans le développement du champ sur l'analyse de la performance utilisant la simulation numérique, sur les méthodes de la balance des matières et sur l'analyse de la courbe du déclin de la production.

Li-Hua Li, H.C. CHEN and J.H. Fang [CHE, 92] ont développé un système expert flou, XPROS, qui s'appuie sur le paradigme de la prise de décision multicritères en univers incertain pour évaluer un prospect. XPROS utilise l'ensemble des informations disponibles, qu'on ne peut en général prendre en compte dans les méthodes conventionnelles, car elles sont souvent partielles et imprécises. XPROS exploite des implications floues pour calculer les niveaux de satisfaction associés aux diverses mesures des caractéristiques du prospect : roche mère, réservoir, piège, couverture.

"Tout est dit, tout reste à faire"

Shakespeare

CHAPITRE IV

MODÉLISATION DU PROBLÈME

MODÉLISATION ET APPROCHES DE RÉOLUTION

I. OBJECTIF

L'outil développé dans le cadre de notre étude fournit un programme optimal d'exploration sur une période de planification à moyen terme (de 3 à 5 années).

Le domaine minier en Algérie est découpé en districts.

L'allocation optimale des ressources se fait en deux étapes :

- Répartition des ressources inter-districts (entre les différents districts)
- Répartition des ressources intra-district (à l'intérieur de chaque district)

Choix du modèle

Après avoir passé en revue quelques approches de modélisation et de résolution appartenant à différentes classes, nous proposons une modélisation pour la répartition des ressources inter-districts (niveau 1) et nous retenons le modèle de Peter Kolesar pour la répartition des ressources intra-district (niveau 2).

Pour le niveau 1, nous avons opté pour un modèle de nature déterministe compte tenu de la disponibilité de données fiables et en quantité suffisante. Nous développons ce modèle dans la section suivante.

Pour le niveau 2, nous avons retenu le modèle de Peter Kolesar présenté dans le troisième chapitre à la section III : Revue de littérature.

Rappelons qu'en Algérie les travaux de recherche d'exploration ont été très irréguliers, influencés par les différentes stratégies à moyen et long terme. Les résultats obtenus par l'application de modèles purement probabilistes risquent donc d'être affectés. C'est pourquoi le modèle retenu nous paraît le plus approprié. Il permet de dépasser ce problème en exploitant au mieux l'aptitude des experts de la SONATRACH à construire des scénarios.

Répartition inter-districts

Le modèle développé, pour ce niveau d'affectation, détermine, durant une période de planification, un programme d'exploration dont le but est de fournir une allocation

optimale des ressources disponibles (où forer et combien forer) afin de maximiser *l'espérance* des découvertes totales.

Répartition intra-district

A ce niveau, le but du modèle développé est de déterminer pour la première année d'étude, la séquence des sites de forage et leur intensité (où forer et combien forer) qui maximisera *la probabilité* des découvertes. Une fois les travaux de la première année achevés, de nouvelles informations auront été produites. De nouveaux scénarios, plus proches de la réalité pourront être établis et utilisés pour l'année suivante.

II. MODÈLE DE RÉPARTITION INTER-DISTRICTS

II.1. DÉFINITION DU PROBLÈME

Nous devons fournir un programme de forage annuel pour chaque district (métrage à forer pour chaque district durant chaque année).

Nous sommes confrontés à trois types de contraintes : techniques, budgétaires et stratégiques.

- **Contraintes techniques :**

- Ne pas dépasser la capacité annuelle de forage de chaque district.
- Ne pas dépasser la capacité annuelle de forage de l'ensemble des districts.

- **Contraintes stratégiques :**

- Respecter le minimum annuel de métrage à forer par district.
- Respecter le niveau minimum d'investissement annuel.

- **Contraintes budgétaires :**

- Ne pas dépasser le budget total consacré à toute la période de planification.

Comme nous l'avons vu précédemment (Cf. chapitre II) le prix de revient d'un forage peut s'exprimer de deux façons. Au niveau de la SONATRACH, c'est le prix exploitant: prix total ramené au mètre foré qui est considéré.

Les coûts de revient unitaires du mètre foré (par district et par année) sont déterminés par un programme de préparation des données. Pour ce calcul, la SONATRACH utilise un logiciel qui prend en considération les rendements prévisionnels de l'outil de forage et les taux d'inflation passés et prévisionnels.

Les variables de décisions de notre problème seront les métrages à forer par district et par année.

II.2. CHOIX ET FORMULATION DU MODÈLE

Ce modèle est basé sur la relation qui existe entre les découvertes d'hydrocarbures cumulées et le métrage foré cumulé depuis le début de l'exploration. Cette relation peut être représentée par une courbe. Il est alors nécessaire de faire un choix adéquat d'une famille de courbes.

La forme des courbes doit intégrer les différents paramètres intervenant dans la relation entre les découvertes cumulées et le métrage foré cumulé. De toute évidence, les paramètres de l'équation représentative de la courbe seront d'une manière ou d'une autre liés aux facteurs entrant en jeu dans cette relation.

II.2.1. Choix d'une famille de courbes

Le modèle décrit par Jean Séguret dans la revue de l'Institut Français du Pétrole [Ség, 86], pour l'estimation des réserves ultimes d'un pays, propose une famille de courbes intéressante sous bien des aspects que nous présenterons par la suite.

L'équation paramétrique de ces courbes est la suivante :

$$y = \frac{L}{1 + \exp(a + bx)} - \frac{L}{1 + \exp(a)} \quad b < 0 \text{ et } x \geq 0$$

Où a , b et L sont des paramètres à estimer.

En économie, notamment en théorie de la production, ces courbes sont fréquemment utilisées dans des situations ayant quelques analogies avec notre problème. Elles s'appellent **courbes logistiques**.

Le modèle de J.Séguret, appliqué à de grands ensembles territoriaux (URSS, USA, etc.), donne des courbes de la forme:

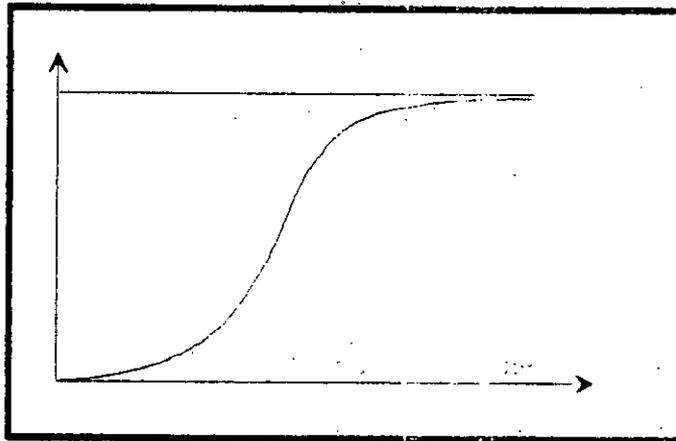


Figure IV-1: Courbe obtenue pour de grands ensembles territoriaux

La courbe possède les particularités suivantes :

1. La dérivée est croissante jusqu'au point d'inflexion, puis décroissante au delà.

Cette propriété est liée au fait que dans une région donnée, dans un premier temps, les découvertes annuelles ont une tendance moyenne à la croissance, puis arrivées à un certain niveau de découvertes cumulées, cette tendance s'inverse. Les nouvelles découvertes deviennent de plus en plus difficiles à mettre en évidence jusqu'à tendre asymptotiquement à devenir nulles.

2. Si x désigne le métrage foré cumulé et $f(x)$ les découvertes cumulées on a :

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{L}{1 + \exp(a + bx)} - \frac{L}{1 + \exp(a)} = L - \frac{L}{1 + \exp(a)}$$

L'expression $L - \frac{L}{1 + \exp(a)}$ représente les réserves ultimes découvrables, et qui sont déterminées à l'instant de planification. La valeur de cette expression limite donc les potentialités d'une région, et ceci est justifié par le fait que dans une région donnée les réserves en place connues et inconnues sont de toute évidence limitées.

II.2.2. Famille de courbes retenue

Les courbes logistiques donnent des résultats d'autant meilleurs que les régions à explorer sont vastes (agrégation importante des données).

Le niveau de difficulté de la prospection (complexité géologique, géophysique, de la surface) est un facteur qui n'influe pas de manière très significative sur la forme de la courbe dans l'application de J. Séguret.

Cependant, dans le cas d'une région géologique plus restreinte, ce facteur a un impact plus important sur la forme de la courbe.

Lorsque cette région est peu complexe⁶, le taux de découverte est important dès le début de l'exploration, et va décroître jusqu'à "l'épuisement" des réserves (Cf. Chapitre III, Figure III-1, courbe 2). La courbe se présente sous la forme suivante:

⁶ Voir l'exemple cité dans le chapitre III : Complexité du problème et diversités des approches.

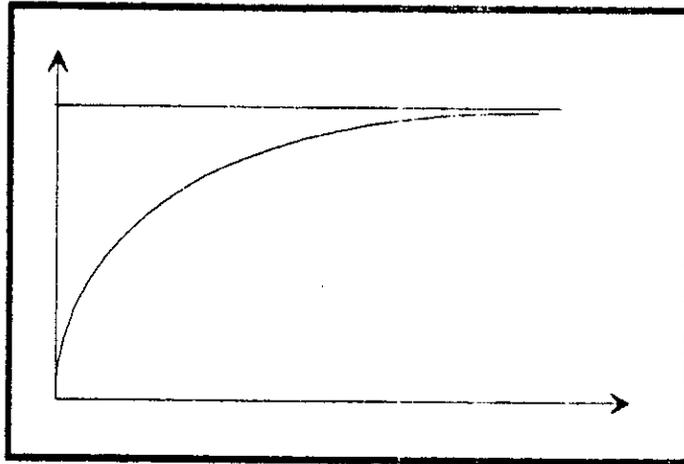


Figure IV-2: Courbe associée à une région peu complexe

Tandis que pour une région plus complexe, le taux de découvertes sera faible en début d'exploration. Il va croître durant la phase d'immaturité* jusqu'à stagner. La région devient mature* et le taux va alors décroître jusqu'à l'épuisement des réserves.

La forme de la courbe est:

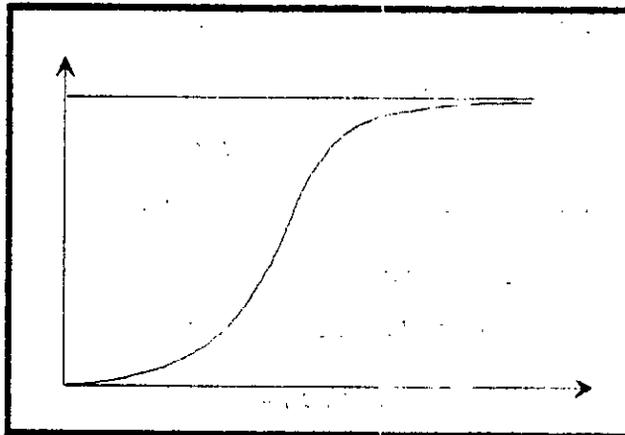


Figure IV-3 : courbe associée à une région complexe

II.3. ALGORITHMES DE RÉOLUTION

Après avoir défini les variables et les contraintes de notre système, formalisons notre problème.

Il s'agit de :

Maximiser les découvertes totales sur l'horizon de planification

sous les contraintes :

budgétaires

techniques

stratégiques

On entend par *découvertes* les découvertes que l'on espère obtenir en se basant sur les courbes logistiques prévisionnelles.

L'aspect du problème, un système qui évolue dans le temps contrôlé par des variables de décision (aspect dynamique), nous invite à utiliser la programmation dynamique.

II.3.1. Approche par la programmation dynamique

De manière générale, la programmation dynamique permet d'effectuer une optimisation globale dans un processus à choix séquentiels. Elle est fondée sur le principe d'optimalité de Bellman qui s'énonce ainsi : " une politique optimale est telle que, quels que soient l'état initial et la décision initiale, les décisions suivantes doivent constituer une politique optimale par rapport à l'état résultat de la première décision ". L'optimisation est alors mise en œuvre, étape après étape, sans qu'il y ait à considérer et calculer toutes les combinaisons décisionnelles possibles.

A. Formulation du programme dynamique

1. Définition des éléments du programme dynamique :

Etape n : représente l'année n , $n = 1, N$.

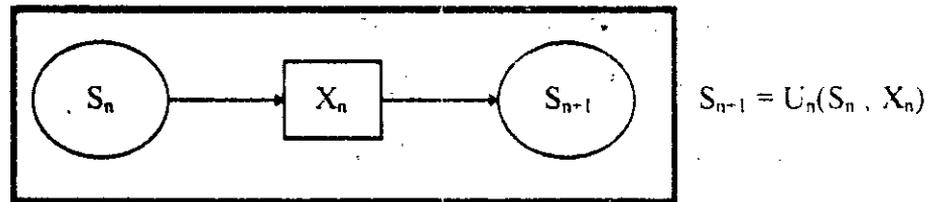
Etat S_n : représente le vecteur état du système contenant , au début de l'étape n, les niveaux de métrage cumulé par district. $S_n = (M_{n1}, \dots, M_{nk})$.

Vecteur décision X_n : représente le vecteur de décision de dimension K (égale au nombre de districts) et indiquant le métrage à forer durant l'étape n.

2. Relation entre les états du système et la variable de décision:

La connaissance du vecteur X_n nous permet de calculer la consommation en ressources d'une part et le métrage cumulé en fin de période d'autre part et donc de déterminer l'état suivant S_{n+1} .

La relation injective entre S_n et S_{n+1} peut être schématisé par:



3. Détermination des découvertes lorsque le système est dans l'état S_n et la décision X_n est prise:

La connaissance de S_n et X_n permet de calculer pour chaque district le métrage cumulé

Métrage cumulé en début de la période (n+1) =
 métrage cumulé au début de la période n + métrage réalisé durant la période n.

Les découvertes de l'année n peuvent être déduites à partir des courbes logistiques en considérant le métrage réalisé.

On définit :

$D_n(S_n, X_n)$ comme étant les découvertes de l'étape n quand le système est dans l'état S_n et que la décision X_n a été prise.

4. Détermination des équations de récurrence :

Posons :

- $CD_n(S_n, X_n)$: Réserves cumulées optimales que l'on peut encore découvrir à partir de la période n jusqu'à la fin de l'horizon de planification quand le système est dans l'état S_n et que la décision X_n a été prise.
- $CD_n^*(S_n)$: Réserves cumulées optimales que l'on peut encore découvrir quand le système est dans l'état S_n .

Par définition on a donc :

$$CD_n^*(S_n) = \text{Max } CD_n(S_n, X_n) \text{ avec } X_n \in A$$

où A représente l'ensemble des vecteurs des décisions admissibles.

Déterminons à présent une relation entre $CD_n^*(S_n)$ et $CD_{n+1}^*(S_{n+1})$.

$$CD_n(S_n, X_n) = D_n(S_n, X_n) + CD_{n+1}^*(S_{n+1})$$

avec

$$S_{n+1} = U_n(S_n, X_n)$$

on obtient

$$CD_n(S_n, X_n) = D_n(S_n, X_n) + CD_{n+1}^*(U_n(S_n, X_n))$$

L'algorithme est donc :

$$CD_n^*(S_n) = \text{Max } [D_n(S_n, X_n) + CD_{n+1}^*(U_n(S_n, X_n))]$$

$$X_n \in A$$

$$n = 1, 2, \dots, N-1 \quad N \text{ étant l'horizon de planification.}$$

Cette relation réursive arrière détermine une politique optimale pour chaque état au temps n sachant qu'une politique optimale au temps $n+1$ est disponible.

La mise en œuvre de cet algorithme consiste à réaliser les étapes suivantes :

1. Déterminer $CD_N^*(S_N)$ (N est l'indice de la dernière année de la période d'étude)
2. Pour $n = N-1, N-2, \dots, 2$ déterminer :

$$CD_n^*(S_n) = \text{Max} [D_n(S_n, X_n) + CD_{n+1}^*(U_n(S_n, X_n))]$$

$$X_n \in A$$

3. En fonction de l'état initial du système au temps $n = 1$, (première année de la période d'étude) déterminer X_1 et CD_1^* .
4. Reconstituer le vecteur (X_1, X_2, \dots, X_n) qui représente le métrage optimal à forer. Les réserves optimales espérées (en terme d'espérance mathématique) à mettre en évidence seront données par CD_1^* .

B. Résolution du programme dynamique

Explicitons la fonction U_n définie ci-dessus :

$$U_n = \begin{bmatrix} f_1(M_{n1} + x_{n1}) - f_1(M_{n1}) \\ \vdots \\ f_M(M_{nM} + x_{nM}) - f_M(M_{nM}) \end{bmatrix}$$

Chaque fonction f_j est de la forme:

$$f_j(x) = \frac{L_j}{1 + \exp(a_j + b_j x)} - \frac{L_j}{1 + \exp(a_j)} \quad j = 1, K.$$

Ces fonctions ne sont pas toutes concaves dans le domaine étudié.

A chaque étape n , il s'agit de déterminer le vecteur décision X_n qui maximisera la fonction objectif sachant que le système est dans l'état S_n .

Etant donné que X_n est un vecteur continu, le sous-problème à résoudre à l'étape n n'est autre qu'un système d'optimisation multidimensionnelle sous contraintes.

Les fonctions objectifs du système sont en général non concaves. Ceci nous ramène à la résolution de programmes non linéaires non tous convexes, ce qui va fortement hypothéquer nos chances de trouver un optimum global.

Cependant, la plus grande difficulté réside ailleurs: l'équation récursive, très difficile à expliciter, est quasi-impossible à résoudre analytiquement. L'équation comporte des fonctions non linéaires de forme complexe dépendant de l'état du système.

C. Discrétisation et discussion sur la complexité algorithmique

Nous venons de voir que la résolution du problème en considérant les vecteurs décisionnels continus et les fonctions objectifs non linéaires est impossible. Que donnerait alors la discrétisation et la linéarisation ?

La discrétisation des états du système implique que le vecteur décision va prendre des valeurs discrètes. Nous allons, dans ce qui va suivre, discuter de la complexité de la discrétisation en se plaçant dans le cas où la linéarisation a été préalablement établie.

Pour une année, pour chaque district, la décision prend une valeur qui varie entre le minimum et le maximum annuels à forer par un pas défini. Ce pas doit être suffisamment grand pour limiter le nombre d'états possibles, et suffisamment petit pour ne pas risquer de trop s'éloigner de la solution exacte.

Pour mieux fixer les idées, considérons un minimum annuel à forer de 10.000 m et un maximum de 40.000 m.

Le pas qui correspond le mieux à la réalité du terrain est 500 m (au niveau d'un puits, les propositions de forages sont généralement faites par pas de 500 m). Dans ce cas, pour la première année et pour chaque district, on aura 61 décisions possibles. Le vecteur décision va pouvoir prendre 61^4 ($13.84 \cdot 10^6$) états possibles.

Avec un pas de 3000 m, le vecteur décision va prendre 11^4 états possibles (approximativement 200.000 états). Cependant, la valeur de ce pas correspond à la profondeur moyenne d'un puits, une erreur aura de grandes conséquences (rappelons que le forage d'un puits de 3000 m coûte en moyenne 8 millions de \$).

Comme à chaque fois que l'on met en œuvre un algorithme basé sur la programmation dynamique, il faut se pencher sur la complexité algorithmique pour évaluer son efficacité et savoir si les moyens disponibles (puissance de traitement et capacité de stockage) permettent réellement son exécution.

Faisons le parallèle avec le problème du sac à dos multidimensionnel qui s'énonce

comme suit :

$$\text{Max } \sum_{i=1}^N v_i \cdot x_i$$

$$\sum_{i=1}^N w_{ij} \cdot x_i \leq w_j \quad j = 1, K$$

$$x_i \in \{0, 1\}$$

Dans notre cas la variable décision n'est pas un simple scalaire en $\{0, 1\}$. C'est un vecteur dont les composantes peuvent prendre des valeurs discrètes comprises entre le minimum et le maximum annuels à forer par pas régulier.

Lorsque l'on sait que le problème du sac à dos multidimensionnel, dont la complexité algorithmique est en $O\left(\prod_j (w_j)\right)$, devient impossible à traiter dès lors que le nombre de contraintes dépasse quelques unités [MIN, 83], on conçoit aisément que notre problème est de complexité astronomique.

L'avantage incontestable de la programmation dynamique est qu'elle fournit au problème une solution **optimale globale exacte**, lorsqu'elle est applicable, ce qui n'est malheureusement pas notre cas.

II.3.2. Approche par la programmation non linéaire

L'approche dynamique n'ayant pas abouti, nous pouvons cependant formuler notre problème sous forme de programme non linéaire (PNL).

Cette approche pourrait nous permettre d'obtenir la solution globale exacte recherchée.

A. Formulation du PNL

Variables du système:

Il s'agit de déterminer une allocation optimale des ressources. Comme nous l'avons expliqué précédemment toutes les variables sont ramenées à un métrage foré. Il s'agira donc de déterminer le métrage optimal à forer par année et par district.

- Soit : N le nombre d'années de la période de planification indicées par $i = 1$ à N
- Soit : K le nombre de districts à explorer indicés par $j = 1$ à K.

Inputs du modèle:

- CR_{ij} : Coût de revient unitaire du mètre foré de l'année i pour le district j .
- I : Niveau d'investissement pour la période de planification.
- Ia_i : Niveau minimum d'investissement de l'année i .
- F_i : Capacité de forage de l'année i pour l'ensemble des districts.
- LM_{ij} : Métrage minimum à forer durant l'année i pour le district j .
- LN_{ij} : Métrage maximum à forer durant l'année i pour le district j .
- Mc_j : Métrage foré cumulé en début de période d'étude pour le district j .
- N : Nombre d'années d'étude (horizon de planification).
- K : Nombre de districts.

Outputs du modèles :

- M_{ij} : Métrage optimal à forer durant l'année i pour le district j .
- D_{ij} : Découvertes optimales de l'année i pour le district j .

Définition de la fonction objectif :

Soit : D_{1j} la découverte pour le district j durant la première année.

$$D_{1j} = f_j (M_{1j} + Mc_j) - f_j (Mc_j)$$

avec :
$$f_j(x) = \frac{L_j}{1 + \exp(a_j + b_j x)} - \frac{L_j}{1 + \exp(a_j)} \quad b_j < 0 \quad j = 1, K$$

Soit D_{ij} la découverte pour le district j durant l'année i .

$$D_{ij} = f_j(M_{ij} + Mc_j + \sum_{k=1}^{i-1} M_{kj}) - f_j(Mc_j + \sum_{k=1}^{i-1} M_{kj}) \quad i = 2, N.$$

Les découvertes totales sont données par :

$$Z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K [f_j(M_{ij} + Mc_j + \sum_{k=1}^{i-1} M_{kj}) - f_j(Mc_j + \sum_{k=1}^{i-1} M_{kj})] + \sum_{j=1}^K [f_j(M_{1j} + Mc_j) - f_j(Mc_j)]$$

Formulation mathématique

La fonction objectif est :

$$\text{Max } Z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K [f_j(M_{ij} + Mc_j + \sum_{k=1}^{i-1} M_{kj}) - f_j(Mc_j + \sum_{k=1}^{i-1} M_{kj})] + \sum_{j=1}^K [f_j(M_{1j} + Mc_j) - f_j(Mc_j)]$$

sous les contraintes :

$$\sum_{j=1}^K M_{ij} \leq F_i \quad i = 1, N \quad (\text{limitation de la capacité de forage annuelle})$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K CR_{ij} * M_{ij} \leq I \quad (\text{limitation de l'investissement total})$$

$$\sum_{j=1}^K CR_{ij} * M_{ij} \geq I_{ai} \quad i = 1, N \quad (\text{investissement annuel minimum})$$

$$LM_{ij} \leq M_{ij} \leq LN_{ij} \quad i = 1, N \quad (\text{Métrage foré minimum et maximum par année})$$

$$j = 1, K$$

Le nombre de contraintes est : $2(N \cdot K + N) + 1$.

B. Résolution du PNL

Notre PNL est classé parmi les programmes mathématiques caractérisés par :

- Une fonction objectif non linéaire non concave.
- Des contraintes linéaires (polyèdre convexe fermé borné).

C'est donc un problème non convexe. Ceci nous permet de dire qu'on ne connaît pas d'algorithmes classiques permettant de déterminer une solution optimale globale.

Quoiqu'il en soit, la méthode du gradient réduit de Wolfe (1962) semble être la plus efficace pour ce type de PNL.

C. Discussion sur la complexité et le résultat obtenu

La méthode du gradient réduit de Wolfe (1962) assure généralement une convergence super-linéaire, sans garantir que la solution optimale globale sera atteinte.

L'implémentation du problème en utilisant cette méthode n'entraîne que peu de variables et de contraintes supplémentaires par rapport aux variables du problème.

Au total, on ne manipulera que quelques dizaines de variables et quelques dizaines de contraintes. Ce qui est une taille raisonnable compte tenu de la puissance de traitement des calculateurs actuels et de l'efficacité de l'algorithme utilisé.

En effet, on peut trouver des codes déjà implémentés très efficaces qui permettront de résoudre aisément un problème de cette taille.

La solution optimale globale exacte, objet de notre étude, n'étant pas garantie, nous avons tenter d'exploiter les caractéristiques spécifiques du problème afin d'élaborer une méthode heuristique qui permettrait d'obtenir une meilleure solution

II.3.3. Approche par la méthode heuristique

Cette méthode heuristique respecte la nature dynamique du problème.

A. Principe de la méthode

Notre problème présente les spécificités suivantes :

- La fonction objectif est strictement croissante.
- Le domaine, délimité par des contraintes linéaires, est un polyèdre convexe fermé borné.

Nous montrons que, dans ces conditions, la solution optimale globale se trouve sur un sommet du polyèdre.

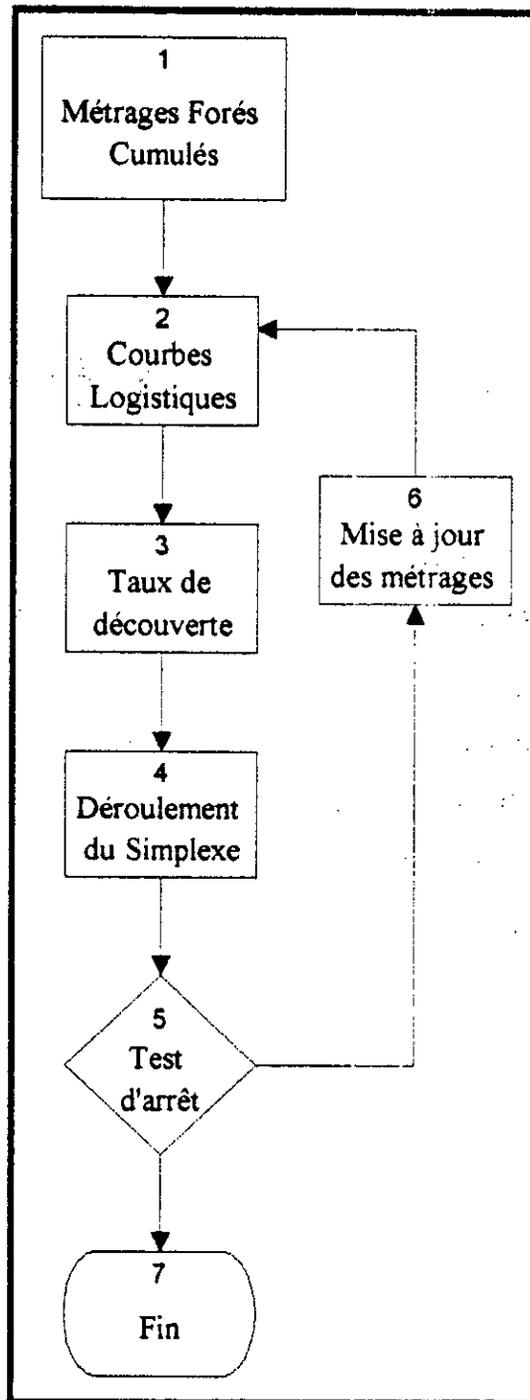
Puisque de toute évidence le nombre de sommets est fini, un balayage habile de l'ensemble de ces sommets pourrait nous fournir (en un nombre fini d'itérations) la solution optimale globale. C'est pourquoi on utilisera la méthode du simplexe qui inspecte les sommets un à un en améliorant la solution d'une itération à l'autre.

La fonction objectif n'étant pas linéaire, l'utilisation du simplexe nécessite la linéarisation préalable de cette fonction. Cependant, il ne faudra pas perdre la propriété de croissance stricte de la fonction. Cette propriété est nécessaire pour les démonstrations

Gardons bien à l'esprit que le simplexe est utilisé, avant tout, pour se déplacer d'un sommet à un autre. Le sommet retenu par le simplexe devra être évalué avec la fonction objectif non linéaire.

Nous allons, dans un premier temps, présenter notre heuristique, par la suite nous donnerons quelques démonstrations pour prouver la convergence de l'algorithme et une interprétation géométrique de son fonctionnement. Nous expliquerons alors sous quelles conditions l'algorithme converge vers la solution optimale globale. Enfin, afin d'apprécier la solution obtenue et de la valider, nous développerons un test basé sur le théorème de Fisher, Tippett et Fréchet.

Le processus de calcul est alors schématisé comme suit :



Conformément à l'organigramme, présenté ci-dessus, la mise en œuvre de l'algorithme consiste à réaliser les étapes suivantes:

- (1) Initialiser la solution de départ en prenant le métrage foré cumulé en début de période d'étude.
- (2) Se placer sur les courbes logistiques en fonction du métrage foré cumulé (pour chaque année et pour chaque district).
- (3) Calculer la dérivée de chaque fonction (taux de découverte) aux points déterminés en (2).
- (4) Les taux obtenus en (3) sont injectés en tant que coefficients de la fonction objectif pour le déroulement de l'algorithme du simplexe. Ce dernier fournit la solution X^k pour la $k^{\text{ème}}$ itération.
- (5) test d'arrêt :
 - Si $X^k = X^{k-1}$ aller en (7)
 - Sinon aller en (6).
- (6) Mettre à jour les métrages cumulés. Aller en (2).
- (7) Stop.

Détermination des taux de découvertes annuels prévisionnels à partir des courbes logistiques:

Pour un district donné, soient M_{p_i} les métrages prévisionnels pour les années $i = 1, N$. On déduit les découvertes D_{p_i} correspondant aux métrages M_{p_i} de la courbe logistique associée au district concerné.

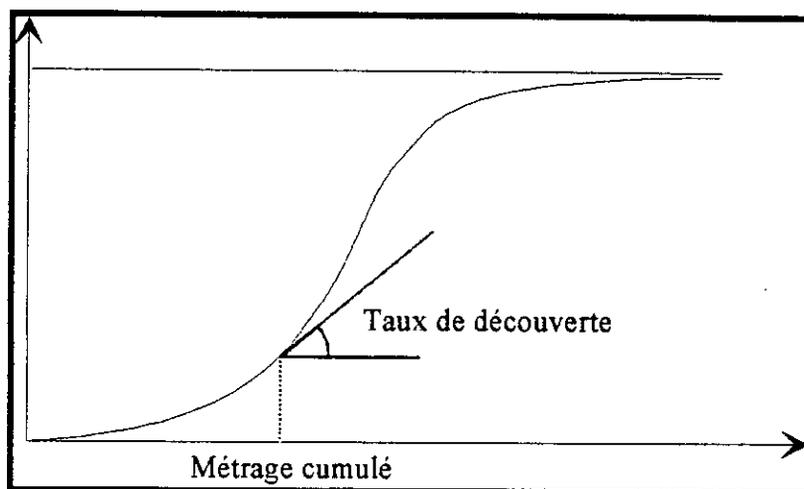


Figure IV-4 : Détermination des taux

Les taux de découvertes prévisionnels pour les années $i = 1, N$ s'obtiennent de la manière suivante :

Pour la première année ($i = 1$) :

On calcule pour chaque district j la dérivée de la fonction $f_j(x)$ correspondant au point $x = Mc_j$ (métrage cumulé en début de période d'étude).

Soit:

$$TD_{1j} = \left. \frac{d f_j(x)}{d x} \right|_{x = Mc_j} \quad j = 1, K$$

Pour les années suivantes ($i = 2, N$):

Pour chaque district j , pour une année i , il faut ajouter au métrage cumulé les métrages prévisionnels des années précédentes. On calcule alors la dérivée de la fonction

$f_j(x)$ au point $x = Mc_j + \sum_{k=1}^{i-1} Mk_j$.

Soit:

$$TD_{ij} = \left. \frac{d f_j(x)}{d x} \right|_{x = Mc_j + \sum_{k=1}^{i-1} Mk_j}$$

B. Formulation mathématique

La fonction objectif est :
$$\text{Max} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K \text{TD}_{ij} * M_{ij}$$

sous les contraintes :

$$\sum_{j=1}^K M_{ij} \leq F_i \quad i = 1, N \quad (\text{Limitation de la capacité de forage annuelle})$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K \text{CR}_{ij} * M_{ij} \leq I \quad (\text{Limitation de l'investissement pour toute la période})$$

$$\sum_{j=1}^K \text{CR}_{ij} * M_{ij} \geq I_a \quad i = 1, N \quad (\text{Investissement annuel minimum})$$

$$\text{LM}_{ij} \leq M_{ij} \leq \text{LN}_{ij} \quad i = 1, N \quad (\text{Métrage foré minimum et maximum par année})$$

$$j = 1, K$$

Le nombre de contraintes est : $2(N \cdot K + N) + 1$.

C. Démonstrations

Démonstration 1: X est sommet du polyèdre*

Hypothèses:

- La solution optimale X* existe
- $D \subset \mathbb{R}^n$ domaine convexe fermé, borné et contraintes linéaires. C'est-à-dire D polyèdre convexe fermé
- f fonction objectif continuellement dérivable strictement croissante ($f'(X) > 0, X \in D$).

Le programme est : $\text{Max } f(X)$ sous $X \in D$.

Nous allons mener ces démonstrations en trois étapes: X* est sur la paroi du domaine, puis elle est sur une arête ou un sommet, enfin nous concluons qu'elle est sur un sommet.

1^{ère} étape: X^* est sur la paroi de D

Supposons que $X^* \in \text{int}(D)$ alors il existe une boule ouverte centrée en X^* de rayon $\theta > 0$ contenue dans D (càd $\forall X \in B, X \in D$). Soit e une direction telle que $e_i \geq 0$ pour $i = 1, n$ et e_i non tous nuls, alors:

$\forall \varepsilon$ tel que $0 < \varepsilon < \theta$, $X' = X^* + \varepsilon \cdot e \in B$, a fortiori $X' \in D$.

D'où $f(X') = f(X^* + \varepsilon \cdot e) = f(X^*) + \varepsilon e^T f'(X^*) + \varepsilon e \cdot o(\varepsilon)$

où $o(\varepsilon)$ tend vers 0 lorsque ε tend vers 0.

Ainsi $f(X') > f(X^*)$ donc X^* n'est pas la solution optimale, d'où la contradiction.

Conclusion: X^* appartient à la paroi de D .

2^{ème} étape: X^* est sur un sommet ou sur une arête

Remarque: le principe est le même, mais cette fois-ci la direction n'est pas simplement positive, elle doit être admissible en considérant les contraintes.

Supposons que X^* n'est ni sur un sommet ni sur une arête.

On peut toujours trouver une direction parallèle à la paroi telle que $e \cdot \nabla f \geq 0$.

En effet, supposons que toute direction u parallèle à la paroi soit u telle que $u \cdot \nabla f \leq 0$, alors:

pour $e = -u$, $e \cdot \nabla f = -u \cdot \nabla f \geq 0$ et e est parallèle à la paroi...

Énonçons le Théorème de l'angle droit [Aba,75]:

Étant donné un point X^0 et une direction y^0 , il existe un pas $\theta_1 > 0$ de déplacement sur la droite passant par X^0 et de direction $y^0 > 0$, tel que:

si $f'(X^0) \cdot y^0 \geq 0$, c'est-à-dire si l'angle des vecteurs y^0 et $f'(X^0)$ est aigu alors:

pour tout ε compris entre 0 et θ , on ait $f(X^0 + \theta y^0) > f(X^0)$.

Appliquons ce théorème pour $X^0 = X^*$ et $y^0 = e$ alors:

$\forall \varepsilon$ tel que $0 < \varepsilon < \theta$, on a $f(X^* + \varepsilon e) > f(X^*)$.

D'où la contradiction.

Conclusion: X^* est sur un sommet ou sur une arête.

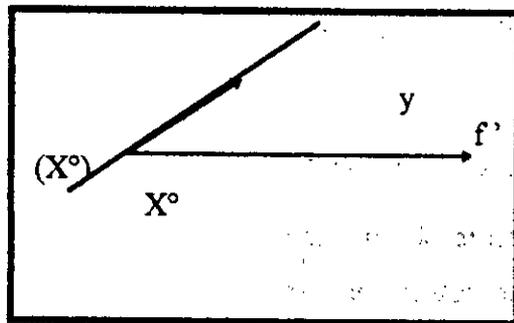
3^{ème} étape: X^* est sur un sommet.

Remarque: excluons le cas où tous les points de l'arête sont "solution optimale". Dans ce cas précis, a fortiori une solution optimale est sur un sommet, ce que nous voulons démontrer.

Le domaine est défini par m contraintes, $g_i(X) \leq 0$ pour $j = 1, m$.

X^* est sur une arête signifie que pour certains j , $g_j(X^*) = 0$.

Énonçons le théorème des directions améliorantes; l'hypothèse est f différentiable en X^0 .



Par définition :

Le vecteur $y \neq 0$ est une direction améliorante en X^0 pour la maximisation (resp. Pour la minimisation) de f

s'il existe $\theta > 0$ tel que $f(X^0 + \varepsilon y) > f(X^0)$ (resp. $f(X^0 + \varepsilon y) < f(X^0)$),

$\forall \varepsilon$ vérifiant $0 < \varepsilon < \theta$.

Cela revient à dire que y fait un angle aigu avec f' (resp. $-f'$).

D'où le théorème suivant, dit *théorème des directions améliorantes* [Aba, 75]

si $y \neq 0$ fait un angle aigu avec $f'(X^0)$ (resp. $-f'(X^0)$), y est améliorant pour la maximisation (resp. pour la minimisation) .

Si l'on choisit $y \neq 0$ une direction en X^* suivant l'arête alors y est une direction réalisable de même que $-y$ (car par hypothèse, X^* n'est pas sur un sommet).

Etant donné que $f'(X)$ est strictement positive, alors soit y soit $-y$ fait un angle aigu avec $f''(X^*)$.

Or s'il existe une direction réalisable et améliorante en X^* alors, d'après le lemme 1, X^* n'est pas solution du problème; d'où la contradiction avec l'hypothèse.

Conclusion: X^* , solution optimale, est sur un **sommet** du polyèdre convexe fermé qu'est le domaine réalisable D .

Démonstration 2: Si le point X^ est atteint, l'algorithme s'arrête.*

Nous avons montré que X^* était un sommet du polyèdre. L'heuristique utilise le simplexe pour passer d'un sommet à un autre à chaque itération.

Il s'agit de montrer que si l'on atteint X^* , l'algorithme ne risque pas de passer à un autre sommet à l'itération.

Hypothèses:

- X^* solution optimale est sur un sommet,
- D est formé de contraintes linéaires,
- f est continuellement dérivable.

Le programme est le suivant :

$$P : \text{Max} [f(X)]$$

$$\text{sous (1) } a_j X \leq b_j \quad (a_j \text{ vecteur-ligne contraintes linéaires})$$

A une certaine itération i , nous sommes sur le sommet X^i , le problème linéarisé en X^i :

$$PL(X^i) : \text{Max} [f(X^i) + f'(X^i)(X - X^i)]$$

$$\text{sous (1) } a_j X \leq b_j .$$

Nous allons montrer que si X^i est solution de P alors X^i est solution de $PL(X^i)$.

(Nous prenons donc comme hypothèse $X^* = X^i$).

Le lemme suivant, dont la démonstration presque triviale figure dans [Aba,75], nous sera utile par la suite:

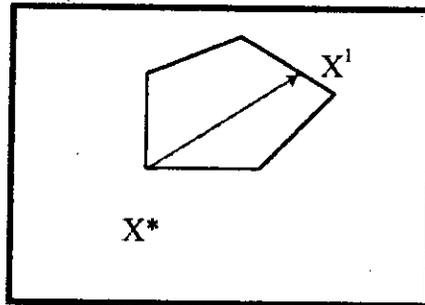
Lemme 1 : Soit le problème $P : \text{Max } (f(X))$ sous

$$a_j X \leq b_j. \quad (1)$$

Soit X^* un point réalisable; s'il existe une direction réalisable améliorante en X^* alors X^* n'est pas solution de P .

Soit X^1 un autre point vérifiant (1), il faut montrer que $f(X^1) \leq f(X^*)$.

Le vecteur $X^1 - X^*$ est réalisable:



Soit S^* l'ensemble des contraintes qui définissent le point X^* .

$$\forall j \in S^* \text{ on a : } a_j X^* \leq b_j$$

$$a_j X^1 \leq b_j$$

alors on a $a_j (X^1 - X^*) \leq 0 \forall j \in S^*$.

Ce qui caractérise une direction réalisable (Cf. [ABA, 75] caractérisation des directions réalisables). Ainsi $y = X^1 - X^*$ est réalisable. Mais y n'est pas améliorante (d'après notre hypothèse et le lemme 1). Ainsi $f'(X^*) (X^1 - X^*) \leq 0$ et, donc

$$f(X^*) + f'(X^*) (X^1 - X^*) \leq f(X^*) + f'(X^*) (X^* - X^*)$$

en X^1 vérifiant (1), f prend une valeur inférieure à celle qu'elle prend en X^* .

Donc X^* est solution de PL (X^*).

On peut en conclure que si l'heuristique atteint le point X^* , solution de P , à l'itération suivante, on se retrouvera sur X^* car elle est solution du PL en X^* .

Conclusion: Si l'heuristique atteint X^* , elle ne le quittera pas (convergence du processus).

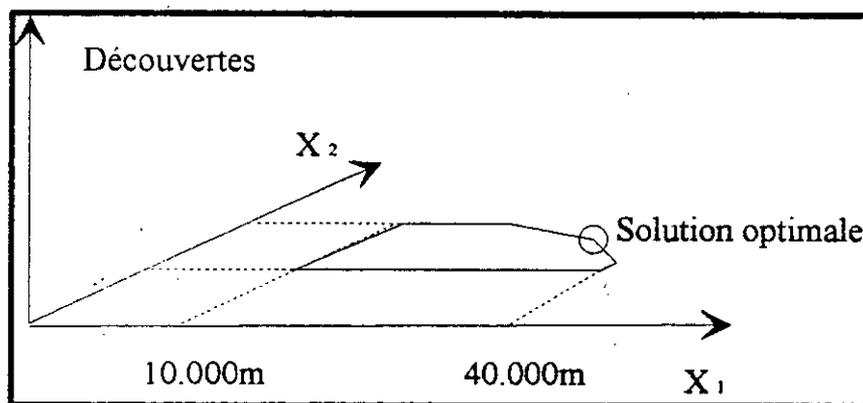
Démonstration 3 : On ne peut s'arrêter sur un sommet non optimal.

Soit X^i le sommet atteint à l'itération i , s'il n'est pas solution du PNL, alors il existe une direction améliorante. Or cette direction reste réalisable pour le PL de l'étape $i + 1$ (les contraintes étant linéaires), elle reste aussi améliorante puisque l'on considère f' en X^i . Donc à l'itération suivante, on ne sera plus en X^i .

Conclusion: Si à une itération donnée du déroulement de l'algorithme, un sommet non optimal est atteint, il ne peut en aucun cas être obtenu à l'itération suivante. Ainsi le processus continuera tant que l'on n'atteint pas la solution optimale.

D. Interprétation géométrique

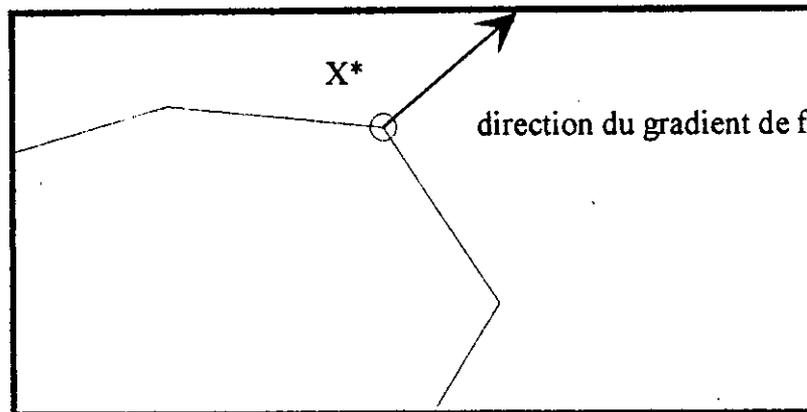
Donnons une interprétation du fonctionnement de l'algorithme dans le cas de deux districts et une année. Ce qui correspond à 2 variables, soit X_1 et X_2 sur la schéma suivant:



En appliquant l'algorithme, on est amené à chercher la solution de base (donc sur un sommet) qui est dans la direction du vecteur gradient de la fonction objectif linéarisée. Ce sommet est lui-même le vecteur taux d'accroissement au sommet retenu lors de l'itération précédente.

Pourquoi la convergence?

Le processus va s'arrêter lorsque, partant d'un sommet de base X^k à l'itération k , nous obtenons le même sommet à l'itération $k+1$ (et donc après application du simplexe).



A chaque itération de l'algorithme, c'est la direction du gradient qui est modifiée: le gradient va prendre la direction correspondant au sommet de base "optimal" courant.

L'algorithme va s'arrêter lorsque le sommet déterminé à l'itération k possède un gradient (donc une direction à prendre) qui mènera à ce même sommet à l'itération $k+1$.

Comment fonctionne l'algorithme?

- Le simplexe détermine le sommet *optimal* pour une direction donnée
- On détermine la direction du gradient associée à ce sommet
- Le simplexe détermine le sommet *optimal* pour cette direction...
- On réitère le processus jusqu'à la convergence.

e. Test de validation des résultats

La mise en œuvre d'un algorithme sur ordinateur introduit des erreurs dues à une précision toujours limitée. La propagation de ces erreurs peut entraîner une divergence ou conduire vers un résultat erroné.

Quelque soient les garanties de convergence de la théorie, les résultats obtenus en pratique peuvent différer de ceux attendus. C'est pourquoi, il nous semble important de développer un test permettant de valider les résultats auxquels nous aboutirons.

Principe du test

le test développé est basé sur le théorème de Fisher, Tippet et Frechet (1928) énoncé ci-dessous :

Théorème: La distribution de la plus grande (ou de la plus petite) valeur de m variables aléatoires indépendantes admettant même loi de probabilité tend vers la loi de Weibull lorsque m tend vers l'infini.

La fonction densité de probabilité de la loi de Weibull est la suivante :

$$f(x) = \left(\frac{c}{b}\right) \left(\frac{x-a}{b}\right)^{c-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c\right] \quad x \geq a \geq 0, b > 0, c > 0$$

Avec :

a : le paramètre de position.

b : le paramètre d'échelle.

c : le paramètre de forme.

Nous nous intéresserons au maximum (la plus grande valeur) de la population mère des solutions réalisables ($\{ Z / Z \text{ respecte les contraintes du modèle } \}$).

Il s'agit de valider la solution fournie par l'heuristique. Pour cela nous nous proposons d'évaluer la probabilité pour qu'il existe une solution meilleure.

Construction du test

La première étape consiste à déterminer les paramètres de la loi de Weibull.

Pour cela, considérons N échantillons de taille m tirés aléatoirement de la population mère.

Soit Z_i le maximum observé des échantillons i ($i = 1, N$).

D'après le théorème de Fisher, Tippet et Fréchet (1928), lorsque m tend vers l'infini, la distribution des Z_i tend vers une loi de Weibull indépendamment de la distribution de la population mère.

La série des maximums observés devra être ajustée par la loi de Weibull.

La deuxième étape consiste à évaluer la probabilité pour qu'il existe une solution (soit Z) meilleure que celle obtenue par l'heuristique (soit Z^*)

Cette probabilité $P = P (Z > Z^*)$ s'exprime par:

$$P = \int_{z^*}^{+\infty} f(Z) dZ$$

$$\text{soit: } P = \int_{z^*}^{+\infty} \left(\frac{c}{b}\right) \cdot \left(\frac{Z-a}{b}\right)^{c-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{Z-a}{b}\right)^c\right] dZ.$$

$$\text{d'où } P = \exp\left[-\left(\frac{z^*-a}{b}\right)^c\right].$$

III. MODÈLE DE RÉPARTITION INTRA-DISTRICT

Les modèles classiques appliqués avec succès aux problèmes militaires et à la recherche et secours civils supposent qu'un petit objet perdu ou caché est cherché quelque part dans une vaste région (Exemple: un bateau a coulé, des survivants sont probablement sur un radeau. A partir de la dernière position signalée du bateau, du vent, du courant et des listes des marées, une distribution de probabilités des positions possibles du radeau est calculée).

Un problème de recherche classique peut être modélisé comme suit :

Soient les N régions $i = 1, N$ où l'objet peut être caché.

Le chercheur a une connaissance, " subjective" peut être, des localisations probables en terme de distribution de probabilité.

Soient :

- P_i : la probabilité pour que l'objet soit caché dans la région i .
- T : le total d'heures disponibles est alloué entre les N régions.
- t_i : le temps de recherche dans la région i ($i = 1, N$).
- Si le chercheur passe t_i heures dans la région i et que l'objet s'y trouve il aura une probabilité $b_i(t_i)$ de le trouver.

On suppose que $b_i(t_i)$ est une fonction concave croissante.

Le modèle est :

$$\text{Max } \sum_{i=1}^N P_i \cdot b_i(t_i) \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^N t_i = T \quad (2)$$

$$t_i \geq 0 \quad i = 1, N$$

Lorsque la taille des objets augmente, les activités de recherche dans différentes localisations peuvent être physiquement et statistiquement dépendantes. Par conséquent les modèles de recherche classique ne sont pas appropriés. Les difficultés résultant de la

dépendance statistique peuvent être surmontées en utilisant des scénarios dérivés de la méthode de Monté Carlo dans un modèle de programmation linéaire en nombres entiers.

III.1. FORMULATION DU MODELE

Dans un premier temps, il s'agit d'établir une grille de points d'exploration pour une région où l'on suppose caché un nombre de dépôts de tailles différentes. Chaque point de la grille est un site de forage possible.

La grille doit être suffisamment dense pour que l'on ne soit pas amené à chercher entre 2 points adjacents. En d'autres termes, si l'on a foré deux puits secs en deux points adjacents, on doit être convaincu que l'on ne risque pas de trouver de dépôt entre ces deux points. De plus, deux points adjacents ne devraient pas contenir le même objet. Ainsi la distance entre ces deux points devrait être de l'ordre de la taille moyenne d'une nappe.

Formalisons les données du problème :

- Considérons N points sur notre grille indicés par i ($i = 1, N$).
 - Notons P_i la probabilité pour que le point i se trouve au dessus d'une nappe.
 - Soit x_i l'effort alloué au point i ($x_i \geq 0$).
- x_i peut prendre différentes formes à savoir :

- $x_i = \begin{cases} \text{variable continue (ex : profondeur du puits)} \\ \text{variable binaire (0, 1) : décision de forer. (vrai, faux)} \\ \text{combinaison des deux.} \end{cases}$

- Soit a_i la ressource d'exploration consommée par unité d'exploration au point i .
- Soit A le total des ressources disponibles.
- Soit $b_i(x_i)$ la probabilité conditionnelle de détection d'une nappe sachant que le point i est au dessus de celle ci et que l'effort consommé est x_i .

Le programme mathématique se présente alors comme suit :

$$\sum_{i=1}^N a_i x_i = A$$

La répartition des ressources d'exploration doit maximiser la probabilité de détection.

Examinons de plus près la forme de la fonction objectif :

Étant donné que les points de la grille, par construction, sont proches (condition de densité), on ne peut considérer que les probabilités b_i sont indépendantes.

La fonction objectif ne peut être raisonnablement approximée par une fonction séparable de la forme (1). En effet, additionner les probabilités de détection n'a plus de sens.

[A et B sont deux événements non indépendants alors $P(A \cup B) \neq P(A) + P(B)$].

Pour formuler une fonction objectif appropriée, il faut introduire des probabilités jointes interprétant les dépendances.

Supposons que i, j, k soient trois points adjacents de la grille et que des puits secs aient été forés en i et en k . La fonction de détection $b_j(x_j)$ doit être interprétée comme étant la probabilité de détection au point j avec un effort x_j sans tenir compte des résultats obtenus aux points i et k . Or, la taille d'une nappe étant en moyenne de l'ordre de la distance entre deux points adjacents, cette probabilité n'est plus significative.

Soit $P(y_1, y_2, \dots, y_N)$ la fonction des probabilités jointes spécifiant a priori la probabilité jointe des événements y_i : "présence d'un dépôt sous le point i " ($i=1, N$)

La probabilité b_j doit donc prendre en compte les efforts alloués à chaque point de la grille ainsi que la probabilité a priori de présence de nappe en chacun de ces points.

La nouvelle fonction objectif devient :

$$\text{Max} \sum_i b_i(x_1, x_2, \dots, x_N, P(y_1, y_2, \dots, y_N))$$

L'estimation de $P(y_1, \dots, y_N)$, dans la pratique, ne peut se faire simplement à partir des Pr_i (rappelons qu'il s'agit de la probabilité pour que le point i se trouve au dessus d'une nappe). Par contre, à partir des informations concernant la région à explorer (données

géologiques et géophysiques, ...) et de leur expérience, les experts dans l'exploration pétrolière sont tout à fait capables de construire un jeu de scénarios.

Les scénarios sont un moyen commode de rendre compte du foisonnement des incertitudes de leurs interrelations et de leurs ordres de grandeurs respectifs.

Les scénarios établis doivent fournir :

- Pour chaque point de la zone géologique - ou au moins pour les points de la grille - une estimation de la vraisemblance d'un dépôt en ce point.
- Sachant qu'un dépôt est situé en ce point, la distribution de probabilités de profondeur de ce dépôt ou une estimation de la profondeur.

D'une autre manière, les experts peuvent établir des scénarios déterministes (pour chaque point de la grille préciser à quelle profondeur on trouvera éventuellement un dépôt d'hydrocarbures) et affecter à chacun d'entre eux une pondération caractérisant l'estimation de leur vraisemblance.

La formulation du problème dans ce cas devient la suivante :

Supposons qu'il y ait N sites possibles de forage $j = 1, \dots, N$, K profondeurs de forage $k = 1, \dots, K$ et M scénarios $i = 1, \dots, M$.

Soit x_{jk} la variable de décision telle que :

$$x_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{si l'on fore en } j \text{ avec la profondeur } k \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Soit y_i telle que :

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{si nous réussissons à détecter au moins un dépôt} \\ & \text{sur le scénario } i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Soit q_i : la probabilité a priori de réalisation du scénario i . $\sum_{i=1}^M q_i = 1$

Soit a_{ijk} telle que :

$$a_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{Si pour le scénario } i \text{ il y aura détection au} \\ & \text{point } j \text{ avec une intensité } k \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

Soient :

r_{jk} : la ressource consommée pour la profondeur k au point j .

R : la ressource totale disponible.

Le modèle se présente alors sous la forme :

$$\begin{aligned}
 & \text{Max } \sum_{i=1}^M q_i \cdot Y_i \\
 & \sum_{k=1}^K x_{jk} \leq 1 \quad j = 1, \dots, N \\
 & \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N r_{jk} x_{jk} \leq R \\
 & Y_i \leq \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N a_{ijk} x_{jk} \quad i = 1, \dots, M \\
 & x_{jk} = \{ 0, 1 \} \quad j = 1, \dots, N, k = 1, \dots, K \\
 & Y_i = \{ 0, 1 \} \quad i = 1, \dots, M
 \end{aligned}$$

La fonction objectif maximise le nombre de scénarios sur lesquels au moins une découverte est faite. Il s'agit de trouver un consensus entre les propositions de scénarios (les scénarios pouvant être établis par différents experts).

III.2. RESOLUTION

On résout le programme linéaire en $\{0, 1\}$ obtenu ci-dessus par l'algorithme de Balas (1965). Celui-ci permet, en utilisant le principe de séparation et évaluation (Branch and Bound), d'obtenir la solution optimale exacte.

III.3. DISCUSSION SUR LA COMPLEXITE

L'algorithme de Balas permet de traiter efficacement notre programme linéaire en $\{0, 1\}$ tant que la taille reste raisonnable.

Le nombre de contraintes est $N+M+1$ et le nombre de variables est $N*K+M$.

La taille de notre problème est essentiellement liée au nombre de points sur la grille. En effet, le nombre de scénarios reste limité entre 3 et 5. Avoir plus de 5 scénarios signifierait que les experts sont incapables de bien décrire le système, il faut donc continuer la prospection indirecte pour gagner plus d'informations sur le terrain avant d'entamer les forages.

Par ailleurs, en Algérie, les profondeurs des puits varient entre 1500 et 3500 m. Les propositions de forages des experts sont généralement faites par pas de 500 m.

Les profondeurs proposées appartiennent à $S = \{1500, 2000, 2500, 3000, 3500\}$. Le nombre k de profondeurs ne dépassera pas $\text{Card}(S) = 5$.

Le nombre de points " N " sur la grille dépend de la surface du district et de la taille moyenne d'un gisement d'hydrocarbures.

Le nombre de variables du problème sera donc au plus $5*N+5$ et celui des contraintes sera au plus $N+6$. La complexité de l'algorithme de Balas est plus sensible au nombre de variables qu'au nombre de contraintes.

Tant que N ne dépasse pas quelques dizaines, le temps de traitement est acceptable. La complexité temps est, pour notre problème, polynomiale [Tah, 75].

Dans le chapitre suivant, nous présentons l'implémentation des modèles développés et leur application à un cas SONATRACH.

CHAPITRE V

IMPLÉMENTATION ET APPLICATION SONATRACH

IMPLÉMENTATION ET APPLICATION SONATRACH

Après avoir développé le modèle de répartition inter-districts et le modèle de répartition intra-district, il faut à présent passer à leur implémentation.

Nous allons présenter successivement l'implémentation et la mise en œuvre de chaque modèle.

Nous avons utilisé trois types de micro-ordinateur de capacités de puissance différentes: un 80486 Dx4 100 disposant de 8 MégaOctets de RAM, un 80486 Sx33 disposant de 8 MégaOctets de RAM et un 80386 Dx40 disposant de 4 MégaOctets de RAM, et ce afin de nous assurer de l'efficacité et de l'applicabilité des algorithmes développés (et donc du logiciel) sur un large éventail de types de micro-ordinateur.

Le logiciel est composé de deux modules principaux, un pour chaque étape de répartition. Les résultats obtenus par la répartition inter-districts seront injectés en tant qu'inputs dans le modèle de répartition intra-district. Les deux sections qui suivent présentent les différentes étapes d'implémentation et de mise en œuvre de ces modules.

I. MODÈLE DE RÉPARTITION INTER-DISTRICTS

I.1. PRÉSENTATION DU CAS TRAITÉ

Le cas que nous avons à traiter est caractérisé par les données suivantes :

- Horizon de planification (N) :

La période de planification à moyen terme retenue est 4 années (N = 4).

- Districts (K) :

Le domaine minier algérien est découpé en 4 districts (K = 4) :

- District 1 : " Nord "
- District 2 : " Illizi "
- District 3 : " Ouest "
- District 4 : " Trias "

- Les investissements (I, I_a) :

L'unité monétaire généralement utilisée par la SONATRACH est le \$US. En effet, la plupart des transactions sont faites en \$, d'autre part, le taux d'inflation est stable.

En considérant un taux d'inflation de 2.5 % (source : OCDE), le niveau d'investissement total considéré est $I = 900$ millions de \$ et le niveau d'investissement minimum annuel est : $I_a = 200$ millions de \$.

- Les capacités de forage (F_i , LM_{ij} et LN_{ij}) :

- Capacité annuelle pour les quatre districts : 90.000 mètres.
- Capacité annuelle maximum pour chaque district : 40.000 mètres.
- Capacité annuelle minimum pour chaque district : 10.000 mètres.

- État actuel du système :

Districts	Découvertes cumulées (en millions de t.e.p)	Métrage foré cumulé (en mètre)	réserves récupérables ⁷ restant à découvrir (en millions de t.e.p)
Nord	1.17	154609	325
Illizi	445.2	313596	375
Ouest	134.23	190153	665
Trias	154.22	663805	400

Tableau V-1 : État actuel du système

⁷ Estimations volumétriques établies par la SONATRACH

- Les coûts de forage :

Années	Nord	Illizi	Ouest	Trias
1997	3752.6	4140.6	3564.6	4319.8
1998	3473.8	3833	3299.8	3999
1999	3282.8	3622.2	3118.2	3779
2000	3151.4	3477.4	2993.6	3627.8

Tableau V-2 : Coût de forage de chaque district, chaque année (en S par mètre foré)

I.2. CONSTRUCTION DES COURBES LOGISTIQUES

Nous avons ajusté les courbes à partir des données qui figurent dans les tableaux AI-1 à AI-4 de l'annexe I: Historiques et courbes logistiques. Ces tableaux fournissent les découvertes cumulées en fonction du métrage foré cumulé depuis le début des travaux d'exploration. L'historique dont nous disposons s'étale sur 20 ans. Il s'est avéré suffisant pour obtenir un bon ajustement.

La forme générale de l'équation paramétrique des courbes est :

$$Y = \frac{L}{1 + \exp(a + bx)} - \frac{L}{1 + \exp(a)}$$

Nous avons utilisé le logiciel Wincurve 5.0 pour l'estimation des paramètres. Ce logiciel se charge d'adopter la meilleure méthode de régression pour l'ajustement. Dans notre cas il s'agit de régressions non linéaires.

Voici, pour chaque district, l'équation paramétrique obtenue après ajustement :

- District 1 " Nord " :

$$Y = \frac{326.82}{1 + \exp (6.22 - 6.11e-06 .x)} - \frac{326.82}{1 + \exp (6.22)}$$

- District 2 " Illizi " :

$$Y = \frac{82599000}{1 + \exp (-11.52 - 2.8e-06 .x)} - \frac{82599000}{1 + \exp (- 11.52)}$$

- District 3 " Ouest " :

$$Y = \frac{807.93}{1 + \exp (4.52 - 1.52e-06 .x)} - \frac{807.93}{1 + \exp (4.52)}$$

- District 4 " Trias " :

$$Y = \frac{7.23e15}{1 + \exp (- 30.2 - 4.74e-07 .x)} - \frac{7.23e15}{1 + \exp (- 30.2)}$$

I.2.1. Interprétations et commentaires

A. Régions complexes (District Nord et District Ouest) :

L'analyse de l'historique des découvertes de ces districts semble mettre en évidence autant la complexité géologique que la difficulté d'exploration des deux régions. Ces dernières sont en phase d'immaturité. Les volumes d'hydrocarbures découverts à ce jour ne sont aucunement significatifs et demeurent certainement très en dessous du potentiel ultime de ces deux régions (les estimations faites par la SONATRACH sont

sont respectivement, 799 millions de t.e.p pour la région Ouest et 326 millions de t.e.p pour la région Nord).

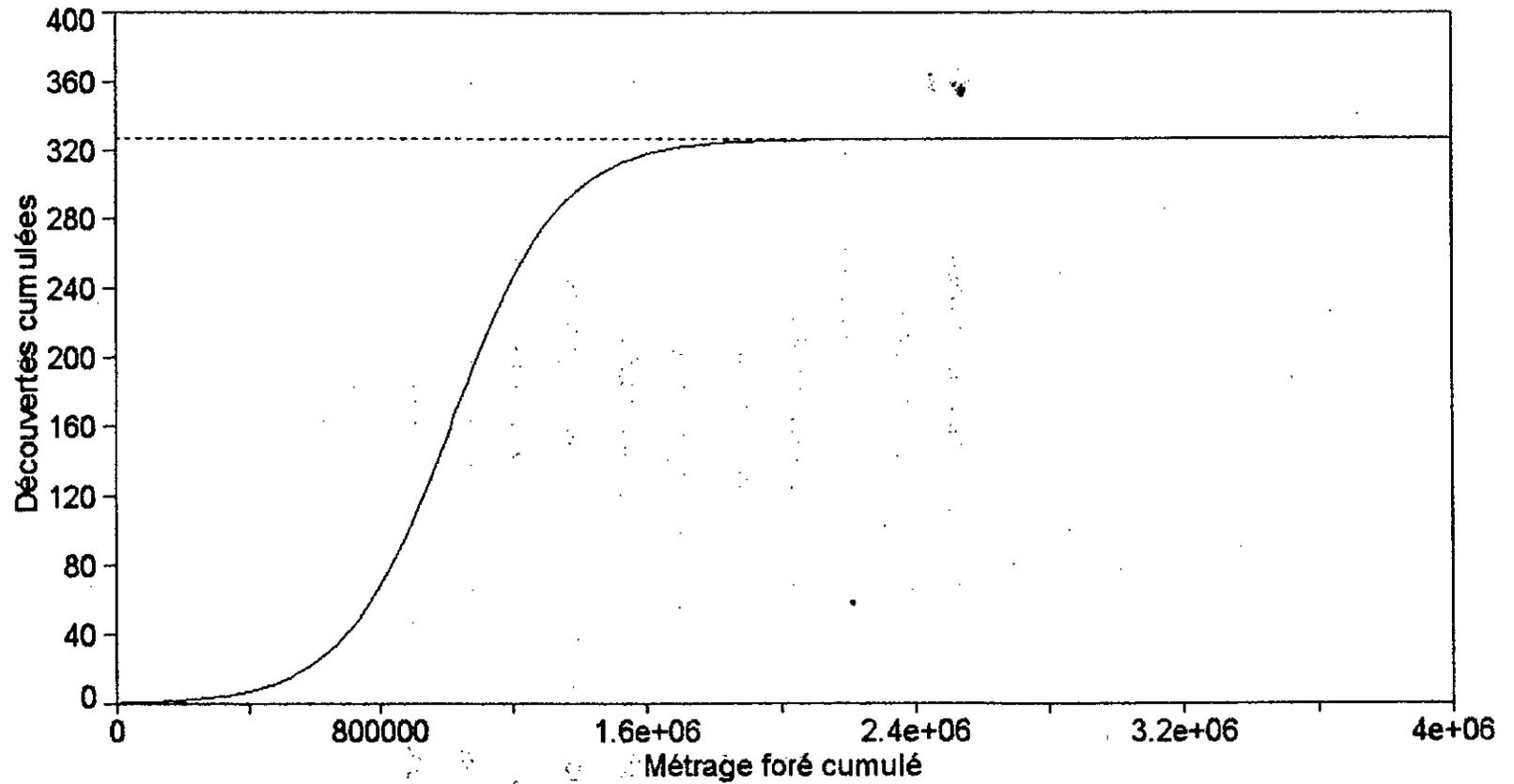
Le taux de découvertes aura tendance à croître tant que les régions n'auront pas atteint leur stade de maturité. Nous sommes donc dans le cas de la figure IV-3 (Cf. Chapitre IV: famille de courbes retenue). La courbe ajustée, pour chaque région, est en forme de " S " (Graphe V-1 et Graphe V-3).

L'extrême complexité géologique de la partie Nord de l'Algérie, qui comporte plusieurs domaines différents les uns des autres par leurs caractères stratigraphiques et structuraux, explique que les travaux d'exploration n'ont conduit qu'à de faibles découvertes durant les 16 premières années (Cf. Annexe I: tableau AI-1). La localisation des gisements fut très difficile, les découvertes faites ne reflètent donc pas l'effort d'exploration consenti. Ceci explique que le coefficient de corrélation de la courbe, $r^2=0.69$, est relativement faible. Ce point devra être pris en considération lors de la prise de décision d'investissements.

Les remarques faites sur la complexité de la région Nord restent vraies pour la région Ouest du Sahara. En analysant l'historique des découvertes cumulées de cette dernière (Cf. Annexe I: Tableau AI-3), on constate que sur les 12 premières années d'exploration une seule découverte a été faite. A partir de la 13^{ème} année le taux de découvertes n'a pas cessé de croître. Bien que complexe, la région Ouest est toutefois mieux connue que celle du Nord. Le coefficient de corrélation de la courbe ajustée, $r^2=0.93$, est très satisfaisant.

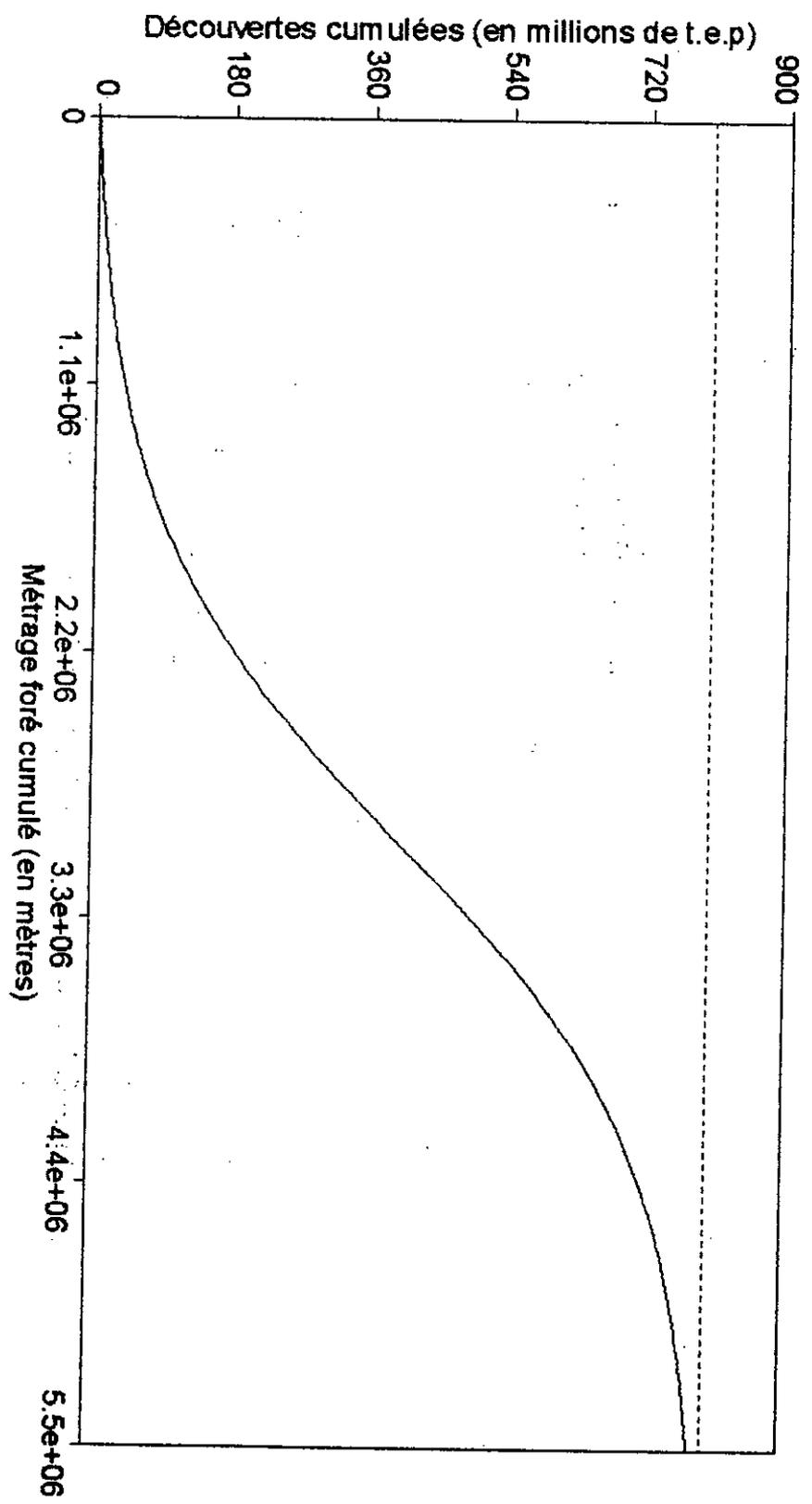
Graphe V-1 : Courbe logistique du District 1 " Nord "

$$y = 326.82 / (1 + \exp(6.22 - 6.11 \times 10^{-6} \times x)) - 326.82 / (1 + \exp(6.22))$$



Graphe V-3 : Courbe logistique du District 3 " Ouest "

$$Y = 807.93 / (1 + \exp(4.52 - 1.52 \exp(-0.6 \cdot x))) - 807.93 / (1 + \exp(4.52))$$



B. Régions peu complexes (District Illizi et District Trias) :

La distribution des découvertes cumulées (Annexe I: Tableau AI-2 et Tableau AI-4) semble indiquer que nous avons affaire à des régions matures et peu complexes du point de vue exploration.

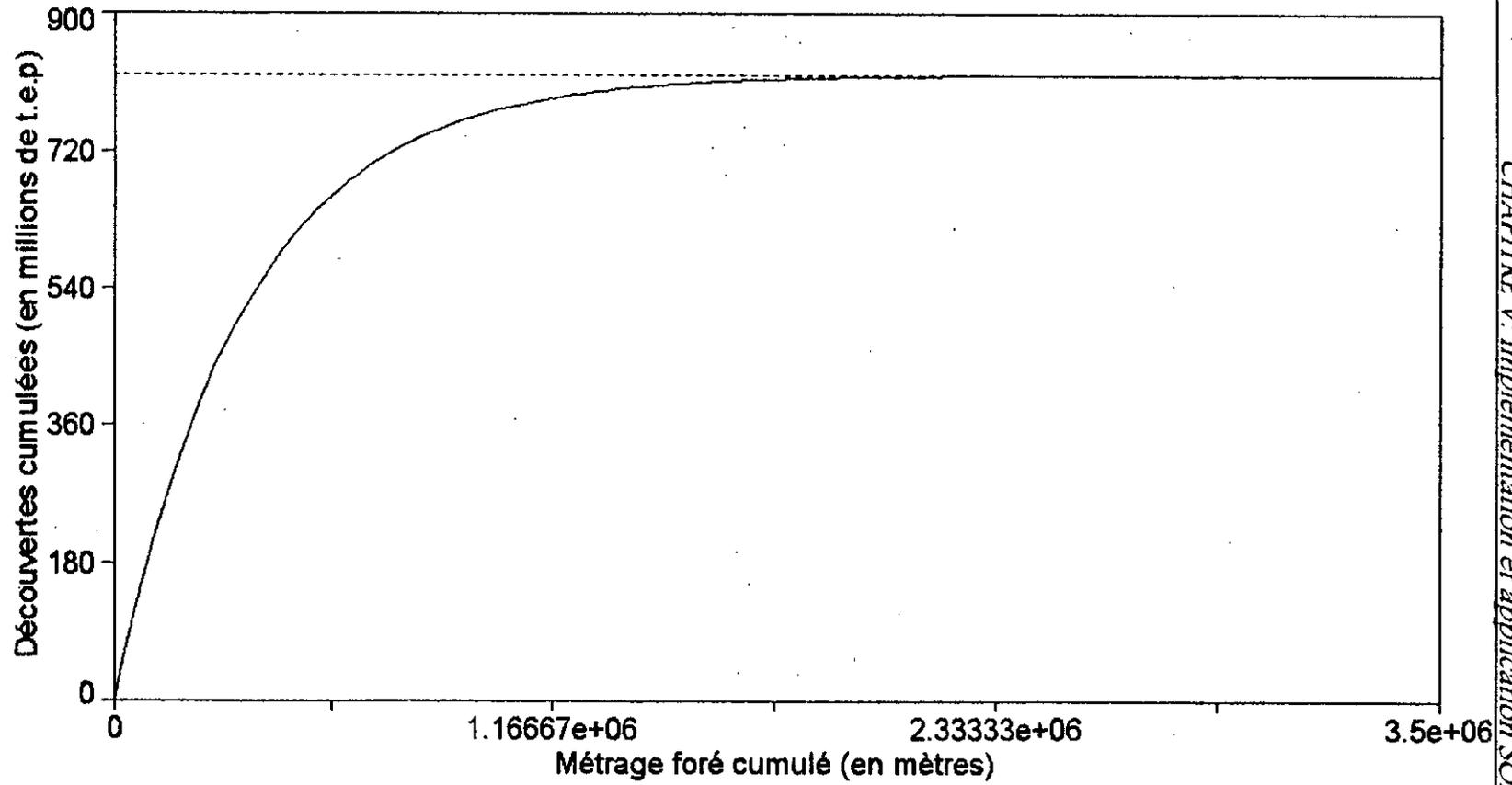
Très vite le taux de découverte a été important. Depuis, il a une tendance globale à décroître. Nous sommes dans le cas de la figure IV-2 (Cf. chapitre IV: famille de courbes retenue). Les graphes V-2 et V-4 sont obtenus par ajustement.

Les coefficients de corrélation, $r^2 = 0.97$ et $r^2 = 0.98$ obtenus respectivement pour le District Illizi et le District Trias, sont très satisfaisants. Ils montrent que la courbe logistique représente de manière très significative la relation entre les découvertes cumulées et le métrage cumulé.

On donne en Annexe I les courbes logistiques ajustées représentées avec un intervalle de confiance de 95%. Les dérivées premières de chaque courbe y figurent également.

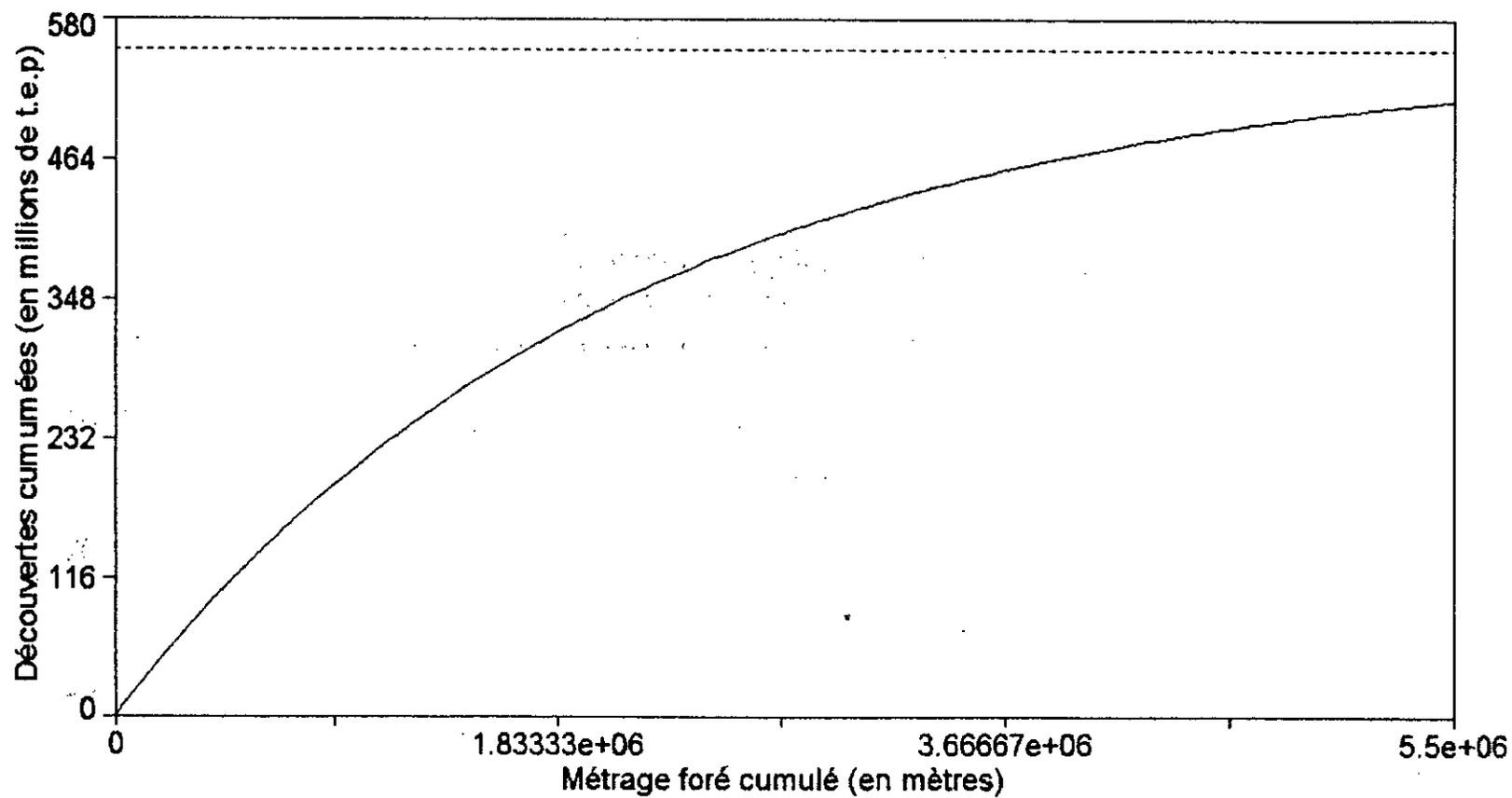
Graphe V-2 : Courbe logistique du District 2 " Illizi "

$$y = 82599000 / (1 + \exp(-11.52 - 2.8e-06 * x)) - 82599000 / (1 + \exp(-11.52))$$



Grphe V-4 : Courbe logistique du District 4 " Trias "

$$y = 7.23e15/(1+\exp(-30.2-4.74e-07*x))-7.23e15/(1+\exp(-30.2))$$



I.3. IMPLÉMENTATION DES APPROCHES DE RÉOLUTION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

I.3.1. Résolution par algorithme de programmation non linéaire classique

Rappelons que nous avons 4 districts en étude sur une période de planification de 4 années.

Le programme non linéaire de base comporte 16 variables et 41 contraintes. La complexité de la fonction objectif nous a amenés à la décomposer. Pour cela de nouvelles contraintes et variables sont introduites.

Rappelons que la fonction objectif s'écrit comme suit :

$$Z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K [f_j (M_{ij} + M_{c_j} + \sum_{k=1}^{i-1} M_{kj}) - f_j (M_{c_j} + \sum_{k=1}^{i-1} M_{kj})] + \sum_{j=1}^K [f_j (M_{1j} + M_{c_j}) - f_j (M_{c_j})]$$

Où :

- f_j : fonction découvertes cumulées en fonction du métrage cumulé.

$$f_j (x) = \frac{L_j}{1 + \exp (a_j + b_j x)} - \frac{L_j}{1 + \exp (a_j)} \quad b_j < 0$$

- M_{ij} : métrage foré durant l'année i pour le district j.
- M_{c_j} : métrage foré cumulé en début de période d'étude pour le district j.

La décomposition consiste à écrire, pour chaque district, pour chaque année, la découvertes correspondant au métrage décidé. Cela revient à introduire de nouvelles variables " Découvertes élémentaires ", soient $DE_{lem_{ij}}$, et les équations correspondantes.

Pour la première année, pour le district j :

$$DE_{lem_{1j}} = f (M_{1j} + M_{c_j}) - f (M_{c_j})$$

$$DE_{lem_{1j}} = \left[\frac{L_j}{1 + \exp (a_j + b_j (M_{1j} + M_{c_j}))} - \frac{L_j}{1 + \exp (a_j)} \right] -$$

$$\left[\frac{L_j}{1 + \exp (a_j + b_j \cdot M_{c_j})} - \frac{L_j}{1 + \exp (a_j)} \right]$$

$$DElem_{ij} = \frac{L_j}{1 + \exp(a_j + b_j (M_{ij} + Mc_j))} - \frac{L_j}{1 + \exp(a_j + b_j \cdot Mc_j)} \quad j = 1, 4$$

Pour l'année i ($i = 2, 4$), pour le district j ($j = 1, 4$):

$$DElem_{ij} = f(M_{ij} + Mc_j + \sum_{k=1}^{i-1} M_{kj}) - f(Mc_j + \sum_{k=1}^{i-1} M_{kj})$$

$$DElem_{ij} = \frac{L_j}{1 + \exp(a_j + b_j (M_{ij} + Mc_j + \sum_{k=1}^{i-1} M_{kj}))} - \frac{L_j}{1 + \exp(a_j + b_j (Mc_j + \sum_{k=1}^{i-1} M_{kj}))}$$

La nouvelle fonction découvertes totales est :

$$Z = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 DElem_{ij}$$

Cette opération nous a conduits à introduire 16 variables et 16 contraintes d'égalité.

Nous avons implémenté ce programme sous GAMS (Cf. Annexe IV: Présentation des logiciels utilisés) qui est un logiciel de programmation mathématique.

Il faut signaler que si l'introduction de contraintes d'égalité ne modifie pas le résultat théorique, il n'en n'est pas de même pour le choix de la méthode de résolution. L'introduction des équations en tant que contraintes nous ramène à un PNL caractérisé par une fonction objectif non linéaire et des contraintes non linéaires. Dans ce cas, il faudra faire appel aux méthodes appropriées telles que : la méthode du gradient réduit

généralisé, la méthode lagrangienne, etc. (c'est cette dernière qu'utilise GAMS) Ceci entraînera plus de calculs, un temps de traitement plus important et une perte de précision.

Cependant, GAMS peut considérer ces égalités en tant que *paramètres* (dans ce cas, la méthode du gradient réduit de Wolfe est utilisable).

Nous avons implémenté les deux cas de figures. Compte tenu des moyens informatiques utilisés, la taille du problème est raisonnable, le temps de calcul est compris entre 3 et 6 secondes, ce qui est tout à fait acceptable. La méthode du gradient réduit s'est avérée plus rapide et a fourni un meilleur résultat. Nous ne présenterons, dans ce qui va suivre, que le programme et le résultat de ce dernier.

Implémentation du programme :

- * **Title** Programme de répartition optimale des efforts de forage pour l'Algérie .
- * Horizon de planification 4 ans.
- * (AIB & HAMMOUDI pour la SONATRACH)

Sets

I Année / 1*4 /

J District / Nord , Illizi , Trias , Ouest /;

Table

CR(I,J) Coût unitaire

		Nord	Illizi	Trias	Ouest
1997	1	3752.6	4140.6	3564.6	4319.8
1998	2	3473.8	3833.0	3299.8	3999.0
1999	3	3282.8	3622.2	3118.2	3779.0
2000	4	3151.4	3477.4	2993.6	3627.8;

Table

LM(I,J) Forage Minimum Annuel

		Nord	Illizi	Trias	Ouest
1997	1	10000	10000	10000	10000
1998	2	10000	10000	10000	10000
1999	3	10000	10000	10000	10000
2000	4	10000	10000	10000	10000 ;

Table

LN(I,J) Maximum Annuel forer

		Nord	Illizi	Trias	Ouest
1997	1	40000	40000	40000	40000
1998	2	40000	40000	40000	40000
1999	3	40000	40000	40000	40000
2000	4	40000	40000	40000	40000 ;

Scalar

IT Investissement Total / 900000000 /

F Forage Max annuel / 90000 /

Ia Invest Min annuel / 200000000 / ;

Variables

M(I,J) Métrage Fore en J durant I

B(J) / Nord 6.114E-6
 Illizi 2.8E-6
 Trias 1.52E-6
 Ouest 4.74E-7 /

L (J) / Nord 326.82
 Illizi 82599000
 Trias 807.93
 Ouest 7.23E15 /

LC(J) Constante de la fonction logistic ;

$$LC(J) = L(J)/(1 + \exp(A(J)));$$

Parameter

DCumInit(J) Découverte Cumuléé initiale;

$$DCumInit(J) = L(J)/(1+\exp(A(J) - B(J) * FCumInit(j))) - LC(J);$$

Parameter

DElem(I,J) Découverte due au forage du district j l'année i;

$$DElem('1',J) = L(J)/(1+\exp(A(J) - B(J) * (M.L('1',J)+ FCumInit(j)))) - LC(J) - DCumInit(J);$$

$$DElem('2',J) = L(J)/(1+\exp(A(J) - B(J) * (M.L('2',J) + M.L('1',J) + FCumInit(j)))) - LC(J)- DElem('1',J)-DCumInit(J);$$

$$DElem('3',J) = L(J)/(1+\exp(A(J) - B(J) * (M.L('3',J)+ M.L('2',J) +M.L('1',J) + FCumInit(j)))) - LC(J)- DElem('2',J) - DElem('1',J)-DCumInit(J);$$

$$DElem('4',J) = L(J)/(1+\exp(A(J) - B(J) * (M.L('4',J)+ M.L('3',J) +M.L('2',J) +M.L('1',J) + FCumInit(j)))) - LC(J)- DElem('3',J) - DElem('2',J) - DElem('1',J)-DCumInit(J);$$

Equations

Dec Fonction Objectif

LimForAn(I) Limitation de la capacité totale annuelle

MinIA(I) Investissement Minimum annuel

LimIT Limitation de l'investissement total;

Dec .. $Z = E = \text{Sum}((I,J), DElem(I,J));$

LimForAn(I) .. $\text{Sum}(J, M(I,J)) = L = F;$

MinIA(I) .. $\text{Sum}(J, M(I,J) * CR(I,J)) = G = IA;$

LimIT .. $\text{Sum}(I, \text{Sum}(J, M(I,J) * CR(I,J))) = L = IT;$

Model Découverte / ALL/;

Solve Decouverte Using NLP Maximizing Z;

Display M.L, M.M;

Le listing détaillé des résultats obtenus après exécution se trouve en annexe II: Programmes et résultats. Nous reprenons dans le tableau V-3 qui suit l'essentiel des résultats :

	Métrage Foré (en mètres)				Total	Découverte Cumulée (en millions de t.e.p)				Total
	1997	1998	1999	2000		1997	1998	1999	2000	
Nord	10000	10000	15023	10000	45023	0.104	0.111	0.172	0.129	0.516
Illizi	20198	24074	40000	40000	124272	13.736	19.838	26.493	27.285	87.352
Ouest	10000	10000	10000	10000	40000	0.175	0.177	0.180	0.183	0.715
Trias	10000	10000	10000	10000	40000	1.913	1.903	1.894	1.885	7.597
Total	50198	54074	75023	70000	249295	15.926	22.029	28.739	29.484	96.180

Tableau V-3 : Résultats obtenus par GAMS

Interprétation des résultats :

L'algorithme du gradient réduit ne garantit pas la convergence vers la solution optimale globale vu la nature de la fonction objectif

En analysant la solution, on constate que les variables duales sont epsilonïques ou nulles (voir Annexe II: Programmes et résultats). Naturellement, elles sont nulles pour les contraintes non saturées. Pour les contraintes saturées, les multiplicateurs de Lagrange sont infinitésimaux.

On peut interpréter cela de deux manières :

- Toute modification " suffisamment restreinte " des contraintes saturées, n'entraînera aucune amélioration notable de la fonction objectif. Ceci signifierait qu'on a un optimum local sans contraintes qui se trouve sur l'intersection des contraintes saturées.
- La précision limitée du solveur (employé par GAMS), soumis à la manipulation de données d'ordre de grandeurs très différents, est à l'origine de cette perte d'information.

Pour mieux comprendre, effectuons un simple calcul :

- Le multiplicateur de Lagrange λ_i peut être vu comme le taux de variation unitaire de la fonction objectif. Si on fait varier d'une unité la contrainte saturée i , la fonction objectif augmente de λ_i .
- La fonction objectif est mesurée en millions de t.e.p et les contraintes sont données en mètre. Il est évident que si on modifie une contrainte d'un mètre (ex: passer de 40000m maximum à 40001m) la fonction objectif ne variera pas de manière sensible.

I.3.2. Résolution par la méthode heuristique

Pour cet algorithme, les traitements les plus importants sont :

- le calcul des taux de découvertes
 - le déroulement du simplexe.
- Calcul des taux (Cf. Chapitre IV: Modélisation du problème).

- Déroulement du simplexe :

le programme de base comporte 41 contraintes et 16 variables. Le programme standard, en ajoutant les variables d'écart, comporte alors 41 contraintes et 57 variables.

La taille du problème est très acceptable, le temps de traitement est relativement faible (moins de 3 secondes).

Nous avons implémenté le programme sous Borland Pascal 7.0. Nous avons utilisé la forme révisé de l'algorithme du simplexe.

Pour cet algorithme, quelque soit la solution initiale (taux de découvertes injectés pour la première itération) il converge toujours vers la même solution, et ce au bout de 5 itérations au plus. Nous l'avons vérifié pour quelques dizaines de solutions initiales différentes, prises soit aléatoirement soit pour des cas extrêmes.

Ceci signifie que quelque soit la direction prise initialement (taux de découvertes) au bout d'une itération du simplexe on se retrouvera sur une solution de base.

Notons simplement que le nombre de solutions de base susceptibles d'être une solution initiale est C_{41}^{16} . Il représente le nombre de matrices carrées de rang 16 contenues dans la matrice contrainte.

A. Résultats

Remarque: Une fois les métrages optimaux déterminés, nous avons estimé la valeur des découvertes de deux manières : à partir des fonctions non linéaires, et par la relation linéaire entre les découvertes et le métrage (découvertes = taux . métrage). La différence notée entre le résultat exact et le résultat approximatif est de l'ordre de 10^{-12} . La solution obtenue par l'heuristique (109.917 millions de t.e.p) est meilleure que celle obtenue par le gradient réduit (96.18 millions de t.e.p).

Résumons les résultats obtenus dans le tableau V-4 :

	Métrage Foré (en mètres)				Total	Découverte Cumulée (en millions de t.e.p)				Total
	1997	1998	1999	2000		1997	1998	1999	2000	
Nord	10000	10000	10000	10000	40000	0.104	0.111	0.118	0.129	0.462
Illizi	40000	24074	27111	34588	125773	36.104	19.858	20.818	24.365	101.145
Ouest	10000	19000	10000	10000	40000	0.175	0.177	0.180	0.183	0.715
Trias	10000	10000	10000	10000	40000	1.913	1.903	1.894	1.885	7.595
Total	70000	54074	57111	64588	245773	38.296	22.049	23.01	26.562	109.917

Tableau V-4 : Résultats obtenus par l'heuristique

B. Application du test de validation du résultat

Le test développé dans la partie modélisation (Chapitre IV: Modélisation du problème - Test de validation des résultats) est mis en œuvre avec les données suivantes :

- Nombre d'échantillons : $N = 5000$
- Taille des échantillons : $m = 1000$.

Nous avons implémenté le test sous Borland Pascal 7.0. le tirage des échantillons se fait par la fonction Random

Il faut savoir qu'après un certain nombre d'itérations, les algorithmes produisant des nombres pseudo-aléatoires finissent par dégénérer (périodicité). Pour éviter cela, il faut réinitialiser la fonction Random régulièrement¹.

On tire aléatoirement 5000 échantillons de taille 1000 parmi la population mère des solutions réalisables (ensemble des vecteurs décisions qui respectent les contraintes). Il existe plusieurs tests permettant de vérifier que les vecteurs tirés sont indépendants. Citons en particulier le test de l'hypothèse aléatoire de Kendall et Stuart et le test d'autocorrelation de Durbin Watson. La taille de notre série de vecteurs est suffisamment importante pour les appliquer.

Nous avons appliqué le test de l'hypothèse aléatoire de Kendall et Stuart. Les vecteurs générés se sont avérés, selon ce test, indépendants. L'échantillonnage se fait donc aléatoirement, les vecteurs sont indépendants et le nombre et la taille des échantillons sont suffisamment grands. Les conditions d'application du théorème de Fisher, Tippett et Fréchet étant satisfaites, on conclut donc que les maximum des échantillons suivent une loi de Weibull dont les paramètres restent à estimer.

Pour ce faire on utilise le logiciel d'ajustement des lois " Unifit "(Cf. Annexe VI: Présentation des logiciels utilisés).

Estimation des paramètres :

Nous avons trois paramètres à estimer :

- a : le paramètre de position,

¹ La réinitialisation se fait par la fonction randomize qui utilise l'horloge de l'ordinateur pour générer une solution de départ. Il faut veiller à ce que l'intervalle de temps entre 2 appels de randomize soit suffisamment long pour éviter de prendre deux fois le même nombre.

- b : le paramètre d'échelle,
- c : le paramètre de forme.

Unifit donne au paramètre de position la plus petite valeur observée dans l'échantillon. Cependant, nous pouvons donner la valeur exacte et ce en considérant les contraintes du problème. Sachant que l'on ne peut forer moins de 10000 m par année et par district, et que le minimum à investir est de 200 millions de SLS, la plus petite valeur que peut prendre le paramètre de position " a " est 45.54 millions de t.e.p.

Unifit estime les paramètres b et c par la méthode du maximum de vraisemblance. L'estimateur obtenu est sans biais et de variance minimale, c'est donc le meilleur estimateur.

On obtient les résultats suivants :

$$a = 45.54$$

$$b = 28.72$$

$$c = 4.5$$

Remarque : Le paramètre c est compris entre 4 et 5, ce qui est caractéristique d'une loi normale. Ceci s'explique par le fait que le nombre d'observations est très important, le théorème central limite est donc tout à fait applicable. L'ajustement par la loi normale est d'ailleurs très satisfaisant.

Nous utilisons le test de Kolmogorov-Smirnov pour tester l'hypothèse: la distribution suit une loi de Weibull de paramètre a, b et c. Avec un risque $\alpha = 0.01$ on ne peut rejeter significativement cette hypothèse.

Calculons à présent la probabilité pour qu'il existe une solution meilleure que celle obtenue par l'heuristique:

$$P(Z > 109.9) = \exp \left[- \left(\frac{109.92 - 45.54}{28.72} \right)^{4.52} \right]$$

$$P = 2.06 \cdot 10^{-17}$$

Cette probabilité est très faible. Cela nous laisse penser que même s'il existe une solution meilleure, la solution obtenue est toutefois très bonne.

Par ailleurs, il convient de rappeler qu'au départ, nous ne disposions d'aucune information concernant la solution éventuelle du problème posé. Nous pourrions donc considérer comme tout à fait satisfaisante la solution obtenue par le PNL (solution optimale locale). Cependant, une étude approfondie du modèle nous a permis d'aboutir, par le biais de l'heuristique proposée, à un meilleur résultat.

C. Interprétation des résultats :

Les découvertes totales espérées pour la période d'étude approchent 110 millions de t.e.p.

Dans le tableau V-4, il apparaît clairement que la plus grande partie des découvertes (98.93%) provient des régions relativement bien explorées et avancées du point de vue travaux d'exploration, à savoir la région d'Illizi et la région Trias.

Les pourcentages des découvertes de chaque région sont les suivants :

	% des découvertes
Nord	0.42%
Illizi	92.02%
Ouest	0.65%
Trias	6.91%

On peut expliquer cela en analysant le tableau V-5. Le taux de découverte de la régions d'Illizi est bien plus important que celui des autres régions (plusieurs dizaines de fois supérieur à celui des régions Nord et Ouest). Cependant, à l'instar de la région Trias, il décroît durant les 4 années. Ce qui est caractéristique des régions matures.

Au contraire, les taux de découvertes des régions Nord et Ouest sont faibles et croissent. Ce qui est caractéristique des régions immatures.

Taux de découvertes				
(en milliers de t.e.p / km)				
	1997	1998	1999	2000
Nord	10,4	11,1	11,8	12,9
Illizi	902,6	824,8	767,8	704,4
Ouest	17,5	17,7	18	18,3
Trias	191,3	190,3	189,4	188,5

Tableau V-5 : Taux de découvertes (en milliers de t.e.p / km)

Le diagramme V-1 suivant représente la capacité de forage utilisée chaque année. Le pourcentage par rapport à la capacité totale en place, soit 90000m, est compris entre 60% et 78%.

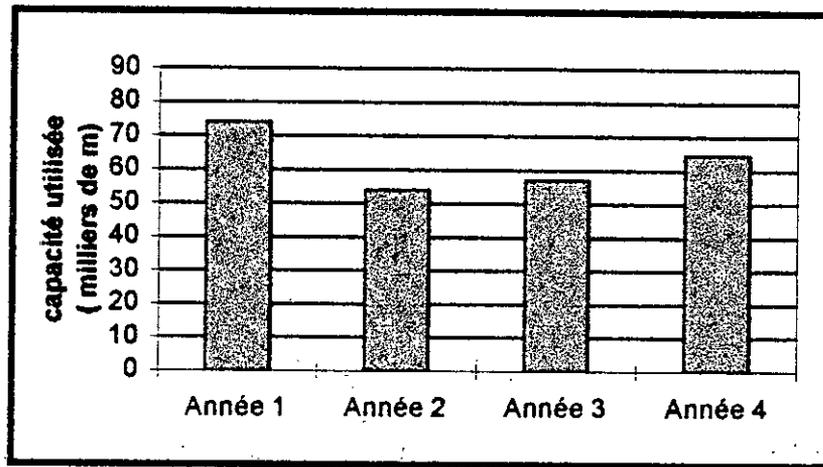


Diagramme V-1 : Capacité utilisée par année

En inspectant l'historique du métrage foré donné en Annexe I on constate que le taux d'utilisation pour les 6 dernières années est de l'ordre de celui prévu.

Le métrage décidé pour les régions Ouest, Nord et Trias est de 10000 m chaque année, ce qui représente le minimum imposé (contrainte stratégique).

Ce résultat était prévisible car le taux moyen de découvertes de la région Illizi, qui est de l'ordre de 800 milliers de t.e.p / km, reste encore très important par rapport aux taux des autres régions. Le métrage le plus important est alloué à la région d'Illizi, à savoir 51.2% du métrage total décidé pour la période d'étude, comme indiqué sur le diagramme V-2:

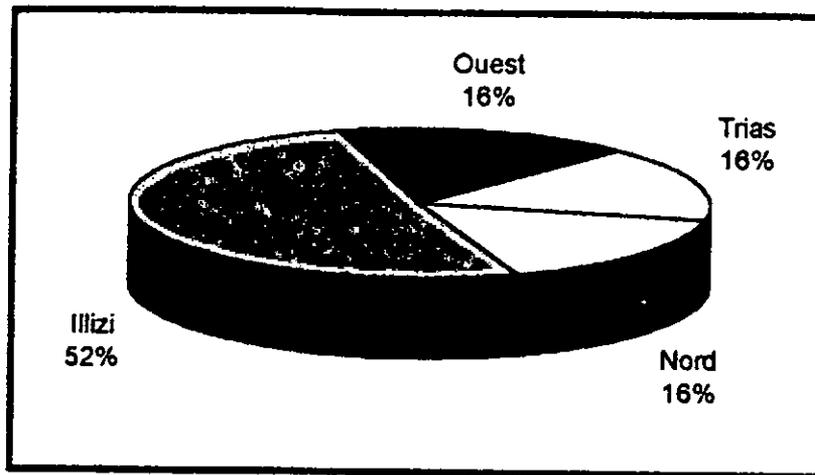


Diagramme V-2 : Pourcentage du métrage à forer par district sur les 4 ans

Pour les régions peu connues dont les taux de découvertes sont faibles (c'est le cas pour les régions Nord et Ouest), des forages d'exploration à haut risque sont lancés : bien que les découvertes espérées soient faibles, les informations obtenues concernant le terrain nous permettront de donner lieu à des implantations futures plus efficaces. L'investissement dans ce cas correspond à ce qu'on appelle dans le domaine d'exploration à un *achat d'informations*.

Remarque: Le fait que le coefficient de corrélation de la courbe ajustée du district Nord soit relativement faible, pourrait faire penser que la prévision serait médiocre et que l'on prendrait un risque sur la décision. Cependant, le métrage alloué est le minimum imposé (stratégie de l'entreprise). Le risque de prendre une décision sur la base de résultats surestimés est donc écarté.

Le tableau V-6 indique le budget consommé pour chaque district chaque année ainsi que les totaux par année et par district. Comme nous le constatons, les ressources disponibles (900 millions de \$) ont été entièrement épuisées.

Le niveau d'investissement de la 1^{ère} et 4^{ème} années est supérieur au minimum imposé. Pour ce qui est de la 2^{ème} et 3^{ème} années, l'investissement est fixé par la contrainte stratégique du budget minimum annuel.

	Coûts de forage (en milliers de \$)				Total
	1997	1998	1999	2000	
Nord	37526	34738	32828	31514	136606
Ilizi	165624	92275	98201	120276	476376
Ouest	35646	32998	31182	29936	129762
Trias	43198	39990	37790	36278	157256
Total	281994	200001	200001	218004	900000
Invest.min	200000	200000	200000	200000	

Tableau V-6 : Coûts de forage (en milliers de \$ courant)

Le diagramme V-3, ci dessous, montre que le district Ilizi , en utilisant 52.9% du budget total, reste celui pour lequel on consentira le plus d'efforts d'exploration, à moins qu'une importante découverte ne se fasse dans les autres régions durant les années à venir, ce qui risque probablement de se produire vu le potentiel important de ces régions.

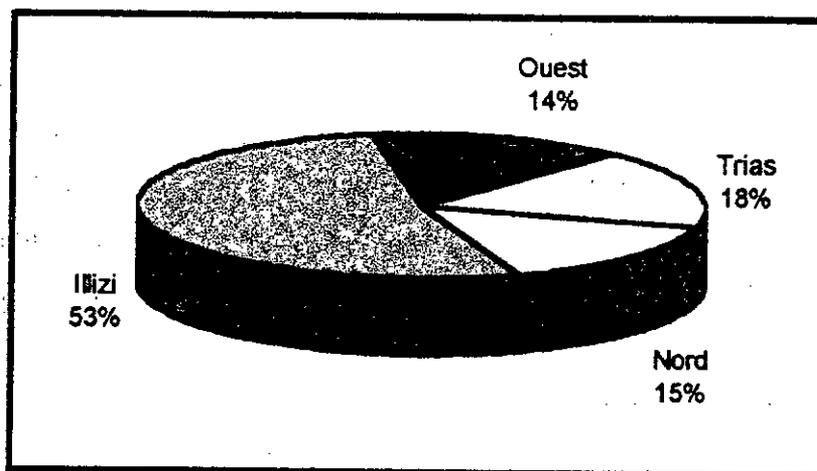


Diagramme V-2 : Pourcentage du budget consommé par district sur la période de planification

Après avoir obtenu les résultats de la répartition des ressources entre les districts, nous allons à présent déterminer le programme optimal de forage au niveau de chaque région.

II. MODELE DE REPARTITION INTRA-DISTRICT

Pour la répartition inter-district, l'application ne s'est faite que pour une partie du district Illizi. La confidentialité de toutes les autres données existantes ne nous a pas permis de faire d'autres applications.

II.1. PRESENTATION DU CAS TRAITE

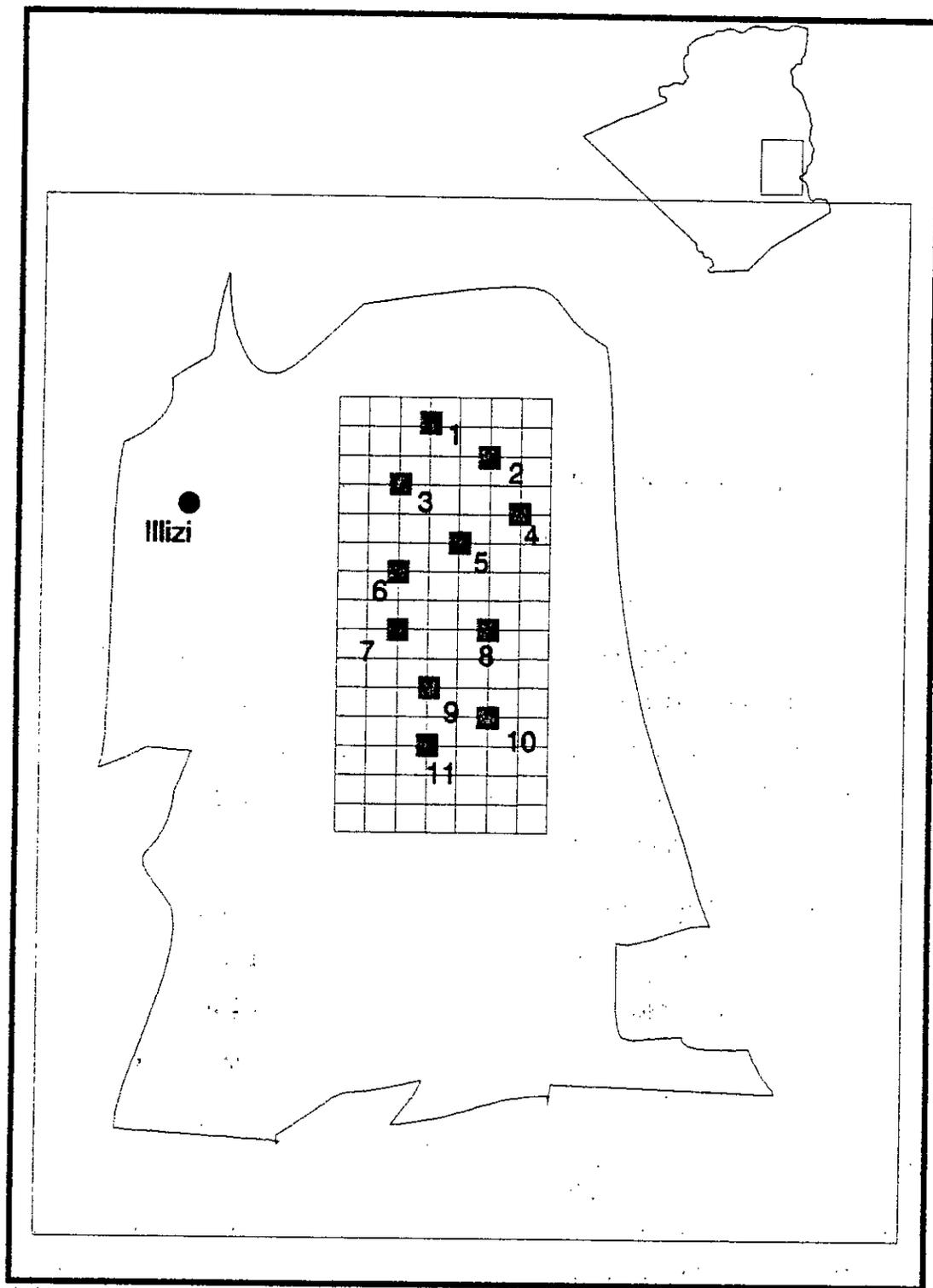
Le cas que nous avons à traiter est caractérisé par les données suivantes :

- Superficie de la région : 4000 km² (soit 100km x 40km).
- Envergure moyenne d'un réservoir d'hydrocarbures observée dans cette région : 6.65km (une superficie moyenne de 40km²)
- Scénarios :

Nous avons exposé à un expert de la SONATRACH la méthode de construction d'une grille en tenant compte de la contrainte de densité (la distance entre 2 points de la grille doit être de l'ordre de 6.65 km). A partir des informations dont il dispose (profil sismique, études géologiques, etc.) et de son analyse de l'évolution du système, l'expert nous a proposé 5 scénarios avec une appréciation de leur probabilité respective de réalisation.

Sur la grille proposée, quelques points seulement ont été désignés au moins une fois par un scénario comme points potentiels favorables au forage. C'est à dire qu'ils sont susceptibles de se trouver au dessus d'un dépôt d'hydrocarbures. Les autres points de la grille, ne présentant aucun intérêt, ne seront pas considérés dans le déroulement de l'algorithme.

Nous présentons ci dessous la grille sur laquelle les points potentiels sont marqués d'un signe et numérotés arbitrairement de 1 à 11. Il y a 11 points ($j = 1, 11$).



Grille de points potentiels pour la région d'Illizi

Les différents scénarios élaborés figurent dans le tableau V-7, pour chaque point et pour chaque scénario, la profondeur de forage estimée à laquelle il faudrait forer pour

atteindre le dépôt est précisée. Les profondeurs proposées varient entre 1500m et 3500m par pas de 500m. Il y a 5 profondeurs ($k = 1,5$).

Les pondérations des scénarios sont respectivement:

$$q_1 = 0.1, q_2 = 0.15, q_3 = 0.5, q_4 = 0.2, q_5 = 0.05.$$

Le tableau des scénarios est le suivant :

Scénarios	Points potentiels favorables au forage										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-	3000	-	-	-	-	3000	-	-	3000	-
2	3500	-	-	3000	-	3500	-	-	3000	-	-
3	-	3500	-	-	-	3000	3500	2000	-	-	-
4	-	-	3500	3500	3000	-	-	-	-	3500	2500
5	3000	-	3500	-	3500	3000	-	-	2000	-	-

Tableau V-7 : Scénarios

- Ressources disponibles (R) : la ressource allouée au district Illizi pour la première année, obtenue par le modèle de répartition inter-districts, est 40000 m. Seuls 35% de cette ressource, soit $R = 14000$ m doivent être utilisés (sur demande de la SONATRACH).
- Ressources consommées (r_{kj}) : la ressource consommée pour chaque forage est égale à la profondeur k du puits au point j.

$$r_{1j} = 1500 \text{ m}, r_{2j} = 2000 \text{ m}, r_{3j} = 2500 \text{ m}, r_{4j} = 3000 \text{ m}, r_{5j} = 3500 \text{ m pour } j = 1, 11.$$

II.2. RESULTATS ET INTERPRETATIONS :

Le programme optimal de forage obtenu détermine les sites de forage à aménager :

Points	Profondeurs
1	3500 m
2	3000 m
3	3500 m
6	3000 m

Le programme obtenu prévoit, pour la première année, 4 forages à lancer pour la région étudiée.

Tous les scénarios ont été satisfaits. Si un scénario coïncide avec la réalité, on fera au moins une découverte pour l'année.

Remarquons que les ressources totales disponibles (14000 m) n'ont pas été entièrement épuisées pour satisfaire les scénarios. Le métrage total à forer est 13000 m. Si le scénario n°3, le plus probable, coïncide avec la réalité, alors trois découvertes au moins seront faites.

Conclusion

Pour le district Illizi, nous avons déterminé le programme annuel de forage pour la période d'étude. A partir de là, nous avons pu établir, pour la première année, la sequence de sites de forage qui maximise les chances de découvertes.

Le même cheminement doit être suivi pour les régions : Nord, Ouest et Trias.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objet de notre étude était d'élaborer un outil d'aide à la décision apte à fournir, compte tenu des contraintes budgétaires, techniques, stratégiques et temporelles, un programme optimal de forage pour une période d'étude à moyen terme.

Après avoir exposé le problème, il s'agissait pour nous de choisir la méthode adéquate pour sa résolution. Ceci nous a mené à passer en revue un certain nombre de travaux relevant du domaine.

La diversité des études consacrées, dont certaines ont été brièvement exposées, fait apparaître un système complexe et montre que le choix de la méthode dépend des caractéristiques et du degré de connaissance du système étudié.

La modélisation du problème s'est faite à deux niveaux. Le choix du modèle, pour chaque niveau, s'est fait sur la base des caractéristiques du domaine minier algérien et de la nature des données disponibles.

Pour le premier niveau, il s'agissait de déterminer une répartition optimale des ressources entre les districts. L'aspect du problème nous a mené à utiliser la programmation dynamique. Cette dernière s'est avérée inapplicable.

Nous avons alors reformulé le problème sous forme de programme non linéaire. La résolution de ce dernier a fourni un résultat que l'on peut estimer satisfaisant. Cependant, ce résultat pouvait être amélioré, c'est pourquoi nous avons développé une heuristique efficace qui a fourni une solution meilleure que celle obtenue précédemment. Nous avons par la suite construit un test statistique pour valider cette solution.

Pour le deuxième niveau, il s'agissait de déterminer, pour chaque région, la séquence de sites de forage qui maximise les chances de découvertes. Pour ce faire, nous avons développé le modèle proposé par P. KOLESAR [KOL, 82]. Nous avons résolu le problème par l'algorithme de Balas en $\{0, 1\}$ qui reste efficacement applicable tant que le nombre de points potentiels ne dépassent pas 50.

L'outil élaboré comporte deux modules, un pour chaque niveau, qui ont été testés pour leur rapidité d'exécution et l'espace mémoire qu'ils consomment.

Nous avons mis en œuvre cet outil pour une application au domaine minier algérien dans sa totalité pour le premier niveau et pour une partie de la région d'Ilizi pour le deuxième niveau. La qualité des résultats dépend essentiellement de la fiabilité et de la quantité des données disponibles. Pour la répartition inter-districts (niveau 1), les résultats sont fournis pour une période de 4 années. Par contre, le programme d'implantation de forage (niveau 2) n'est établi que pour la première année. Cela s'explique par le fait que les scénarios proposés par les experts risquent de changer sensiblement d'une année à l'autre suite à l'acquisition d'informations.

Il serait donc intéressant de reprendre le modèle de répartition intra-district en introduisant le concept de réduction de l'incertitude à travers le temps afin de proposer, pour chaque district, un programme annuel d'implantation de forages pour la période de planification.

L'analyse des résultats montre que l'augmentation des moyens utilisés pour l'exploration des régions peu connues engendrerait un accroissement considérable du gain. La SONATRACH ne pouvant faire face, à elle seule, à de tels investissements, le partenariat avec des sociétés de recherche pétrolière étrangère devient une nécessité objective.

GLOSSAIRE

GLOSSAIRE

Bassins sédimentaires

Ce sont les creusets où, à partir de matières organiques, dans le cadre de multiples phénomènes de sédimentation et de diagenèse, naissent les hydrocarbures.

Un bassin sédimentaire peut être défini comme une zone subsidente possédant un certain volume de sédiments restés préservés sous une forme relativement simple. Nous distinguons trois types de bassins :

Bassins marginaux :

Dépôts sur les bordures des continents. Remplissage sédimentaire peu épais, s'accumulant lentement sur des côtes relativement stables; ou remplissage sédimentaire épais, se déposant rapidement sur des bordures continentales mobiles, qui s'enfoncent rapidement. Ex : Algérie du Nord.

Bassins primaires dynamiques :

Ces bassins situés entre des soulèvements, constituent des unités géotectoniques et géomorphologiques indépendantes. Ce type comprend les bassins en cuvette tels que : les bassins de Tindouf, Reggane, Illizi, et du Trias.

Bassins secondaires dynamiques :

Formés par affaissement local de la croûte terrestre sur les crêtes et les flancs de soulèvements régionaux.

Carottage

Opération qui consiste, au cours d'un forage, à prélever des échantillons de terrains, soit dans le fond du trou, soit latéralement à partir de ses parois.

Carotte

Échantillon de terrain de forme grossièrement cylindrique, prélevé dans un trou de sondage au moyen d'un carottier. Le terme " carotte " vient du fait que les premiers carottiers n'ayant pas de dispositif de protection de l'échantillon, la partie supérieure de celui-ci était érodée par le courant de boue et prenait une forme conique rappelant celle d'une carotte.

Carte de faciès

Elle indique la nature des milieux et de leurs relations.

Carte de manifestations de pétrole

Elle indique la répartition quantitative et qualitative des hydrocarbures.

Carte isopaque

Elle donne une idée de la répartition quantitative des sédiments.

A elles trois, les cartes constituent la seule base permettant de comprendre ou de prédire la présence de pétrole.

Champ pétrolier

Zone pétrolifère d'étendue variable donnant lieu à la production d'hydrocarbures naturels, constituant une seule entité géologique, structurale et stratigraphique. Un champ peut comprendre un seul gisement ou plusieurs gisements voisins.

Diagraphie

Opération d'enregistrement d'une ou de plusieurs caractéristiques des roches traversées par un sondage en fonction de la profondeur.

Erosion

Ensemble des phénomènes constitués par la dégradation du relief, le transport et l'accumulation des matériaux arrachés.

Gaz cap

Gaz de sommet de gisement; calotte de gaz. Gaz libre ou partiellement dissout dans le pétrole, qui se trouve à la partie supérieure d'un gisement. Son expansion contribue à la remontée du pétrole dans les puits en cours de production.

Gisement

Il peut être défini comme un réceptacle : roche réservoir, perméable, clos à la fois par une couverture formée d'une roche imperméable et par une disposition favorable du sous-sol appelée piège.

Immaturité d'une région

La région sera dite immature si les découvertes ont tendance à augmenter.

Si les découvertes montrent une tendance générale constante, la zone est en transition d'immature à mature.

Maturité d'une région

La région pétrolière mature est définie comme étant la région qui, après un nombre de forages relativement important de puits d'exploration, voit le nombre de ses découvertes décroître, présentant ainsi un profil décroissant dans ces découvertes.

Migration

Déplacement d'hydrocarbures dans les formations géologiques sous l'effet de forces naturelles telles que les différences de densité entre les roches et les fluides, la masse du terrain, la pression hydraulique due à la présence d'eau. On dit qu'il y a " dysmigration " lorsque les hydrocarbures se trouvent poussés jusqu'à la surface du sol où ils se manifestent par des indices superficiels et que la migration est " parallèle " quand ils se déplacent dans des zones perméables parallèlement au plan de stratification. La " migration primaire " est celle qui conduit les hydrocarbures de la roche-mère à la roche réservoir et la " migration secondaire " celle qui aboutit à leur empiègement et à la formation d'un gisement.

Minéral (Corps)

Corps qui appartient aux minéraux. Corps inorganique tirant son origine des minéraux.

Organique (Corps)

corps formé par des débris d'organismes vivants.

Perméabilité

La perméabilité est une grandeur physique. Elle est définie comme étant la quantité de fluide traversant, par unité de temps et sous l'effet d'une pression unité, un prisme de section et de longueur unité de la matière considérée. En fait, elle mesure la facilité avec laquelle un fluide traverse un milieu donné.

Piège

Le piège, pièce centrale de l'exploration pétrolière, est une zone fermée, présentant généralement un potentiel relativement faible par rapport aux zones voisines. Tous les gisements correspondent à un piège, la réciproque n'étant évidemment pas vraie.

Porosité

La porosité de la roche-réservoir est une grandeur purement géométrique. C'est le rapport, exprimé en pourcentage, du volume des vides au volume total.

Profil sismique

Profil qui donne des renseignements utiles sur l'allure des couches souterraines de la région explorée. Etabli à partir de l'interprétation des sismogrammes.

Profil stratigraphique

C'est la description suivant l'échelle stratigraphique des roches rencontrées sur le terrain dans une région ou dans un forage. On dresse aussi des profils sédimentologiques.

Réduction

Réaction dans laquelle on enlève l'oxygène à un corps qui en contient ou, plus généralement, dans laquelle un atome ou ion gagne des électrons.

Réservoir-engineering

Etude des gisements. Ensembles des études visant à la connaissance aussi parfaite que possible d'un gisement et à son exploitation rationnelle, on distingue les trois phases suivantes:

1. L'investigation, dont le but est de rassembler les renseignements nécessaires à la connaissance du gisement.
2. L'interprétation de ces renseignements.
3. Les prévisions sur le comportement futur du gisement et l'élaboration d'un programme d'exploitation rationnelle.

Roche-magasin (réservoir)

Dans un gisement c'est la ou les couches imprégnées d'hydrocarbures. Elle est également appelée réservoir.

Roche mère

C'est une formation géologique sédimentaire, au sein de laquelle se sont déposées en même temps qu'elle les matières organiques qui ont donné naissance aux hydrocarbures.

Ce sont des roches constituées de dépôts fins : argiles, marnes, formations argilo-sableuses.

De la roche mère les hydrocarbures, d'une façon très générale, migrent vers les roches-réservoirs dont les deux caractéristiques sont la porosité et la perméabilité.

Sédiment

Dépôt qui se forme dans un liquide où des substances sont en suspension. D'après leur origine, les sédiments peuvent être marins, fluviaux, lacustres, glaciaires, etc.

Sondage

Terme figurant rarement dans le langage pétrolier où il ne s'emploie plus que pour désigner des forages d'exploration. Par exemple : sondages de reconnaissance géologique.

Taux de remplacement

C'est le rapport entre le volume d'hydrocarbures récupéré en une année et le volume d'hydrocarbures consommé durant la même année.

T.e.p

Tonne équivalent pétrole : grandeur utilisée pour exprimer et comparer des énergies de sources différentes et égales à l'énergie moyenne dégagée par la combustion d'une tonne de pétrole. 1 Tonne équivalent pétrole = 1.5 tonne équivalent charbon.

Trépan

Outil utilisé pour la désagrégation mécanique des roches en vue de pénétrer progressivement dans le sous-sol et d'y creuser un trou de section circulaire. Dans l'industrie du pétrole l'usage du mot trépan remonte à l'époque où l'on forait par battage, puis il s'est étendu aux outils de forage par rotation.

Workover

Travaux d'entretien, de réparation ou de rééquipement que l'on effectue au cours de l'exploitation d'un puits.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

I. OUVRAGES ET ARTICLES UTILISES

[ABA, 75] - *J. ABADIE*

Problèmes d'optimisation

Notes de cours, Conservatoire Nationale des Arts et Métiers -
Recherche Opérationnelle, 1975.

[ATT, 95] - *A. ATTAR, M. HAMMAT*

Le potentiel en hydrocarbures de l'Algérie.

L'explorateur Pétrolier n°3, pp. 4 -11, Sonatrach, Nov. 1995.

[BAC, 85] - *A R. BACKHOUSE & P BEHRENBRUCH, G J TURNER*

**Probabilistic hydrocarbon reserves estimation : A Novel Monte
Carlo Approach**

Society of Petroleum Engineering of AIME, article n°13982
préparé pour la conférence "Offshore Europe 85", Dec. 1985.

[BAR, 80] - *J. BARBIER*

Dictionnaire du pétrole.

Edition Dunod, 1980.

[CHA, 61] - *J. CHAPELLE. J. FLANDRIN*

Le pétrole.

[CHE, 92] - *H.C. CHEN, J.H. FANG, LI-HUA LI*

XPROS : A Fuzzy Expert System For Prospect Appraisal.

Revue de l'Institut Français du Pétrole, Vol 47, N° 3, Mai 1992.

[DRE, 77] - *S.E.DREYFUS, A. M. LAW*

The art and theory of Dynamic Programming

Mathematics in Science and Engineering, Vol 130, 1977.

[FOR, 85] - *D.J.FORMAN, A.L.HINDE*

Improved Statistical Method for Assessment of Undiscovered Petroleum Resources.

The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, Vol 69, n°1, pp. 106-118, 1985.

[FUL, 91] - *J.D. FULLER*

A Rapid Method To Simulate Exploration For Hydrocarbons.

Advances in Operations Research in the Oil and Gas Industry,
Zaccour Editors & Editions Technip, pp. 51-61, 1991.

[GEH, 79] - *H. M.GEHMAN, DAVID A. WHITE*

Methods of Estimating Oil and Gas Resources.

The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, Vol69,
N°12, pp. 2183-2192, 1979.

[HAD, 69] - *G. HADLEY*

Non linear & dynamic programming

Addison Wesley Publishing, 1969.

[KOL, 82] - *P. KOLESAR*

On Searching for Large Objects with Small Probes : a Search Model for Exploration

Journal of Operational Research Society, Vol 33, pp. 153-159, 1982.

[LAU, 79] - *J.L. LAURIERE*

Eléments de programmation dynamique

Collection programmation, Gauthier-Villars, 1979.

[MIN, 83] - *M. MINOUX*

Programmation Mathématique, Théorie et Algorithmes

Tomes 1 et 2, Dunod, 1983.

[NGU, 93] - *J.P. NGUYEN*

Techniques d'exploitation pétrolière : Le forage.

Edition Technip IFP, 1993

[RAV, 83] - *A. RAVINDRAN*

Engineering optimization : Methods & Applications

John Wiley & sons, 1983.

[ROC, 96] - *R. DE ROCHEBRUNE*

L'atout maître de Liamine Zéroual

Jeune Afrique, Edition Maghreb, n° 1830, du 31 janvier au 6 février 1996.

[SEG, 86] - *J. SEGURET*

Estimation des réserves ultimes d'hydrocarbures

Revue de l'I.F.P. n°4, vol. 41, pp.210-223, Juil.-Août 1986.

[SAD, 95] - *B. SADAoui*

Elaboration des idées d'exploration

L'explorateur Pétrolier n°2, pp.10-21, Sept. 1995.

[SMI, 70] - *M.B. SMITH*

Probability Models for Petroleum Investment Decisions

Journal of Petroleum Technology, n°2587, pp. 543-550, Mai 1970.

[SON, 88] - *SONATRACH*

Faites connaissance avec les Hydrocarbures

Edité par la Sonatrach / ORG, 1988.

[SON, 93] - *SONATRACH*

Sonatrach: un groupe pétrolier international

Edité par la Sonatrach, 1993.

[SYS, 83] - *M. SYSLO*

Discrete Optimization Algorithms with Pascal programs.

Prentice Hall, 1983

[TAH, 75] - *H.A. TAHA*

Integer Programming, Theory, Applications and Computations.

Academic Press : 1975.

II. OUVRAGES ET ARTICLES CONSULTÉS

[ARE, 96] - *A. AREZKI*

Les grands traits de l'évolution de la Sonatrach

L'explorateur Pétrolier n°4, pp.4 - 8, Janv. 1996.

[AZI, 95] - *A. RAZIBI et K. BELAZZOUG*

Méthode stochastique pour le calcul du gain de l'exploitation d'un champ pétrolier basée sur la réduction de l'incertitude à travers le temps, application SONATRACH

P.F.E Génie industriel E.N.P, 1995.

[BEN, 94] - *M.L BENSALD et H. ZHRIR*

Estimation des réserves ultimes d'hydrocarbures par approche modélisée.

P.F.E Génie industriel E.N.P, 1993.

[CUL, 80] - *G. CULLMANN*

Les chaînes de Markov multiples. Programmation Dynamique.

Edition Masson, 1980.

[GOU, 96] - *S. GOUMEZIANE*

SONATRACH : le second souffle

Jeune Afrique N° 1830, du 31 janvier au 6 février 1996. Edition Maghreb.

[HAM, 95] - *M. HAMROUN*

**Estimation des réserves d'hydrocarbures de la région sud est
d'Algérie**

P.F.E Statistique, INPS, 1995.

[HUA, 71] - *P. HUARD*

Tour d'horizon en programmation non linéaire

E.D.F. Bulletin de la direction des études et recherches, N° 1, 1971.

[PRO, 83] - *Y. PROSKOURLAKOV*

La chimie du pétrole et du gaz.

Edition Mir, 1983

[SOK, 83] - *S. SOKOLOV*

Prospections détaillées de champs de pétrole et de gaz

Edition Mir, 1983.

ANNEXES

ANNEXE I

HISTORIQUES ET COURBES LOGISTIQUES

Années	Découvertes annuelles	Métrage annuel	Découvertes cumulées (en millions de t.e.p)	Métrage foré cumulé (en mètre)
1	0	3920	0.00	3920
2	0	3953	0.00	7881
3	0	18940	0.00	26821
4	0	11699	0.00	38520
5	0	10311	0.00	48831
6	0	0	0.00	48831
7	0	0	0.00	48831
8	0	4329	0.00	53160
9	0	6726	0.00	59886
10	0.66	8577	0.66	68463
11	0	2532	0.66	70995
12	0	8424	0.66	79419
13	0	4005	0.66	83424
14	0	8177	0.66	91601
15	0	14453	0.66	106054
16	0	14562	0.66	120616
17	0	12363	0.66	132979
18	0	10475	0.66	143454
19	0.51	11155	1.17	154609

**Tableau AI-1 : District " Nord "- Découvertes cumulées en fonction
du métrage foré cumulé**

Années	Découvertes annuelles	Métrage annuel	Découvertes cumulées (en millions de t.e.p)	Métrage foré cumulé (en mètre)
1	25.23	4223	25.23	4223
2	0	2117	25.23	6340
3	0	2107	25.23	8447
4	77.91	10924	103.14	19371
5	15.43	26647	118.57	46018
6	0	13914	118.57	59930
7	111.72	21111	230.29	81043
8	19.60	21094	249.89	102137
9	3.79	25465	253.58	127602
10	18.96	21234	272.64	148836
11	49.04	17983	321.68	166819
12	55.89	23892	377.58	190711
13	7.50	27885	385.08	218596
14	7.96	15424	393.04	234020
15	4.08	13744	397.12	247764
16	15.05	20199	412.17	267963
17	28.09	18239	440.26	286202
18	0	8653	440.26	294855
19	4.94	18741	445.20	313596

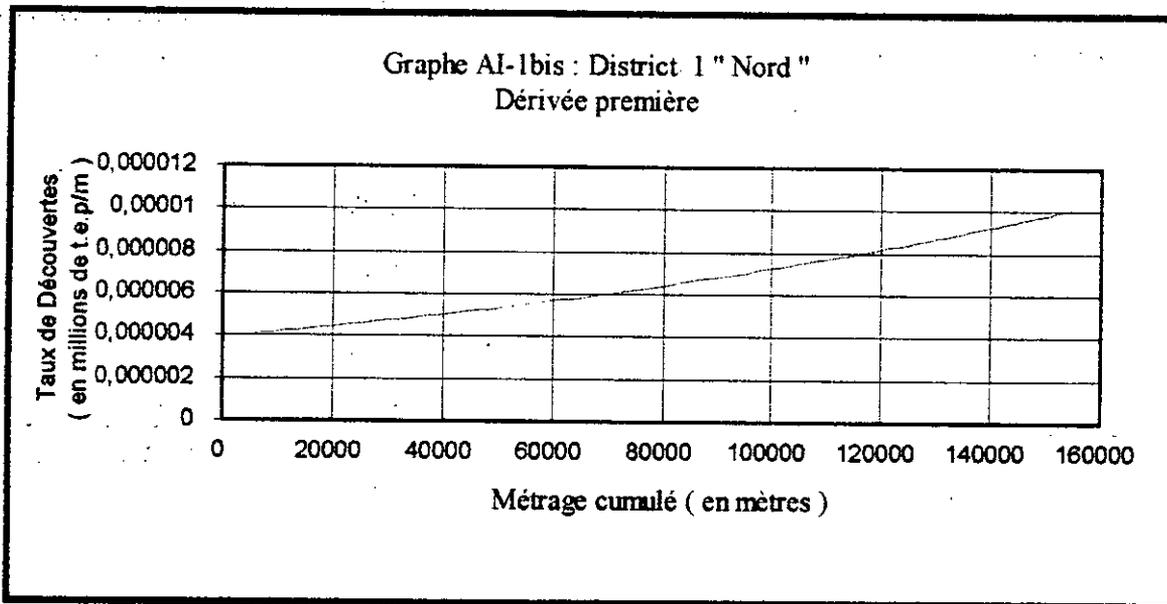
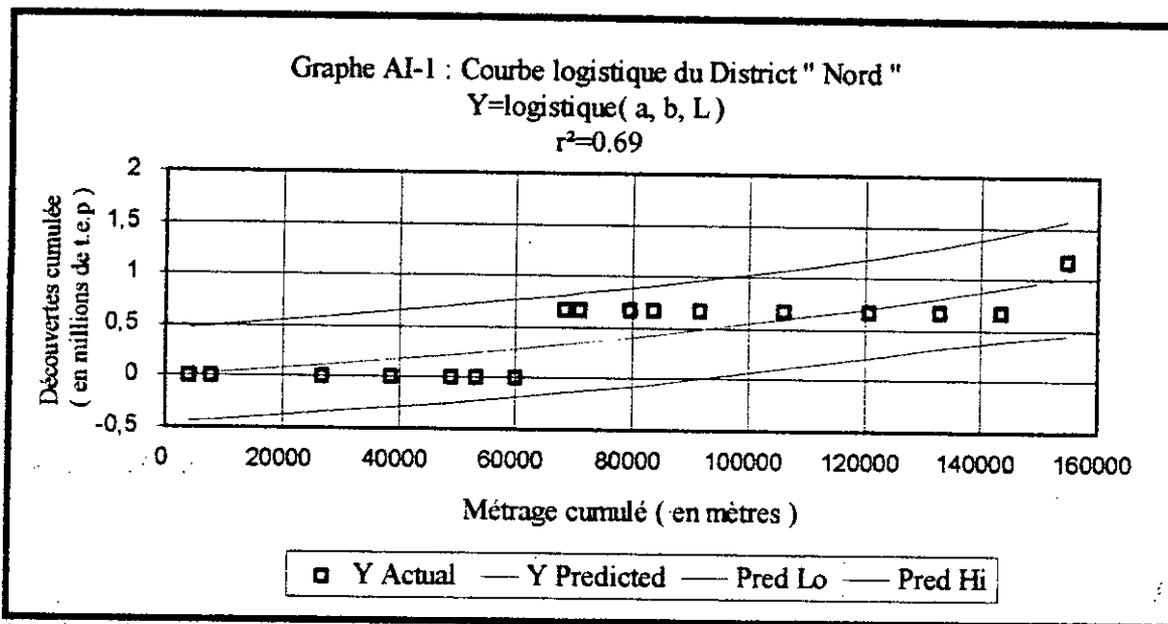
**Tableau AI-2 : District " Illizi " - Découvertes cumulées en fonction
du métrage foré cumulé**

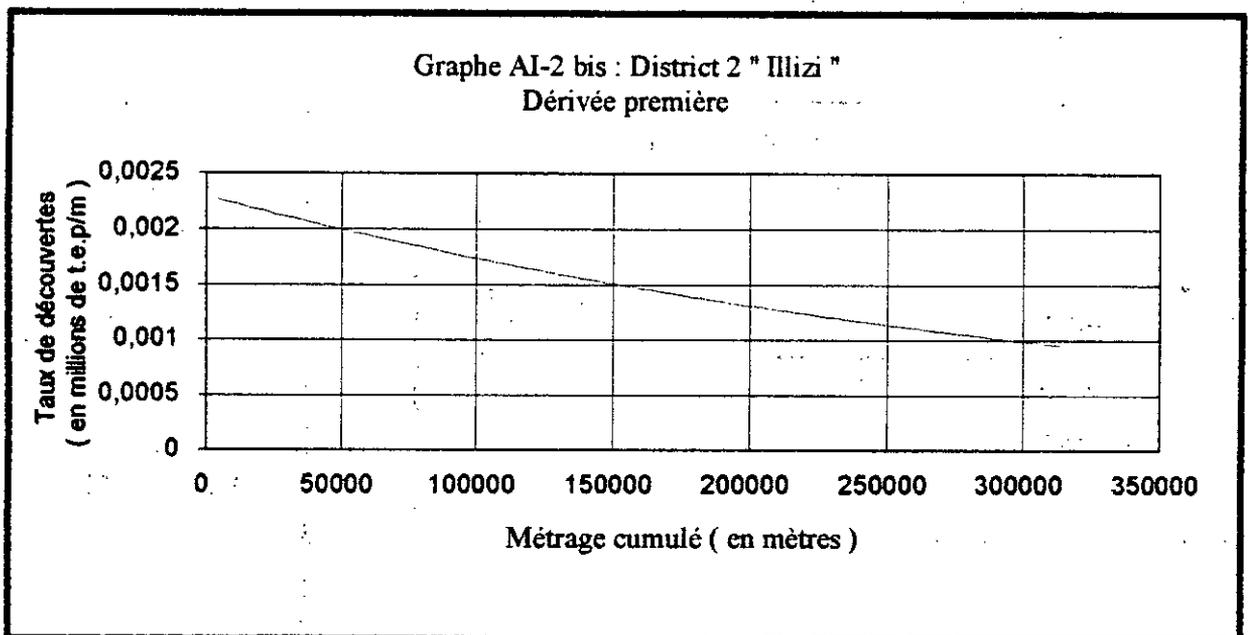
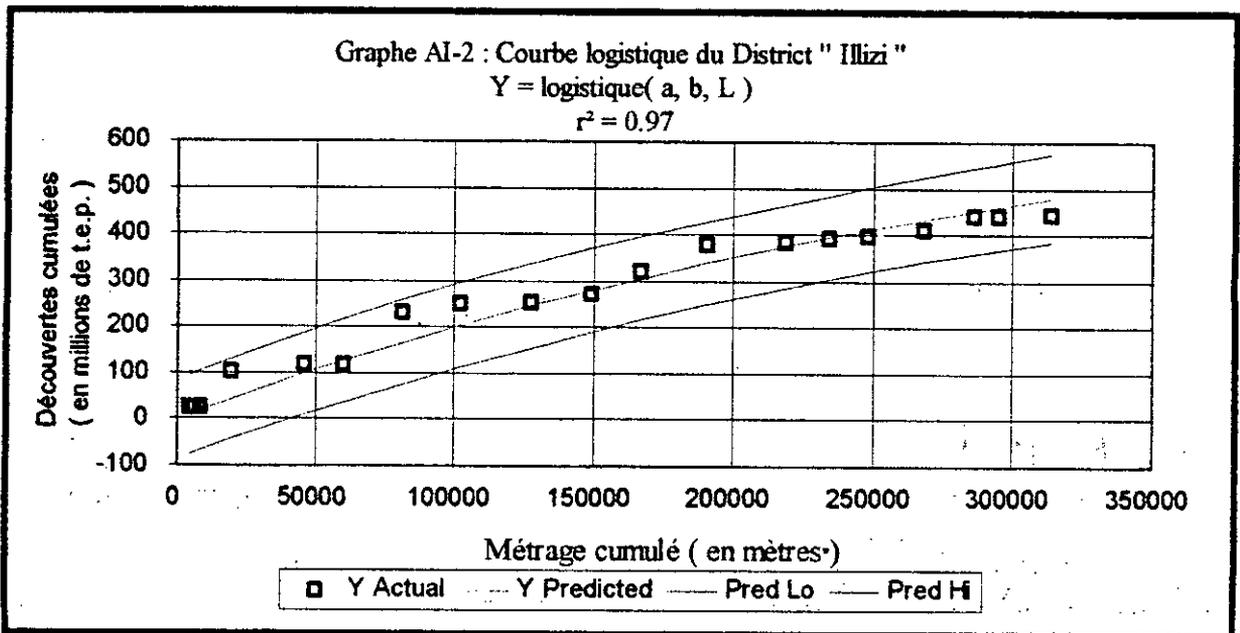
Années	Découvertes annuelles	Métrage annuel	Découvertes cumulées (en millions de t.e.p)	Métrage foré cumulé (en mètre)
1	0	0	0.00	0.00
2	0	1450	0.00	1450
3	0	10277	0.00	11727
4	0	16869	0.00	28595
5	0	9669	0.00	38264
6	21.83	2900	21.83	41164
7	0	4082	21.83	45246
8	0	3717	21.83	48963
9	0	3090	21.83	56053
10	0	6532	21.83	62585
11	0	7585	21.83	70172
12	1.37	11251	23.22	81423
13	5.82	11851	29.04	93274
14	13.44	26200	42.48	119474
15	3.51	17142	45.99	136616
16	12.04	13439	58.02	150054
17	3.83	12746	61.87	162800
18	50.05	11572	111.93	174372
19	22.31	15781	134.23	190153

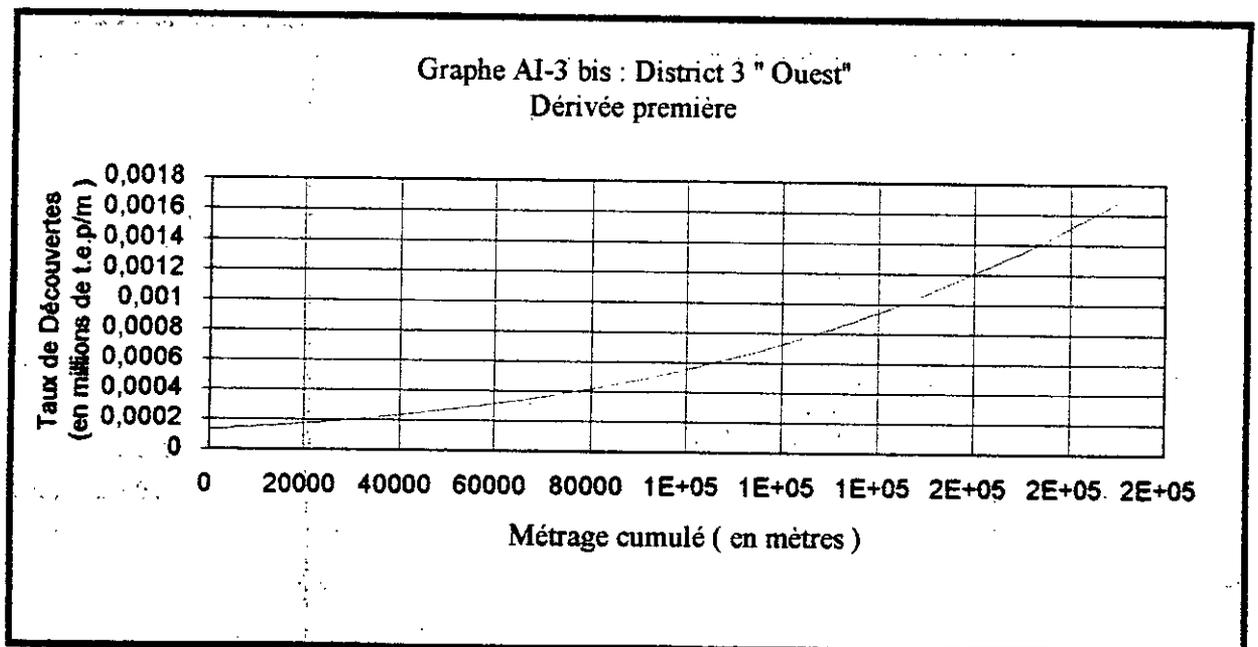
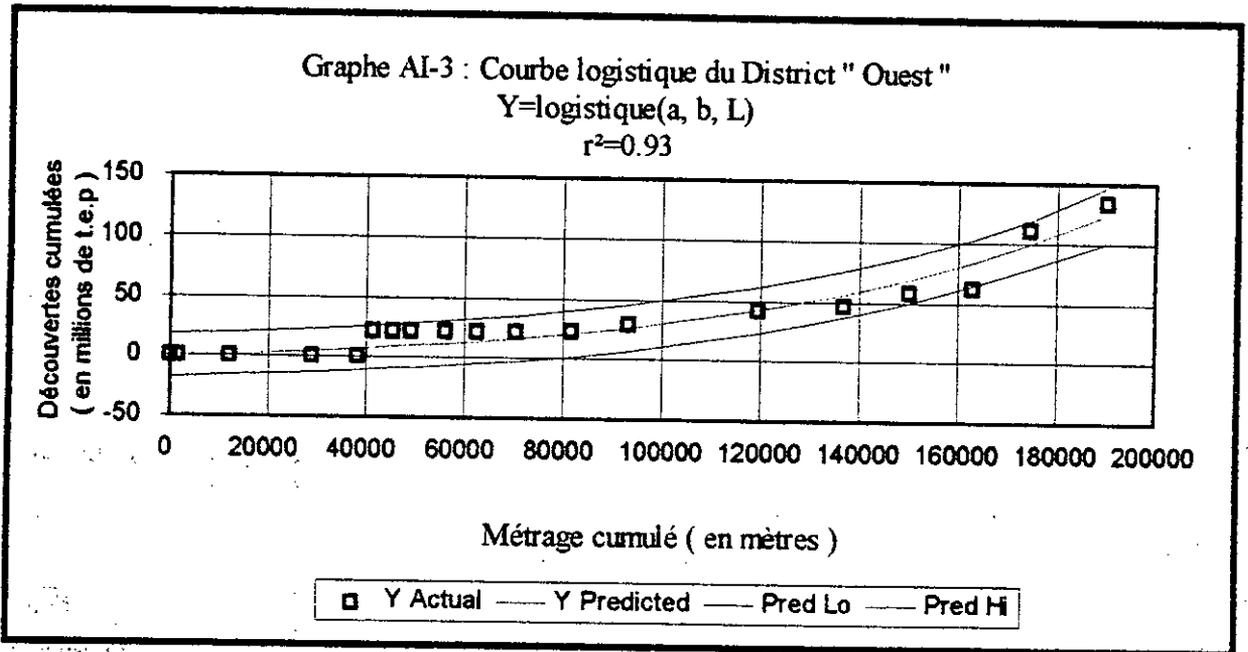
**Tableau A1-3 : District " Ouest "-Découvertes cumulées en fonction
du métrage foré cumulé**

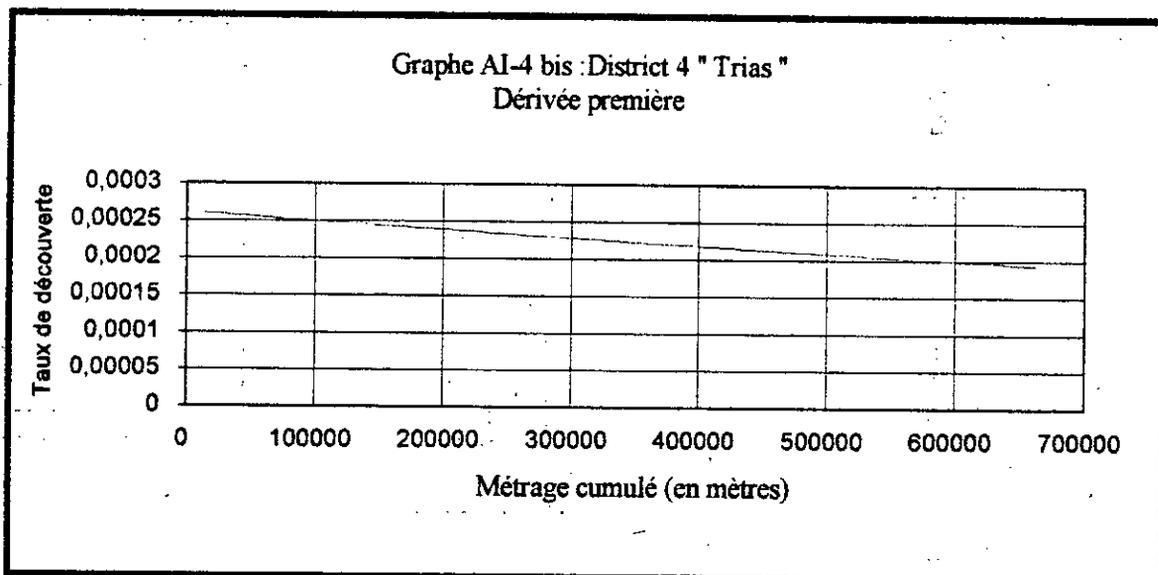
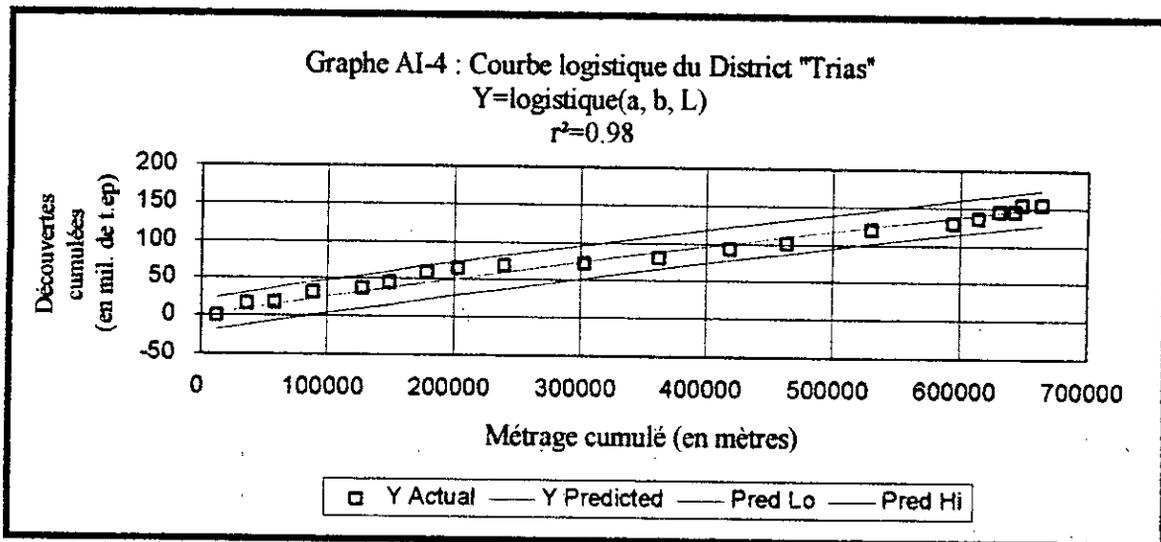
Années	Découvertes annuelles	métrage annuel	Découvertes cumulées (en millions de t.e.p)	Métrage foré cumulé (en mètre)
1	0	12223	0	12223
2	16.06	23615	16.06	35838
3	1.21	22402	17.27	58240
4	13.63	29963	30.90	88203
5	5.95	38948	36.84	127151
6	7.93	20888	44.77	148039
7	14.14	30033	58.92	178072
8	4.80	24554	63.71	202626
9	4.69	37084	68.40	239710
10	3.94	63162	72.34	302872
11	7.74	59733	80.28	362605
12	12.65	55442	92.73	418047
13	8.17	45270	100.90	463317
14	19.48	67209	120.38	530526
15	9.32	63740	129.70	594266
16	6.71	20169	136.41	614435
17	8.35	16020	144.76	630455
18	0	12260	144.76	642715
19	9.46	5453	154.22	648168
20	0	15637	154.22	663805

**Tableau AI-4 : District 4 " Trias " - Découvertes cumulées en fonction
du métrage foré cumulé.**









ANNEXE II

PROGRAMMES ET RÉSULTATS

RESULTATS OBTENUS PAR GAMS

GAMS 2.25.064 386/486 DOS 05/24/96 21:27:33 PAGE 5
 General Algebraic Modeling System
 Symbol Listing

SYMBOL TYPE REFERENCES

Z	VAR	DECLARED	43	IMPL-ASN	116	REF	41
		110 116					

FUNCTIONS

EXP

SETS

I Année
 J District

PARAMETERS

A parametre 'a' de la fonction logistique du district J
 B parametre 'b' de la fonction logistique du district J
 CR Cout unitaire
 DCUMINIT Decouverte Cumule initial
 F Forage Max. annuel
 FCUMINIT Forage Cumule initial
 IA Investissement Min. annuel
 IT Investissement Total
 L parametre 'L' de la fonction logistique du district J
 LC Constante de la fonction logistique
 LM Forage Minimum Annuel
 LN Maximum Annuel forer
 RESULTAT Decouverte due au forage du district j l'annee i

VARIABLES

M Metrage Fore en J durant I
 Z Decouverte Totale

EQUATIONS

DEC Fonction Objectif
 LIMFORAN Limitation de la capacite totale annuelle
 LIMIT Limitation de l'investissement total
 MINIA Investissement Minimum annuel

MODELS

DECOUVERTE

COMPILATION TIME = 5.160 SECONDS VERID MW2-00-064

GAMS 2.25.064 386/486 DOS 05/24/96 21:27:33 PAGE 7
 General Algebraic Modeling System
 Equation Listing SOLVE DECOUVERTE USING NLP FROM LINE 116

---- DEC =E= Fonction Objectif

DEC.. Z =E= 96.18 ; (LHS = 0 ***)

--- LIMFORAN =L= Limitation de la capacite totale annuelle

LIMFORAN(1).. M(1,NORD) + M(1,ILLIZI) + M(1,TRIAS) + M(1,OUEST) =L= 90000 ;
 (LHS = 74000)

LIMFORAN(2).. M(2,NORD) + M(2,ILLIZI) + M(2,TRIAS) + M(2,OUEST) =L= 90000 ;
 (LHS = 62000)

LIMFORAN(3).. M(3,NORD) + M(3,ILLIZI) + M(3,TRIAS) + M(3,OUEST) =L= 90000 ;
 (LHS = 60000)

REMAINING ENTRY SKIPPED

---- MINIA =G= Investissement Minimum annuel

MINIA(1).. 18763*M(1,NORD) + 20703*M(1,ILLIZI) + 17823*M(1,TRIAS)
 + 21599*M(1,OUEST) =G= 1.0000000E+9 ; (LHS = 1.4751180E+9)

MINIA(2).. 17369*M(2,NORD) + 19165*M(2,ILLIZI) + 16499*M(2,TRIAS)
 + 19995*M(2,OUEST) =G= 1.0000000E+9 ; (LHS = 1.1437360E+9)

MINIA(3).. 16414*M(3,NORD) + 18111*M(3,ILLIZI) + 15591*M(3,TRIAS)
 + 18895*M(3,OUEST) =G= 1.0000000E+9 ; (LHS = 1.0468520E+9)

REMAINING ENTRY SKIPPED

---- LIMIT =L= Limitation de l'investissement total

LIMIT.. 18763*M(1,NORD) + 20703*M(1,ILLIZI) + 17823*M(1,TRIAS)
 + 21599*M(1,OUEST) + 17369*M(2,NORD) + 19165*M(2,ILLIZI)

GAMS 2.25.064 386/486 DOS 05/24/96 21:27:33 PAGE 8
 General Algebraic Modeling System
 Equation Listing SOLVE DECOUVERTE USING NLP FROM LINE 116

LIMIT =L= Limitation de l'investissement total

+ 16499*M(2,TRIAS) + 19995*M(2,OUEST) + 16414*M(3,NORD)
 + 18111*M(3,ILLIZI) + 15591*M(3,TRIAS) + 18895*M(3,OUEST)
 + 15757*M(4,NORD) + 17387*M(4,ILLIZI) + 14968*M(4,TRIAS)
 + 18139*M(4,OUEST) =L= 4.5000000E+9 ; (LHS = 4.8962710E+9 ***)

Column Listing SOLVE DECOUVERTE USING NLP FROM LINE 116

--- M Metrage fiore en J durant I

M(1,NORD)

(.LO. .L. .UP = 10000, 10000, 40000)

1 LIMFORAN(1)
 18763 MINIA(1)
 18763 LIMIT

M(1,ILLIZI)

(.LO. .L. .UP = 10000, 30000, 40000)

1 LIMFORAN(1)
 20703 MINIA(1)
 20703 LIMIT

M(1,TRIAS)

(.LO. .L. .UP = 10000, 18000, 40000)

1 LIMFORAN(1)
 17823 MINIA(1)
 17823 LIMIT

REMAINING 13 ENTRIES SKIPPED

--- Z Decouverte Totale

Z

(.LO. .L. .UP = -INF, 0, +INF)

1 DEC

GAMS 2.25.064 386/486 DOS 05/24/96 21:27:33 PAGE 10
General Algebraic Modeling System
Model Statistics SOLVE DECOUVERTE USING NLP FROM LINE 116

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS 4 SINGLE EQUATIONS 10
BLOCKS OF VARIABLES 2 SINGLE VARIABLES 17
NON ZERO ELEMENTS 49 NON LINEAR N-Z 0
DERIVATIVE POOL 3 CONSTANT POOL 0
CODE LENGTH 1

GENERATION TIME = 4.710 SECONDS

EXECUTION TIME = 6.940 SECONDS VERID MW2-00-064

Solution Report SOLVE DECOUVERTE USING NLP FROM LINE 116

SOLVE SUMMARY

MODEL DECOUVERTE OBJECTIVE Z
TYPE NLP DIRECTION MAXIMIZE
SOLVER MINOS5 FROM LINE 116

**** SOLVER STATUS 1 NORMAL COMPLETION
**** MODEL STATUS 1 OPTIMAL
**** OBJECTIVE VALUE 96.18

EXIT - OPTIMAL SOLUTION FOUND

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL
--- EQU DEC 96.178 **96.178** 96.178 1.000

DEC Fonction Objectif

--- EQU LIMFORAN Limitation de la capacite totale annuelle

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL
1 -INF 75051.338 90000.000
2 -INF 54073.572 90000.000
3 -INF 58879.615 90000.000
4 -INF 59410.479 90000.000

GAMS 2.25.064 386/486 DOS 05/24/96 21:27:33 PAGE 12
 General Algebraic Modeling System
 Solution Report SOLVE DECOUVERTE USING NLP FROM LINE 116

--- EQU MINIA Investissement Minimum annuel

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

1 1.0000E+9 1.5000E+9 +INF
 2 1.0000E+9 1.0000E+9 +INF EPS
 3 1.0000E+9 1.0000E+9 +INF EPS
 4 1.0000E+9 1.0000E+9 +INF EPS

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

--- EQU LIMIT -INF 4.5000E+9 4.5000E+9 EPS

LIMIT Limitation de l'investissement total

--- VAR M Metrage Fore en J durant I

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
1.NORD	10000.000	10000.000	40000.000	EPS
1.ILLIZI	10000.000	40000.000	40000.000	EPS
1.TRIAS	10000.000	15051.338	40000.000	
1.OUEST	10000.000	10000.000	40000.000	EPS
2.NORD	10000.000	10000.000	40000.000	EPS
2.ILLIZI	10000.000	24073.572	40000.000	
2.TRIAS	10000.000	10000.000	40000.000	EPS
2.OUEST	10000.000	10000.000	40000.000	EPS
3.NORD	10000.000	28879.615	40000.000	
3.ILLIZI	10000.000	10000.000	40000.000	EPS
3.TRIAS	10000.000	10000.000	40000.000	EPS
3.OUEST	10000.000	10000.000	40000.000	EPS
4.NORD	10000.000	10000.000	40000.000	EPS
4.ILLIZI	10000.000	29410.479	40000.000	
4.TRIAS	10000.000	10000.000	40000.000	EPS
4.OUEST	10000.000	10000.000	40000.000	EPS

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

--- VAR Z -INF 96.18 +INF

Z Decouverte Totale

**** REPORT SUMMARY: NONOPT 0
 INFEASIBLE 0
 UNBOUNDED 0
 ERRORS 0

GAMS 2.25.064 386/486 DOS 05/24/96 21:27:33 PAGE 13
 General Algebraic Modeling System
 Execution

---- 117 VARIABLE M.L Metrage Fore en J durant I

	NORD	ILLIZI	TRIAS	OUEST
1	10000.000	40000.000	15051.338	10000.000
2	10000.000	24073.572	10000.000	10000.000
3	28879.615	10000.000	10000.000	10000.000
4	10000.000	29410.479	10000.000	10000.000

---- 117 VARIABLE M.M Metrage Fore en J durant I

	NORD	ILLIZI	TRIAS	OUEST
1	EPS	EPS		EPS
2	EPS		EPS	EPS
3		EPS	EPS	EPS
4	EPS		EPS	EPS

PROGRAMME DU MODELE DE REPARTITION INTER-DISTRICTS

```

Program Xplorer :
Uses crt,declara3,layout3,revised3,rate3
Label fin ;
Const epsilon=1e-20 ; contr=41 ; varia=57 ;

Var Taux,Metragecumule,
  Decision          :Mat16 ;
  Metrage.SecondMembre :MatM2 ;
  MatriceA          :MatM2N ;
  FonctionObj       :MatN ;
  Indice            :MatInd ;
  Decouverte,DecouvertePrec,verification1,verification2,
  difference,TauxMoy TotalFore      :Extended ;
  NonReal,NonBorne                Boolean ;
  ij.compteur                      :byte ;

Begin
Preparation(MatriceA,SecondMembre,MetrageCumule,Decision) ;
DecouvertePrec :=0 ;compteur :=0 ;
Repeat
  Inc(compteur) ;
  LogisticRate(Decision,MetrageCumule Taux) ;
  Transfert1(Taux,FonctionObj) ;
  Simplexe (41,57,1e-9,MatriceA,SecondMembre,Metrage,
    FonctionObj,Indice,Decouverte,NonReal,NonBorne) ;
  if NonReal then Arret(1) else if NonBorne then Arret(2) ;
  Transfert2(Metrage,Indice,Decision) ;
  Decouverte := abs (Decouverte) ;
  difference := abs(Decouverte - DecouvertePrec) ;
  DecouvertePrec := Decouverte ;
Until (difference <= epsilon) or (compteur >= 50) ;
clrscr ;
sound(1500) :delay(100) :nosound ;
writeln('fonction objective= ',Decouverte :5 :1,' millions de t.e.p.') ;
writeln('indice          X1          taux (en millier de tep/m)') ;
verification1 :=0 ;TauxMoy :=0 ;TotalFore :=0 ;
for i :=1 to contr do
  if Indice[i]<=16
  then
  begin
  verification1 := verification1+Taux[Indice[i]]*Metrage[i] ;
  end ;
for i :=1 to 16 do
begin
tauxMoy :=tauxMoy+Taux[i]*1000 ;
TotalFore :=TotalFore+Decision[i] ;
end ;
presentation(Decision) :readln ;
writeln('verification des decouvertes totales :',verification1 :20 :17) ;
writeln('taux moyen :',(tauxMoy/16) :7 :6,' milliers de tep/m') ;
writeln('Forage total cumule :',TotalFore :8 :0,' sur 360.000 m Maximum') ;

```

```

writeln('nombre de boucle : ',compteur) ;
verification2 := DecouverteExacte(decision.MetragCumule) ;
writeln('Résultat exact : ',verification2 :20 :17, ' millions de t.e.p.') ;
writeln('Différence :', verification1-verification2) ;
fin : readln ;
end.
Unit layout ;
Interface

```



```

Uses Declara3 ;
Procedure PreparationR (var A :MatM2N ;var SecondMembre :MatM2 ;var MC,M :Mat16) ;
Procedure Preparation (var A :MatM2N ;var SecondMembre :MatM2 ;var MC :Mat16) ;
Procedure Transfert1(T :Mat16 ; var C :MatN) ;
Procedure Transfert2(M :MatM2 ;Ind :MatInd ; var D :Mat16) ;
Procedure Presentation (h :Mat16) ;
Procedure Arret(Cause :word) ;

```

Implementation

```

Procedure PreparationR(var A :MatM2N ;var SecondMembre :MatM2 ;var MC,M :Mat16) ;
var i,j : integer ;
begin
for i :=1 to 36 do for j :=1 to 16+36 do A[i,j] :=0 ;
for i :=1 to 16 do
begin
A[i+4,i] :=1 ;{A[i+4,i+16] :=1 ;} {forage annuel max}
end ;

for i :=1 to 4 do for j :=1 to 4 do A[i,4*(i-1)+j] :=1 ;
for i :=1 to 4 do
begin
A[i,i+16] :=1 ;
end ;

for i :=1 to 16 do
begin
A[i+20,i] :=1 ;
A[i+4,i+20] :=1 ;
A[i+20,i+36] :=-1 ;
end ;

{-----Second Membre-----}
for i :=1 to 4 do SecondMembre[i] :=90000 ; { <=90,000 metres / an}
for i :=5 to 20 do SecondMembre[i] :=40000 ; { <= 40,000 metres / an / district}
for i :=21 to 36 do SecondMembre[i] :=10000 ; { >= 10.000 metres / an / district}
{-----Metrag cumule-----}
Mc[1] :=154.6e3 ;
Mc[2] :=313.7e3 ;
Mc[3] :=190.2e3 ;
Mc[4] :=663.8e3 ;
{-----Metrag fore initial-----}
for i :=1 to 16 do M[i] :=0 ;
end ; {fin preparationR}

```

Procedure Preparation (var A :MatM2N ;var SecondMembre :MatM2 ;var MC :Mat16) ;

var i,j : integer ;

CR :Array[1..16] of real ;

begin

{----- Cout de Revient Unitaire-----}

CR[1] :=18763 ; CR[2] :=20703 ; CR[3] :=17823 ; CR[4] :=21599 ;

CR[5] :=17369 ; CR[6] :=19165 ; CR[7] :=16499 ; CR[8] :=19995 ;

CR[9] :=16414 ; CR[10] :=18111 ; CR[11] :=15591 ; CR[12] :=18895 ;

CR[13] :=15757 ; CR[14] :=17387 ; CR[15] :=14968 ; CR[16] :=18139 ;

{----- fin Cout de Revient Unitaire-----}

for i :=1 to 40 do for j :=1 to 16 do A[i,j] :=0 ;

for j :=1 to 4 do begin A[1,j] :=1 ; A[5,j] :=CR[j] end ;

for j :=1 to 4 do begin A[2,j+4] :=1 ; A[6,j+4] :=CR[j+4] end ;

for j :=1 to 4 do begin A[3,j+8] :=1 ; A[7,j+8] :=CR[j+8] end ;

for j :=1 to 4 do begin A[4,j+12] :=1 ; A[8,j+12] :=CR[j+12] end ;

for i :=1 to 16 do

begin

A[i+8,i] :=1 ;A[i+24,i] :=1 ;

end ;

for j :=1 to 16 do A[41,j] :=CR[j] ; { CRij=1,2,3,4 }

for i :=1 to 4 do

begin

A[i,i+16] :=1 ;

A[i+4,i+20] :=-1 ;

end ;

for i :=1 to 16 do

begin

A[i+8,i+24] :=1 ;

A[i+24,i+40] :=-1 ;

end ;

A[41,57] :=1 ;

{-----Second Membre-----}

for i :=1 to 4 do SecondMembre[i] :=90000 ; { <=90,000 metres / an }

for i :=5 to 8 do SecondMembre[i] :=1e9 ; { Inv. annuel >= 1 milliard de DA }

for i :=9 to 24 do SecondMembre[i] :=40000 ; { <= 40,000 metres / an / district }

for i :=25 to 40 do SecondMembre[i] :=10000 ; { >= 10,000 metres / an / district }

SecondMembre[41] :=4.5e9 ; { <= Inv. total = 4.5 milliards de DA }

{-----Metrage cumule-----}

Mc[1] :=154.6e3 ;

Mc[2] :=313.7e3 ;

Mc[3] :=190.2e3 ;

Mc[4] :=663.8e3 ;

end ; {fin preparation}

Procedure Transfert1(T :Mat16 ; var C :MatN) ;

var i :integer ;

begin

for i :=1 to 16 do C[i] :=T[i] ;

for i :=17 to 57 do C[i] :=0 ;

end ;

```

Procedure Transfert2(M :MatM2 ;Ind :MatInd ; var D :Mat16) ;
var i :word ;
begin
for i :=1 to 41 do
  if (Ind[i]<=16) and (Ind[i]>0) then D[Ind[i]] :=M[i]
end ;

```

```

Procedure Arret(Cause :word) ;
begin
case cause of
  1 :writeln('Pas de solution réalisable') ;
  2 :writeln('Solution Non bornee') ;
end ;
end ;

```

```

Procedure Presentation (H :Mat16) ;
var i : integer ;
begin
writeln('Forage 1ere annee :') ;
for i :=1 to 4 do writeln(' District',i :3,H[i] :10 :0,' m') ;
writeln('Forage 2eme annee :') ;
for i :=5 to 8 do writeln(' District',(i-4) :3,H[i] :10 :0,' m') ;
writeln('Forage 3eme annee :') ;
for i :=9 to 12 do writeln(' District',(i-8) :3,H[i] :10 :0,' m') ;
writeln('Forage 4eme annee :') ;
for i :=13 to 16 do writeln(' District',(i-12) :3,H[i] :10 :0,' m') ;
end ;

begin
end.

```



```

Unit rate3 ;
Interface
Uses declara3 ;
Function Logistic( x : extended ; r :integer) :extended ;
Procedure LogisticRate(M :Mat16 ;var MC :Mat16 ;var T :Mat16) ;
Procedure MiseAJour(Mdecide :Mat16 ;var Mcum :Mat16) ;
Function DecouverteExacte(M1,M2 : mat16) :extended ;

```

Implementation

```

Function dnLogistic( r :word) :real ;{ derivee 1ere de Dc=f(Mc) l'annee initiale}
begin
case r of
  1 : dnLogistic := 0.000003 ;
  2 : dnLogistic := 0.000942 ;
  3 : dnLogistic := 0.001655 ;
  4 : dnLogistic := 0.000300 ;
end ;
end ;

```

```

Procedure MiseAJour(Mdecide :Mat16 ;var Mcum :Mat16) ;
var i :byte ;
begin
for i :=5 to 16 do
  Mcum[i] :=Mcum[i-4]+Mdecide[i-4] ; {}
end ;
procedure LogisticRate(M :Mat16 ;var MC :Mat16 ;var T :Mat16) ;
var i :byte ; y :extended ;
begin
if M[1] <>0 then MiseAJour(M,Mc) ;
for i :=1 to 16 do
  if M[i] <>0
  then
  begin
  y :=( Logistic((MC[i]+M[i]),i) - Logistic( MC[i],i )) / M[i] ;
  T[i] :=y ;
  end
  else T[i] :=dnLogistic(i) ;
end ;

```

```

Function Logistic( x : extended ;r :integer) :extended ;
var result :extended ;
begin
if r>4 then if r mod 4 = 0 then r :=4 else r := r mod 4 ;
x :=x ; { conversion km en m }
case r of
  1 : result := 326.82/(1+ exp(6.22- 6.114e-6 * x)) - (326.82/(1+exp(6.22))) ;
  2 : result := 82599000/(1+ exp(-11.52-2.8e-6*x)) - 82599000/(1+exp(-11.52)) ;
  3 : result := 807.93/(1+ exp(4.52- 1.52e-6*x)) - 807.93/(1+exp(4.52)) ;
  4 : result := 7.23e15/(1+ exp(-30.2-4.74e-7*x)) - 7.23e15/(1+exp(-30.2)) ;
end ;
Logistic :=result ;
end ;

```

```

Function DecouverteExacte(M1,M2 : mat16) :extended ;
var i :word ; A :Mat4 ;dec :extended ;
begin
for i :=1 to 4 do A[i] :=M1[i]+M1[4+i]+M1[8+i]+M1[12+i] ;
dec :=0 ;
for i :=1 to 4 do
  dec :=(Logistic(M2[i]+A[i],i)-Logistic(M2[i],i))+dec ;
DecouverteExacte :=dec ;
end ;

begin
end.

```



```

Unit declara3;
Interface
Const sm=41;    { horizon = 4 an; district=4 }
  sn=57;
  sm2=43; {m2=m+2}
Type MatM2M2=array[1..sm2,1..sm2] of real;

```

```

MatM2N=array[1..sm2,1..sn] of real;
MatM2=array[1..sm2] of real;
MatN=array[1..sn] of real;
MatM=array[1..sm] of real;
Mat4=array[1..4] of real;
Mat16=array[1..16] of real;
MatInd=array[1..sm] of byte;

```

Implementation

```

begin
end.

```



```

Unit revised ;

```

Interface

```

Uses declara ;

```

```

Procedure Simplexe ( m,n :integer ; eps : extended ;

```

```

    var A      :MatM2N ;
    var B,X    :MatM2 ;
    var C      :MatN ;
    var W      :MatInd ;
    var F      :extended ;
    var NoFeas,NoSol :boolean) ;

```

Implementation

```

Procedure Simplexe ( m,n :integer ; eps : extended ;

```

```

    var A      :MatM2N ;
    var B,X    :MatM2 ;
    var C      :MatN ;
    var W      :MatInd ;
    var F      :extended ;
    var NoFeas,NoSol :boolean) ;

```

```

var i,j,k,l,p,q :integer ;
    d,r,s      :real ;
    U          :matM2M2 ;
    Y          :MatM2 ;
    ex,Phase,stop :boolean ;

```

```

begin

```

```

nofeas :=False ;

```

```

nosol :=False ;

```

```

p :=m+2 ;

```

```

q :=m+2 ;

```

```

phase :=true ;

```

```

k :=m+1 ;

```

```

for j :=1 to n do

```

```

    begin

```

```

        A[k,j] :=C[j] ;

```

```

        S :=0 ;

```

```

        for i :=1 to m do

```

```

            S :=S-A[i,j] ;

```

```

        {suisant i}

```

```

        A[p,j] :=s

```

```

        end ;{suisant j}

```

```

s :=0 ;

```

```

for i :=1 to m do
  begin
    W[i] :=n+i ;
    r :=B[i] ;
    X[i] :=r ;
    s :=s-r
  end ;{suivant i}
X[k] :=0 ;
X[p] :=s ;
for i :=1 to p do
  begin
    for j :=1 to p do
      U[i,j] :=0.0 ;
      {suivant j}
    U[i,i] :=1.0 ;
  end ;{suivant i}
Stop :=false ;
repeat {'Until stop - Phase 1}
  if ((X[p]>=0) and phase) then      {Xp>=eps}
    begin
      phase :=false ;
      q :=m+1
    end ;{fin si}
  d :=0 ; {'phase 2}
  for j :=1 to n do
    begin
      s :=0.0 ;
      for i :=1 to p do
        s :=s+U[q,i]*A[i,j] ;
        {suivant j}
      if d>s then
        begin
          d :=s ;
          k :=j ;
        end{fin si}
      end ;{suivant j}
    if d>-eps then
      begin
        Stop :=true ;
        if phase then nofeas :=true else f :=-X[q]
      end
    else
      begin
        for i :=1 to q do
          begin
            s :=0 ;
            for j :=1 to p do
              s :=s+U[i,j]*A[j,k] ;
              {suivant j}
            Y[i] :=s ;
          end ;{suivant i}
        ex :=true ;
        for i :=1 to m do
          if Y[i]>= eps then
            begin

```

```

s :=X[i]/Y[i] ;
if (ex or (s<d)) then
  begin
    d :=s ;
    l :=i ;
    end ;{fin si}
ex :=false
end ;{fin si}
{suivant i}
if ex then
  begin
    nosol :=true ;
    stop :=true ;
    end
else
  begin
    W[l] :=k ;
    S :=1/Y[l] ;
    for j :=1 to m do
      U[l,j] :=U[l,j]*s ;
    {suivant j}
    if l=1 then i :=2 else i :=1 ;
    repeat
      s :=Y[i] ;
      X[i] :=X[i]-d*s ;
      for j :=1 to m do
        U[i,j] :=U[i,j]-U[l,j]*s ;
      {suivant j}
      if i=l-1 then i :=i+2 else i :=i+1 ;
    until i>q ;
    X[l] :=d
    end {fin si 'not ex}
  end {fin si 'd<=-eps}
until Stop
end ; {fin proc}
begin
end.

```

PROGRAMME DU MODELE DE REPARTITION INTRA-DISTRICT

Option ForceDcl

Option DébutTableau 1

'-----Résolution du pl en 0-1 -----'

Proc Balas()

Dcl m En Entier ; n En Entier

Dcl Alfa ; Beta ; Gamma ; Infini ; i ; j ; mnr ; nr ; P ; r ; r1 ; r2 ; s ; t ; z En Entier

Dcl Aa ; B ; c ; X En Objet ' ArrM

ReDim II(60) En Entier

ReDim JJ(60) En Entier

ReDim XX(60) En Entier

ReDim Y(17) En Entier
 ReDim W(17) En Entier
 ReDim ZR(17) En Entier
 ReDim KK(61) En Entier
 Del FVal En Entier ; Exist En Booléen ; démarrer ; finir En Simple

Begin

AffecteRéf Aa = FeuillesCalcul("Koolio").Plage("Matrice2")
 AffecteRéf B = FeuillesCalcul("Koolio").Plage("SecondMembre2")
 AffecteRéf c = FeuillesCalcul("Koolio").Plage("Coût2")
 AffecteRéf X = FeuillesCalcul("Koolio").Plage("Variables2")

Infini = 100000

m = 17

n = 60

démarrer = Minuterie

Pour i = 1 à m

Y(i) = B.Cellules(i)

Suivant i

z = 1

Pour j = 1 à n

XX(j) = 0

z = z + c.Cellules(j)

Suivant j

FVal = z + z

s = 0

t = 0

z = 0

KK(1) = 0

Exist = Faux

Evaluation : P = 0

mnr = 0

Pour i = 1 à m

r = Y(i)

Si r < 0 Alors

{-----La contrainte i est irréalisable}

P = P + 1

Gamma = 0

Alfa = r

Beta = -Infini

Pour j = 1 à n

Si XX(j) <= 0 Alors

Si c.Cellules(j) + z >= FVal Alors

XX(j) = 2

KK(s + 1) = KK(s + 1) + 1

t = t + 1

JJ(t) = j

Sinon

r1 = Aa.Cellules(i ; j)

Si r1 < 0 Alors

Alfa = Alfa - r1

```

Gamma = Gamma + c.Cellules(j)
Si Beta < r1 Alors Beta = r1
Fin Si 'r1 < 0
Fin Si '{ C[j]+z < Fval}
Fin Si 'xx(j) <= 0
Suivant j
Si Alfa < 0 Alors AllerA Backtracking
Si Alfa + Beta < 0 Alors
Si Gamma + z >= FVal Alors AllerA Backtracking
Pour j = 1 à n '{ Boucle For j #b}
r1 = Aa.Cellules(i ; j) '{b}
r2 = XX(j) '{b}
Si r1 < 0 Alors '{b}
Si r2 = 0 Alors '{b}
XX(j) = -2 '{b}
Pour nr = 1 à mnr '{b}
ZR(nr) = ZR(nr) - Aa.Cellules(W(nr) ; j) '{b}
Si ZR(nr) < 0 Alors AllerA Backtracking '{b}
Suivant nr '{b}
Fin Si '{ r2 = 0 } '{b}
Sinon '{b}
Si r2 < 0 Alors '{b}
Alfa = Alfa - r1 '{b}
Si Alfa < 0 Alors AllerA Backtracking '{b}
Gamma = Gamma + c.Cellules(j) '{b}
Si Gamma + z >= FVal Alors AllerA Backtracking '{b}
Fin Si '{ r1 >= 0 et r2 < 0 } '{b}
Fin Si 'r1
Suivant j '{ Fin de la boucle For j #b}
mnr = mnr + 1
W(mnr) = i
ZR(mnr) = Alfa
Fin Si '{ Alfa + Beta < 0}
Fin Si '{ r < 0 }
Suivant i '{ Fin de la boucle For i }
Si P = 0 Alors '{ Mise à jour de la solution optimale}
FVal = z
Exist = Vrai
Pour j = 1 à n
Si XX(j) = 1 Alors X.Cellules(j) = 1 Sinon X.Cellules(j) = 0
Suivant j
AllerA Backtracking
Fin Si 'p=0
Si mnr = 0 Alors
P = 0
Gamma = -Infini
Pour j = 1 à n
Si XX(j) = 0 Alors
Beta = 0
Pour i = 1 à m
r = Y(i)

```

```

    r1 = Aa.Cellules(i ; j)
    Si r < r1 Alors Beta = Beta + r - r1
  Suivant i
  r = c.Cellules(j)
  Si (Beta > Gamma) Ou (Beta = Gamma) Et (r < Alfa) Alors
    Alfa = r
    Gamma = Beta
    P = j
    Fin Si 'beta>gamma...'
  Fin Si '{ XX[j] = 0 }
  Suivant j
  Si P = 0 Alors AllerA Backtracking
  s = s + 1
  KK(s + 1) = 0
  t = t + 1
  JJ(t) = P
  II(s) = 1
  XX(P) = 1
  z = z + c.Cellules(P)
  Pour i = 1 à m
    Y(i) = Y(i) - Aa.Cellules(i ; P)
  Suivant i
  Fin mnr = 0
  Sinon 'mnr < 0'
  s = s + 1
  II(s) = 0
  KK(s + 1) = 0
  Pour j = 1 à n
    Si XX(j) < 0 Alors
      t = t + 1
      JJ(t) = j
      II(s) = II(s) - 1
      z = z + c.Cellules(j)
      XX(j) = 1
      Pour i = 1 à m
        Y(i) = Y(i) - Aa.Cellules(i ; j)
      Suivant i
      Fin Si 'xx(j)<0'
    Suivant j
  Fin Si ' mnr = 0'
  AllerA Evaluation
  Backtracking : Pour j = 1 à n
    Si XX(j) < 0 Alors XX(j) = 0
    Suivant j
    Si s > 0 Alors
      Faire
      P = t
      t = t - KK(s + 1)
      Pour j = t + 1 à P
        XX(JJ(j)) = 0
      Suivant j

```

```

P = Abs(II(s))
KK(s) = KK(s) + P
Pour j = t - P + 1 à t
  P = JJ(j)
  XX(P) = 2
  z = z - c.Cellules(P)
  Pour i = 1 à m
    Y(i) = Y(i) + Aa.Cellules(i ; P)
  Suivant i
Suivant j
s = s - 1
Si II(s + 1) >= 0 Alors AllerA Evaluation
Boucle TantQue s = 0
Fin Si 'S>0
Si Exist Alors
  FeuillesCalcul("Koolio").Plage("bExist").Cellules(1).Valeur = "Solution Optimale
Trouvée"
  FeuillesCalcul("Koolio").Plage("bFval").Cellules(1).Valeur = -(FVal - 5)
  Pour i = 56 à 60
    X.Cellules(i).Valeur = 1 - X.Cellules(i).Valeur
  Suivant i
Fin Si
Bip
finir = Minuterie
  FeuillesCalcul("Koolio").Plage("P32").Cellules(1).Valeur = finir - démarrer
Fin Proc ' Fin de Balas ya mhainek
-----Fin de la résolution du PL en 0-1 -----

```

-----Initialisation des matrices du PL 0-1

```

Proc Init.Matrice()
Dcl i ; j ; k En Entier
Dcl O ; P ; B2 En Objet
AffecteRéf O = FeuillesCalcul("Koolio").Plage("Scénari")
AffecteRéf P = FeuillesCalcul("Koolio").Plage("Matrice2")
AffecteRéf B2 = FeuillesCalcul("Koolio").Plage("SecondMembre2")

Pour i = 1 à 16
  Pour j = 1 à 60
    P.Cellules(i ; j) = 0
  Suivant j
Suivant i
Pour i = 0 à 10
  Pour j = 5 * i à 5 * i + 4
    P.Cellules(i + 1 ; j + 1).Valeur = 1
  Suivant j
Suivant i
-----transmission des scénarios
Pour i = 1 à 5
  Pour j = 1 à 11
    Si O.Cellules(i ; j).Valeur <> 0 Alors
      P.Cellules(i + 11 ; (O.Cellules(i ; j) + (j - 1) * 5)).Valeur = -1
    Fin Si

```

```

    Suivant j
    Suivant i
    Pour i = 1 à 5
      P.Cellules(i + 11 ; i + 55).Valeur = -1
    Suivant i
    Pour i = 11 à 16
      B2.Cellules(i) = -1
    Suivant i
    Pour i = 1 à 11
      B2.Cellules(i) = 1
    Suivant i

```

Fin Proc ' InitMatrice

{-----Procédure de Transformation du CanMAX en CanMIN}

Proc CanMaxMin()

Dcl contraintes ; var ; i ; j En Entier

Dcl A2 ; B2 ; C2 En Objet

AffecteRéf A2 = FeuillesCalcul("Koolio").Plage("Matrice2")

AffecteRéf B2 = FeuillesCalcul("Koolio").Plage("SecondMembre2")

AffecteRéf C2 = FeuillesCalcul("Koolio").Plage("Coût2")

' A.X <= b devient - A.X >= - b

contraintes = 5

var = 60

Pour i = 11 à 11 + contraintes

 Pour j = 1 à var

 A2.Cellules(i ; j).Valeur = -A2.Cellules(i ; j).Valeur 'Les Cj seront gardés}

 Suivant j 'tels quels

 Suivant i

 Pour i = 11 à 11 + contraintes ' les Xi

 B2.Cellules(i) = -B2.Cellules(i) 'seront modifiés

 Suivant i 'avant l'affichage

 'Somme des Cj devra être

 'soustraite à -Zmax

Fin Proc

Proc Intradistrict()

 InitMatrice

 Balas

 Fin Proc

ANNEXE III

PRÉSENTATION DES LOGICIELS UTILISÉS

Nous donnons dans cette annexe un bref aperçu de certains logiciels utilisés. Il conviendrait de se reporter aux manuels d'utilisation pour obtenir de plus amples informations.

I. UNIFIT

UNIFIT est un logiciel en mode interactif qui permet d'adapter un échantillon de données qu'on a collecté expérimentalement à une distribution de probabilité théorique (par ex : normale, exponentielle, etc.). Il aide à bien représenter un cas réel

Son avantage est qu'il permet de trouver la meilleure représentation qui s'adapte à un cas, et ceci en peu de temps. Chose qui est souvent négligée à cause du temps requis. On se contente souvent de prendre une distribution bien connue, par exemple normale, sans être certain qu'elle s'adapte réellement au cas, ou on ne prend aucune distribution.

UNIFIT est capable d'adapter un échantillon à l'une des 13 distributions continues (Exponentielle, Gamma, Normale, etc.) ou l'une des 5 distributions discrètes (Binomiale, Géométrique, etc.).

L'ajustement d'une distribution aux données passe par trois étapes :

1. Hypothèse sur une ou plusieurs familles de distribution.
2. Estimation des paramètres de chaque hypothèse à partir des données. Quelques paramètres peuvent être fixés par l'utilisateur, les autres sont estimés par la méthode du maximum de vraisemblance.
3. Déterminer la représentation de chaque distribution.

Pour un risque fixé, un test d'hypothèse est effectué afin d'accepter ou de rejeter l'ajustement. Pour ce faire, il existe quatre types de tests statistiques de l'hypothèse pour le modèle continu, les plus connus sont : le test du Chi -Carré et le test de Kolmogorov-Smirnov. Ce dernier est le plus puissant des deux.

Lorsque plusieurs modèles s'adaptent à l'échantillon étudié, un test de comparaison des modèles permet de choisir celui qui convient le mieux.

II. GAMS: General Algebraic Modeling System

GAMS a été conçu pour rendre la construction et la résolution de nombreux modèles complexes de programmation mathématique plus directe pour le programmeur et plus compréhensible pour les utilisateurs, qui ne sont pas spécialisés dans le domaine informatique tels que les économistes. Parce qu'il résume les énoncés algébriques des modèles dans un langage accessible aux modélisateurs et aux ordinateurs, GAMS permet d'augmenter la productivité des informaticiens et d'élargir l'étendue et l'utilité des applications de la programmation mathématique dans l'analyse et la prise de décision.

La plupart des modèles créés avec GAMS sont résolus par l'*optimizer* appelé MINOS.

Ce dernier permet de résoudre les problèmes caractérisés par une fonction objectif non linéaire et des contraintes linéaires. Pour ce faire, il utilise l'algorithme du gradient réduit de Wolfe (1962) combiné avec l'algorithme quasi-Newtonien de Davidon (1959), ce qui conduit généralement à une convergence superlinéaire. Dans le cas de PNL avec contraintes non linéaires, Minos utilisera la méthode de Lagrange pour la résolution.

GAMS comporte d'autres *optimizer*, citons en particulier l'*optimizer* ZOOM qui permet de résoudre les problèmes linéaires purs.

ANNEXE IV

**APERÇU SUR LA DERNIÈRE LOI SUR LA RECHERCHE
PÉTROLIÈRE EN ALGÉRIE**

Attendue tant au niveau national qu'international, la nouvelle loi n°86-14 du 19 août 1986 régit désormais les activités de prospection, de recherche, d'exploitation et de transport des hydrocarbures, actualisant ainsi l'ordonnance du 12 avril 1971. Elle constitue pour le secteur de l'énergie un dispositif juridique nouveau, qui tient compte d'une part de l'évolution des conditions économiques de la recherche pétrolière dans le monde, et d'autre part des besoins actuels et futurs du développement économique de notre pays. Le nouveau régime juridique vise l'institution de titres miniers accordés par l'État à l'entreprise nationale, l'État détenant le monopole des activités de prospection, de recherche et d'exploitation.

Cette loi a également été conçue comme un cadre incitatif pour la participation des sociétés étrangères à la recherche pétrolière en Algérie, dans la mesure où ses dispositions permettent à ces dernières la récupération des fonds qu'elles investissent, et leur offrent une rémunération équitable des efforts qu'elles ont consentis.

En effet toute personne morale étrangère qui désire exercer des activités de prospection, de recherche et d'exploitation en Algérie, peut le faire, mais exclusivement en association avec l'entreprise nationale. L'entreprise nationale et la ou les sociétés étrangères peuvent ainsi conclure :

- Soit une association en **participation** dont 51% au moins du capital doit être détenu par l'entreprise nationale.

Dans le cas d'une découverte d'hydrocarbures liquides, commercialement exploitable, l'entreprise nationale et la société étrangère exploitent ensemble le gisement et chacune retire sa part de production et s'acquitte de ses obligations fiscales.

- Soit un contrat dit de **partage de production** qui permet à la société étrangère en cas de découverte d'un gisement d'hydrocarbures commercialement exploitable, de disposer à concurrence de 49%, d'une part de la production, exonérée de taxe et d'impôt pétroliers. Les quantités ainsi mises à la disposition de la société étrangères seront calculées en fonction des efforts financiers et techniques mis en oeuvre et de l'importance du gisement découvert.
- Soit d'un contrat dit **d'entreprise** qui permet à la société étrangère, toujours en cas de découverte d'un gisement commercialement exploitable, de récupérer les fonds qu'elles

a investi dans la recherche et d'être rémunérée en nature ou en espèces, pour l'effort financier et technique ayant abouti à la découverte.

Cette loi apporte également certaines innovations. Ainsi, par exemple en cas de découverte de gaz en quantités commercialement exploitables, l'entreprise étrangère bénéficie du remboursement de ses dépenses, et éventuellement, d'un bonus : le gaz découvert revenant à l'entreprise nationale, qui peut alors constituer, avec le partenaire étranger, une société d'économie mixte pour l'exportation du gaz issu du gisement découvert en commun.

L'innovation réside également dans les dispositions fiscales plus souples qui prévoient entre autre :

- Des exonérations de taxes (TUGP, TUGPS...) et de droits de douanes sur les équipements, matières et produits destinés aux activités de recherche, de prospection, d'exploitation et de transport.
- Des réductions de taux de redevance et d'impôts pétroliers.
- Une flexibilité des taux d'amortissement (100% pour les puits secs, 12,5 à 25% pour les puits producteurs...)

Des décrets d'applications (n°87-157,87-158 et 87-159 du 21/07/87) viennent compléter cette loi qui vise en définitive à encourager l'effort d'exploration en Algérie, tout en garantissant aux

sociétés étrangères une juste rémunération de leurs efforts financiers, technologiques et humains.

ANNEXE V

*ESTIMATION VOLUMETRIQUE DES RÉSERVES
D'HYDROCARBURES*

Arrêté du 11 juillet 1988 relatif à l'inventaire périodique des réserves nationales d'hydrocarbures liquides et gazeux (articles 1, 2, 9 et 10) :

Source : Journal Officiel de la République Algérienne du 26 Octobre 1988.

Article 1er.- En application de l'article 14 de la loi n° 86-14 du 19 août 1986, toute personne morale exerçant des activités d'exploitation d'hydrocarbures, est tenue de procéder à un inventaire des réserves contenues dans le périmètre, objet du titre minier d'exploration.

Article 2 - L'inventaire des réserves d'hydrocarbures sera fait annuellement. Il devra être actualisé à tout moment en cas de modification importante du niveau de ces réserves, par suite de l'acquisition de nouvelles données géologiques, techniques ou structurales et avant la mise en œuvre de tout programme de développement pouvant avoir un impact significatif sur le niveau ou le taux de récupération des réserves.

Article 9 - Le calcul des réserves sera effectué à l'aide de la méthode volumétrique, et contrôlé par d'autres méthodes si la disponibilité des données le permet.

Article 10 - Un état accompagné de l'ensemble des documents justificatifs sera adressé annuellement aux fins d'approbation, au ministre chargé des hydrocarbures par les personnes morales visées à l'article (1 er) ci-dessus.

Cet état détaillera, pour chaque réservoir, conformément à la nomenclature nationale :

- les réserves en place à l'origine,
- les réserves récupérables à l'origine,
- les productions cumulées à la date de l'estimation,
- les réserves restant à récupérer à la même date,

- les conditions économiques prises en considération et les programmes de développements correspondants.

LA MÉTHODE VOLUMÉTRIQUE

La seule approche analytique actuellement utilisée au niveau du Département Exploration de SONATRACH pour estimer la quantité des hydrocarbures que peut renfermer un réservoir, est la méthode volumétrique. L'estimation déterministe de la valeur moyenne des réserves en place résulte d'une simple association des paramètres moyens fixés (porosité, perméabilité, saturation en eau,...). Le degré de précision de calcul par cette méthode dépend de la précision des paramètres pétro-physiques moyens introduits dans la formule de calcul.

La quantité des hydrocarbures d'un gisement est actuellement estimée par la formule volumétrique suivante :

$$\text{Réserves en place} = \text{const} \cdot H_u \cdot S \cdot \emptyset \cdot (1 - S_w) / B_{Hc}$$

où :

- const : Constante
- H_u : Hauteur utile
- S : Surface en m^2
- \emptyset : Porosité en %
- S_w : Saturation en eau en %
- B_{Hc} : Facteur volumétrique (BO, BG).

ANNEXE VI
LES TECHNIQUES GÉOLOGIQUES
ET GÉOPHYSIQUES

roches qui le constituent. Il existe donc autant de techniques géophysiques que de paramètres physiques mesurables depuis la surface. On a coutume de classer ces techniques en méthodes " passives ", où l'on mesure un phénomène naturel, et " actives ", où l'effet mesuré résulte d'une cause artificiellement provoquée.

2.1. LES MÉTHODES PASSIVES OU POTENTIELLES

Les méthodes passives ou potentielles ont permis dès l'origine de guider les efforts du prospecteur en lui suggérant les traits structuraux majeurs des bassins sédimentaires

2.1.1. La tellurique :

- mesure du champ électrique naturel et de ses variations - permet de dresser une carte de l'épaisseur des terrains conducteurs superficiels.

2.1.2. Le MAGNÉTISME :

- mesure de l'amplitude du champ magnétique - donne une idée de la profondeur et de la morphologie du socle pétrolier.

2.1.3. La GRAVIMÉTRIE :

- mesure de l'accélération de la pesanteur - indique les axes structuraux des couches les plus denses du sous-sol.

2.1.4. LA magnéto-tellurique :

- mesure simultanée des champs magnétiques et électriques naturels - permet d'analyser la succession verticale des ensembles conducteurs et résistants.

2.2. LES MÉTHODES ACTIVES OU PROVOQUÉES

Les précédentes techniques manquent de souplesse et de résolution; elles ont donc progressivement laissé la place aux méthodes actives ou provoquées.

LA SISMIQUE RÉFLEXION :

En sismique réflexion, on mesure les temps d'arrivée des différents échos d'une source d'ébranlement sur les interfaces qui limitent les couches sédimentaires caractérisées par leur impédance. Ces temps d'arrivée ont tout d'abord permis de dessiner une image approximative du sous-sol - la " coupe temps " - qui est devenue, grâce à l'introduction

des vitesses mesurées simultanément, la " coupe profondeur ", élément d'un cadre structurel relativement précis.

Les progrès de la technologie, notamment l'électronique pour l'enregistrement numérique et l'informatique pour le traitement automatique, ont permis non seulement d'affiner cette image géométrique, appuyant en cela les études sédimentologiques, mais aussi d'approcher la détermination du faciès des différentes roches et de ses variations.

Restait à atteindre les fluides eux-mêmes, terme final de notre prospection. Là aussi, la technologie a fourni l'outil de base avec l'enregistrement précis des amplitudes, mais les méthodes actuelles ne permettent d'identifier la présence des hydrocarbures que dans certains cas très particuliers.