UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MODÉLISATION DU MARCHÉ OUEST-AFRICAIN DES PHOSPHATES

PAR

Moussa SOULEY

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MINÉRAL - SECTION GÉNIE DES MINES

ÉCOLE POLYTECHNIQUE

MÉMOIRE PRÉSENTE EN VUE DE L'OBTENTION
DU GRADE DE MAÎTRE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES (M.Sc.A.)

JUILLET 1989

c Moussa Souley 1989

National Library of Canada
Bibliothèque nationale du Canada

Canadian Theses Service
Service des thèses canadiennes

Ottawa, Canada
K1A 0N4

The author has granted an irrevocable non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of his/her thesis by any means and in any form or format, making this thesis available to interested persons.

L'auteur a accordé une licence irrévocable et non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de sa thèse de quelque manière et sous quelque forme que ce soit pour mettre des exemplaires de cette thèse à la disposition des personnes intéressées.

The author retains ownership of the copyright in his/her thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without his/her permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège sa thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

ISBN 0-315-58198-0

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE

Ce mémoire intitulé:

MODÉLISATION DU MARCHÉ OUEST-AFRICAIN DES PHOSPHATES

présenté par Moussa Souley

en vue de l'obtention du grade de Maître ès Sciences Appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. Marc Tanguay, Ph.D., président

M. Jorgen Elbrond, M.Sc., directeur de recherche

M. Daniel Leblanc, Ph.D.

À ma famille,

à mes amis(es).

SOMMAIRE

Ce travail est une étude de l'industrie des phosphates et des engrais phosphatés pour 1987 à l'aide d'un modèle de programmation linéaire avec l'accent mis sur l'Afrique de l'Ouest. Le but est de prévoir les courants d'échange entre les producteurs et les consommateurs, d'abord avec l'hypothèse où seulement les lois du marché s'appliquent, ensuite en introduisant des contraintes supplémentaires pour tenir compte d'autres liens. Les flux réellement observés sont la base de comparaison. Le modèle permet ensuite d'évaluer la position compétitive des producteurs de concentré et des usines de fabrication d'engrais dans le contexte régional et international du marché des phosphates et des engrais phosphatés.

La première partie présente les données du problème. Les cadres géographique et géologique sont d'abord décrits ainsi que le potentiel de la région en phosphates et les exploitations actuelles. Un aperçu est donné sur les techniques d'extraction et de traitement des minerais de phosphates ainsi que le réseau régional de transport. Les usines régionales d'engrais phosphatés sont aussi localisées avec une présentation de la technologie de fabrication. Une analyse de marché fait ressortir la demande des pays pour les différents types d'engrais. L'offre et la demande internationales pour les différents produits et sous-produits à base de phosphates sont aussi identifiées. À partir de certaines hypothèses sur les types de produits et les capacités de production des mines et des usines, et à l'aide de modèles d'estimation,

tous les coûts de production et de transport par tonne de P_2O_5 sont évalués.

La deuxième partie consiste en un traitement des données. Le marché du concentré est modélisé sous forme d'un problème de transport avec comme origines les mines régionales et les principaux pays producteurs sur la scène internationale. Les destinations sont les usines régionales d'engrais et les points de demande d'importance majeure dans le monde. Les flux commerciaux observés sont rapportés pour servir de base de comparaison avec les résultats que donne le modèle. Le marché des engrais suit le même modèle en utilisant les résultats de la distribution du concentré. Le problème est résolu en utilisant l'algorithme du simplexe.

Les résultats de la simulation pour le concentré prédisent assez bien les flux observés. Ils confirment la position privilégiée du Maroc dans le commerce international de concentré. Il a un avantage considérable pour l'approvisionnement du marché européen. Les producteurs africains actuels, si on fait fi de certains liens avec l'Europe de l'Ouest écouleraient leurs productions vers l'Asie et l'Amérique latine. Au niveau régional le Togo domine le marché et donne peu de chance aux nouveaux projets miniers. Pour le commerce des engrais l'hypothèse d'un marché libre rend les producteurs africains peu compétitifs par rapport à l'offre sur le marché international, même pour la demande locale lorsqu'on considère le TSP. Leurs coûts de production restent élevés. Ce résultat serait à nuancer pour la qualité SSP.

ABSTRACT

An LP transportation model is used to study the phosphate rock and fertilizers market with emphasis on West African countries for 1987.

The phosphate rock model aims to predict the flows of commodities from suppliers to the demand points, first assuming a free market, then with other bonds. The reported flows in business statistics constitute the base of comparison. The more new suppliers, the more critical their competitiveness is examined.

The model adapted to the phosphate fertilizers evaluates quantitatively the competitiveness of the West African producers compararatively with the import market.

These involve the whole transfert cost: production and transportation.

The results of the simulation for the phosphate rock portray fairly the comparison of the observed flows. The Morocco producers supply the European market. West African countries supply to Europe is due to certain business or political ties. Otherwise they would be supplying Asian or South American markets. In West Africa itself, Togo has the advantage to supply most of the fertilizer production units.

As far as the phosphate fertilizers are concerned, the high costs of production in the West African countries make the units of production less competitive than the import even for supplying the local demands.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail je voudrais remercier les personnes et organismes suivants :

- l'Agence Canadienne pour le Développement International (A.C.D.I.) qui m'a apporté le support financier nécessaire tout au long de mon séjour au Canada;
- mon directeur de recherche M. Jorgen Elbrond qui m'a conseillé et guidé tout au long de l'ouvrage; ses directives ont été déterminantes pour le résultat final;
- MM. Marc Tanguay et Daniel Leblanc qui ont accepté de faire partie de mon jury de thèse et m'ont fait des remarques et des suggestions qui ont amélioré le travail initial;
- M. Thomas Thomson qui m'a introduit auprès de l'IFDC et m'a permis de trouver auprès de cet organisme une quantité de données inestimables; je n'oublie pas le directeur du centre et le personel qui m'ont aidé sur d'autres plans lors de mon séjour;
- les cadres du Ministère des Mines et de l'ONAREM qui m'ont apporté leur soutien au Niger;
- Mme Micheline Legault des Services aux Etudiants de Polytechnique qui a toujours conduit avec diligence mes démarches administratives.

Merci aux responsables, au personnel de soutien et aux professeurs de la section Génie des Mines.

TABLE DES MATIÈRES

Titre----------Page

RÉSUMÉ.....v

ABSTRACT.....vii

REMERCIEMENTS.....viii

LISTE DES FIGURES.....ix

LISTE DES TABLEAUX.....x

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABRÉVIATIONS.....xviii

INTRODUCTION.....1

1. GÉOLOGIE.....8

1.1. Généralités sur la géologie des phosphates.....8

1.2. Cadre géologique régional.....9

1.3. Les ressources en phosphates.....12

1.3.1. Bénin.....13

1.3.2. Burkina Faso.....14

1.3.3. Ghana.....16

1.3.4. Mali.....16

1.3.5. Niger.....19

1.3.5.1. Les formations de Tahoua.....19

1.3.5.2. Les formations de W.....21

1.3.6. Nigeria.....23

1.3.7. Sénégal.....24

1.3.7.1. Les phosphates de Taïba.....25

1.3.7.2. Les phosphates de Thiès.....26

1.3.7.3. Les autres gisements du Sénégal.....27

1.3.8. Togo.....28

1.4. Aperçu sur le reste du monde.....30

2. EXPLOITATION - TRAITEMENT - TRANSPORT.....32

2.1. Caractérisation du minerai.....32

2.2. Problèmes liés à la caractérisation du minerai.....33

2.3. Exploitation minière.....35

2.4. Traitement.....37

2.5. Transport.....39

3. INDUSTRIE RÉGIONALE DES ENGRAIS PHOSPHATÉS.....43

3.1. Généralités.....43

3.2. Les techniques de fabrication d'engrais.....45

3.2.1. Roche pour application directe (RP).....45

3.2.2. Le superphosphate simple (SSP).....45

3.2.3. Le phosphate partiellement acidulé (PPA).....46

3.2.4. Acide phosphorique et engrais dérivés.....47

3.3. Situation de l'industrie en Afrique de l'Ouest.....48

4. LE MARCHÉ.....52

4.1. Données générales.....52

4.2. Utilisation des engrais.....54

4.3. Prévision de la demande.....57

4.3.1. Situation agricole.....58

4.3.2. Les réponses des cultures.....59

4.3.3. Prévision de la demande.....60

5. MODÈLES DE COÛTS ET ÉVALUATION.....64

5.1. Choix des projets et des opérations à évaluer.....64

5.2. Les méthodes d'estimation.....65

5.2.1. Les types d'estimation.....65

5.2.2. Les modèles de coûts.....66

5.2.2.1. Le modèle de O'Hara.....67

5.2.2.2. Le modèle de Borquez.....68

5.2.2.3. La méthode des coûts par consommations.....69

5.2.2.4. La méthode du USBM.....71

5.2.2.4.1. Construction du modèle.....71

5.2.2.4.2. Les composantes du coût.....72

5.2.2.4.3. Actualisation des coûts.....72

5.2.2.5. Autres modèles.....73

5.3. La méthode utilisée.....76

6. PROGRAMMATION LINÉAIRE ET MODÉLISATION DU MARCHÉ.....81

6.1. Programmation linéaire.....82

6.1.1. Forme générale.....82

6.1.2. Cas particulier: problème de transport.....83

6.1.2.1. Formulation.....83

6.1.2.2. Résolution.....84

6.2. Modélisation du marché.....84

6.2.1. Revue de la littérature.....86

6.2.2. Modélisation.....90

6.2.3. Justification du modèle.....99

7. RÉSULTATS ET DISCUSSION.....102

7.1. Marché du concentré.....102

7.1.1. Observations des flux commerciaux.....102

7.1.2. Cas de base.....103

7.1.3. Baisse du coût de transfert USA-Europe de l'Ouest.....104

7.1.4. Intégration et participation aux capitaux des entreprises.....105

7.1.5. Hypothèse sur l'exploitation de W et la mise en route de l'usine de l'ALG.....106

7.2. Marché des engrais.....107

7.2.1. Cas de base.....107

7.2.2. Variation de l'efficacité relative des différents types d'engrais.....110

7.2.3. Marché international en SSP.....110

7.2.4. Imposition de quota d'importation.....111

7.3. Conclusion.....112

CONCLUSION.....114

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....118

ANNEXE I.....125

ANNEXE II.....127

ANNEXE III.....134

ANNEXE IV.....136

LISTE DES TABLEAUX

Titre..... Page

1.1 Analyse chimique des phosphates de Kodjari.....15

1.2 Composition Chimique des phosphates de Tam.....18

1.3 Composition minéralogique des phosphates de Tahoua.....20

1.4 Composition minéralogique des phosphates de W.....23

1.5 Analyse.. chimique des phosphates d'aluminium de Thiès.....26

1.6 Analyse chimique du Phos-pal.....27

1.7 Composition chimique du concentré du Togo.....29

1.8 Résumé des caractéristiques des gisements.....29

2.1 Normes de qualité pour les concentrés de phosphate.....34

2.2 Paramètres d'opération des concentrateurs.....38

4.1 Superficie des pays et % des terres agricoles.....53

4.2 Population par pays et taux de croissance annuelle.....54

4.3 Consommations des pays par type d'engrais.....55

4.4 Consommation des pays par types d'éléments.....55

4.5 Consommation des engrais phosphatés par pays.....57

4.6 Résultats des essais agronomiques.....60

4.7 Consommation d'élément nutritif P_2O_5 de 1980 à 1987.....61

4.8 Projection de la consommation de P_2O_5 de 1987 à 1993 (hypothèse forte).....61

4.9 Projection de la consommation de P_2O_5 de 1987 à 1993 (hypothèse faible).....62

5.1 Facteurs d'ajustement et indice des prix pour le Sénégal.....77

5.2 Matrice origines-destination des coûts de production et de transport des concentrés (t P_2O_5).....79

5.3 Matrice origines-destination des coûts de production et de transport des engrais (t P_2O_5).....80

6.1 Exemple de résolution d'un problème de PL.....88

6.2 Matrice origines-destinations: concentré.....98

6.3 Matrice origines-destinations: engrais.....98

6.4 Listes des différentes unités de production.....99

IV.1 Matrice origines-destinations du concentré: Observation des flux commerciaux.....136

IV.2 Matrice origines-destinations du concentré: Flux observés modifiés.....137

IV.3 Matrice origines-destinations du concentré (résultats): Cas de base.....138

IV.4 Matrice origines-destinations du concentré (résultats): Baisse du coût de transfert USA-Europe de l'Ouest.....139

IV.5 Matrice origines-destinations du concentré (résultats): Liens commerciaux Europe-Afrique-USA.....140

IV.6 Matrice origines-destinations du concentré: Hypothèse sur W et ALG.....141

IV.7 Matrice origines-destinations du concentré: Hypothèse sur W et ALG (Relocalisation).....142

IV.8 Matrice origines-destinations des engrais (résultats): cas de

base.....143

IV.9 Matrice origines-destinations des engrais (résultats): variation des efficacité relatives des PR et PPA.....144

IV.10 Matrice origines-destinations des engrais (résultats): marché internationalenSSP.....145

IV.11 Matrice origines-destinations des engrais (résultats): imposition de quota à l'importation.(i).....146

IV.12 Matrice origines-destinations des engrais (résultats): imposition de quota à l'importation.(ii).....147

IV.13 Matrice origines-destinations des engrais (résultats): imposition de quota à l'importation.(iii).....148

LISTE DES FIGURES

Titre.....Page

1.1 Carte politique de l'Afrique de l'Ouest.....10

1.2 Carte géologique de l'Afrique de l'Ouest.....11

1.3 Localisation des gisements de phosphates.....13

1.4 les réserves modiales de phosphate.....31

1.5 Les grands pays producteurs.....31

2.1 Schéma du circuit de traitement de minerai à Kpémé (Togo).....39

2.2 Carte du réseau de transport.....41

3.1 Schéma de fabrication du SSP.....46

3.2 Schéma de fabrication de l'acide phosphorique.....49

3.3 Localisation des usines d'engrais.....51

4.1 Évolution de la consommation régionale de P_2O_5.....63

5.1 Coût en capital d'une roue-pelle: méthode du USBM.....74

5.2 Coût d'opération d'une roue-pelle: méthode du USBM.....75

6.1 Schéma du modèle.....92

6.2 Offre et demande intérieures de concentré.....94

6.3 Cadre géographique international du modèle.....95

6.4 Offre et demande intérieures d'engrais.....96

LISTES DES SYMBOLES ET DES ABRÉVIATIONS

$/t: dollar par tonne.

$/an: dollar par an.

$/t.km: dollar par tonne et par kilomètre.

$: dollar US.

$CAN: dollar Canadien.

μm: micromètre.

Φ: diamètre de trou.

ϕ: diamètre de la charge de la colonne.

Al_2O_3: oxyde d'aluminium.

ALG: Autorité du Liptako Gourma.

AM. SUD: Amérique du Sud.

AS: ammonium sulfate (sulfate d'ammonium).

As: arsenic.

B: fardeau.

Br: brome.

BRGM: Bureau de Recherche Géologique et Minière.

BUREM: Bureau de la Recherche Minière.

C: carbone.

Ca: calcium.

$Ca_{10-a-b}Na_aMg_b(PO_4)_{6-x}(CO_3)_xF_{2+0.4x}$: francolite.

$Ca_{10}(PO_4)4F_2$: fluorapatite.

$Ca_5(F,Cl,OH)(PO_4)_3$: formule chimique de l'apatite.

CaO: monoxyde de calcium.

$CaSO_4$: sulfate de calcium.

Cd: cadnium.

CES: Cost Estimation System.

Cl: chlore.

CO_2: dioxyde de carbone.

COTOMIB: Compagnie Togolaise des Phosphates du Bénin.

Cr: chrome.

CSPT: Compagnie Sénégalaise des Phosphates de Taïba.

DAP: Diamonium Phosphate (Phosphate Dibasique d'Amonium).

D_f: degré de fragmentation.

DMG: Direction des Mines et de la Géologie.

E.E. Europe de l'Est.

E.O.: Europe Occidentale.

Echt.: échantillon.

Ex: résistance de l'explosif.

F: fluor.

FAO: Food and Agriculture Organization.

FCFA: Unité monétaire de l'Afrique de l'Ouest (1$US = 320 FCFA, 1987).

Fe: fer.

Fe_2O_3:oxyde ferrique.

FSFC: Federal Superphosphate Fertilizer Company.

GTZ: Organisme Allemand de Coopération Technique.

h-p: homme-poste.

h/j: heure par jour.

H: hydrogène.

H_2F: acide fluoridrique.

H_2SO_4: acide sulfurique.

Ha.-Ak.: Hahotoé-Akoumapé.

Hg: mercure.

I ou Inv: Investissement.

ICS: Industrie Chimique du Sénégal.

IFDC: International Fertilizer Developement Center.

IRAT: Institut de Recherche en Agronomie Tropicale.

j: jour

K: potassium.

k: facteur représentant la structure géologique du terrain.

K_2O: oxyde de potassium.

kg: kilogramme.

km: kilomètre.

km: kilomètre.

kWh/t: kilowatteheure par tonne.

l/h: litre par heure.

M-O: main-d'oeuvre.

m/h: mètre par heure.

m: mètre linéaire.

M: million.

Ma: million d'années.

Mg: magnésium.

MgO: oxyde de magnésium.

MnO_2: dioxyde de manganèse.

MOP: Monoamonium Phosphate (phosphate monobasique d'ammonium).

Mo: molybdène.

Mt: million de tonnes.

N: azote.

N: Unité monétaire du Nigeria (1$Us= 4.2325 N , 1987).

Na: sodium.

Na_2O: oxyde de sodium.

NAFCON: National Fertilizer Company of Nigeria.

NE-SO: Nord/Est-Sud/Ouest.

NPK: engrais composés contenant de l'azote, du phosphore et du potassium.

O: oxygène.

°C: degré Celsius.

ONAREM: Office de la Recherche Géologique et Minière.

ONUDI: Organisation des Nations Unies pour le Développement Industriel.

OTP: Office Togolais des Phosphates.

P.W: Parc W.

P: phosphore.

p: taux de pénétration.

P_2O_5: pentoxyde de phosphore.

Pb: plomb.

Phos-Pal: Phosphate de Pallo.

PL: programmation linéaire.

PMC: phosphate monocalcique ($Ca(H_2PO_4)_2.H_2O$).

PNUD: Programme des Nations Unis pour le Développement.

PPA ou RPA: Phosphate Partiellement Acidulé.

ppm: partie par million.

R-X: rayon X.

r: charge sur le foret.

RP: roche phosphatée.

s: taille des fragments.

S: soufre.

Sc: résistance en compression uniaxiale.

SiO_2: Silice.

SIVENG: Société Ivoirienne des Engrais.

SO_3: trioxyde de soufre.

SSP: Single Superphosphate (Superphosphate Simple).

SSPT: Société Sénégalaise des Phosphates de Thiès.

t/j: tonne par jour.

t/h: tonne par heure.

t: tonne métrique.

Tam: Tamaguilet.

TiO_2: dioxyde de titane.

TPL: Triphosphate of Lime (Phosphate Tricalcique de Chaux).

Ts: résistance en tension.

TSP: Triple Superphosphate (Superphosphate Triple).

TSP: Triple Superphosphate (Superphosphate Triple).

U: uranium.

USA: États-Unis d'Amérique

USA: United State of America.

USBM: United State Bureau of Mines.

WI: indice de Bond.

Zn: zinc.

INTRODUCTION

Les objectifs premiers de l'industrie privée sont de réaliser des profits et de rester compétitive. Dans l'industrie minière ces critères sont affectés par les régulations gouvernementales mais surtout par la longue chaine d'activités et de transformations allant de l'exploration jusqu'à la vente du produit fini dont le minéral ne constitue très souvent qu'une infime partie. Lorsqu'un de ces objectifs n'est pas atteint, et s'il s'avère que l'activité est indispensable au maintient d'un certain équilibre national, le privé fait place au gouvernement. L'industrie minière des phosphates donne un exemple frappant de cette situation. Les engrais phosphatés destinés à l'agriculture en constituent le principal produit fini. Or l'agriculture tout en étant indispensable à la vie d'un pays, est aussi un secteur avide de subventions aussi bien dans les pays développés que dans les pays du Tiers-Monde. En particulier en Afrique de l'Ouest, à cause de la situation critique du secteur agricole, les gouvernements sont toujours parties prenantes dans le secteur de l'industrie phosphatée. Mais l'approche pour l'évaluation des projets d'exploitation des gisements ou de construction d'usine de transformation dans ce domaine se fait toujours par cas sans considération pour les producteurs voisins et à plus forte raison s'ils sont éloignés. Or la viabilité de tout projet dépend non seulement de ses mérites propres, mais aussi de l'interaction avec d'autres projets dans

le même secteur. À ce jour il n'existe pas de modèle d'approche globale pour l'industrie des phosphates et des engrais phosphatés en Afrique. Or ces modèles sont nécessaires non seulement pour évaluer la viabilité de certains projets et les avantages comparés, mais aussi pour asseoir des bases de coopération régionale.

Un modèle quantitatif de marché pour une matière première est une représentation formelle des échanges, de l'industrie ou de la firme. Dans cette représentation, les rapports et les relations considérés reflètent le processus de production, les lois du marché, et les institutions politiques et sociales.

Les modèles servent à expliquer le comportement ou l'histoire du marché (compétitif ou non), à analyser des politiques ou des scénarios en vue de prendre une décision ou de prévoir les variables prépondérantes dans le futur. Pour être réaliste un modèle doit intégrer les informations suivantes:

- les acteurs impliqués dans le marché,
- l'environnement social et politique,
- les contraintes techniques dans le processus de production,
- quelques principes d'économie régissant la production, la consommation et l'inventaire,
- un minimum de données sur le marché avec une certaine précision,
- la méthodologie à employer avec ses avantages et ses inconvénients.

La marche à suivre comprend l'identification du problème, l'adoption d'une approche avec la méthodologie adéquate, la spécification du modèle et son application au problème, la validation du modèle et son raffinement pour qu'il s'approche le mieux de la réalité. Le comportement à analyser détermine le choix du modèle ou de la méthodologie. Ceci permet de définir les variables d'intérêt et les types d'analyse de scénarios et de prédiction possibles. Par exemple l'analyse d'un réseau d'échange de produit nécessite l'adoption d'un modèle d'équilibre spatial qui représente les interactions entre le marché régional et national; les variables d'importance sont alors l'offre, la demande, les barrières tarifaires, les coûts de transport et les prix. L'analyse possible de scénarios porterait sur les taux de change, les quotas, et les coûts de transport.

Différents types de modèles servent à analyser différents type de comportements. On peut donner les exemples suivants:

Les modèles économétriques de marché représentent l'interaction entre l'offre, la demande, l'importation, l'exportation, le niveau des stocks, l'activité économique, les décisions politiques et les prix. Certaines de ces variables sont peu pondérables et l'efficacité de la méthode s'en ressent.

Les modèles économétriques de procédé partent d'une évaluation économétrique de la demande en produits finis et cherchent à satisfaire cette demande à partir des unités de productions en minimisant (par

programmation mathématique) les coûts de production. Ici l'accent est mis sur les coûts de production plutôt que les prix.

Les modèles d'équilibre spatial combinent aussi les modèles économétriques et la programmation mathématique. Il s'agit de satisfaire les demandes à partir des points d'offre en maximisant les profits. Les offres et les demandes sont évaluées de façon économétrique tandis que la maximisation des profits se fait par programmation linéaire. Les profits se basent sur les prix qui sont dérivés des coûts de production et de transport en ajoutant une marge bénéficiaire.

Les quelques exemples de modèles que nous avons cités utilisent tous l'économétrie qui fait appel au prix et à des variables exogènes qui sont au-delà du champ de compétence de l'ingénieur. C'est pourquoi ici nous adoptons une approche par programmation linéaire basée sur les coûts de production et transport. Le modèle sera formulé en problème de transport.

Les échanges tendent toujours vers les lois d'équilibre du marché caractérisé par des coûts globaux de transport et de production minimums. En effet, les consommateurs sont à la recherche des plus bas prix et s'adressent aux producteurs ayant les coûts les plus faibles. Or les prix cachent les coûts de production et de transport d'où la tendance vers des coûts minimums. L'équilibre peut ne pas être atteint par suite de changement de besoin des consommateurs ou de la concurrence d'un autre produit. D'autre part le système présente toujours une inertie causée par

les contrats à long terme et des considération non commerciales. On en tient compte en imposant des contraintes supplémentaires.

L'objectif de ce travail est de présenter une approche globale de l'industrie des phosphates avec l'accent mis sur l'Afrique de l'Ouest. Le modèle met en rapport les productions minières de concentré de phosphate, les industries régionales de production d'engrais phosphatés, les productions de roches pour une application directe en agriculture (minerai partiellement acidulé ou minerai brut), et les demandes régionales d'engrais phosphatés. Le modèle tiendra compte d'un marché international de concentré que convoitent d'autres pays producteurs en dehors de la zone d'étude et de l'offre en engrais phosphatés sur le marché mondial. La fonction objective consiste à minimiser le coût global de transfert (production et transport) de la tonne de P_2O_5 contenue dans l'engrais pour le système considéré.

La méthodologie qui sera utilisée ici est la suivante:

- les opérations minières et les usines d'engrais seront évaluées à l'aide de modèle de coûts ou par la méthode d'ingénierie utilisant des paramètres tirés de la littérature ou obtenus de façon informelle; les capacité de production constituent l'offre en concentré;
- les demandes en engrais des différents pays sont calculées à partir des publications d'organismes gouvernementaux et des agences spécialisées (FAO, Banque Mondiale, IFDC); les demandes des usines en concentré

correspondent à leur capacité; elles représentent aussi l'offre en engrais;

–les demandes du marché mondial en concentré sont obtenues à partir des publications du USBM;

– les coûts de transport sont obtenus à partir des tarifs appliqués dans la région pour ces types de produits; le transport international est calculé en utilisant un tarif appliqué dans l'industrie des phosphates;

– les différents coûts sont utilisés pour calculer les coefficients des variables du modèle;

– dans une première partie on détermine d'abord les courants optimaux du concentré en considérant les productions minières et les demandes des usines d'engrais phosphatés en ne tenant compte que des lois du marché. Ces résultats seront comparés aux valeurs réellement observées. Les écarts observés seront analysés et interprétés par des analyses de scénarios. L'analyse de la compétitivité sera faite en introduisant une offre additionnelle.

– les résultats ainsi obtenus permettent de calculer les coûts de production des usines; ces usines deviennent ensuite des points d'offre pour la demande en engrais phosphaté des différents pays; différents scénarios sont considérés.

Le travail comprend 7 chapitres délimités comme suit: le chapitre 1. présente la géologie générale de l'Afrique de l'Ouest en rapport avec la formation des phosphates; le chapitre 2. donne un aperçu sur la mise en valeur des gisements; les chapitres 3. et 4. présentent la technologie

de la fabrication des engrais, l'industrie régionale ainsi que le marché; le chapitre 5. présente le modèle de coûts ainsi que les méthodes d'estimation particulières; le chapitre 6. présente la programmation linéaire et son application; le chapitre 7. discute les résultats des différents scénarios.

1. GEOLOGIE

1.1. Généralité sur la géologie des phosphates

Les phosphates proviennent des minéraux phosphatés des roches éruptives dont le plus commun est l'apatite:

$$Ca_5(F,Cl,OH)(PO_4)_3$$

Les gisements de phosphate se classent en 2 groupes: les gisements d'origine ignée et les gisements sédimentaires. Ces derniers sont de loin les plus abondants et se subdivisent en gisements primaires, gisements remaniés et phosphorites.

Les gisements primaires ou marins se forment par précipitation chimique du phosphate sur les bords des plateaux continentaux après y avoir été amenés par des courants froids ascendants (upwelling).

Les gisements secondaires remaniés sont le résultat de la mise en mouvement des phosphates marins.

Les phosphorites résultent de l'accumulation de cadavres de vertébrés ou de leurs excréments. Ils accompagnent les argiles résiduelles.

La teneur des gisements s'exprime en % Pentoxyde de Phosphore, P_2O_5, ou en % Triphosphate of Lime, TPL.

$$1\% \ P_2O_5 = 2.1859 \ \% \ TPL.$$

1.2. Cadre géologique général.

L'Afrique est le 3ème continent en superficie; elle couvre 30 M de km^2 soit 3 fois l'Europe, 1.5 fois l'Amérique du Nord. Sa population est d'environ 500 M d'habitants. Du Nord au Sud et d'Est en Ouest les plus grandes distances sont respectivement 8000 et 7200 km. Même si l'équateur coupe le continent en 2 parties avec plus de 2/3 de celles-ci compris entre le Tropique de Cancer et celui de Capricorne, plus de la moitié est située dans l'hémisphère Nord à cause de la protubérance que forment l'Afrique de l'Ouest et du Nord.

La partie considérée dans cette étude se situe dans cette protubérance et regroupe 10 états de l'Afrique de l'Ouest au Sud du Sahara (Fig.1.1.). Trois de ces pays - Niger, Mali et Burkina Faso - n'ont pas d'accès à la mer. L'Afrique de l'Ouest a une ligne côtière assez régulière avec une plaque continentale uniformément mince au-delà des côtes.

Dans son ensemble le continent est constitué d'une seule plaque tectonique même si certains auteurs distinguent la partie à l'Est du Rift. Il est géologiquement stable, formé d'un socle précambrien métamorphisé, composé surtout de schistes et de gneiss, qui sont recouverts par endroits de couches sédimentaires. Cette stabilité est rompue en 3 endroits: à l'extrême Sud (roche d'âge hercynien du Cap), à l'extrême Nord (les orogénies tertiaires des Atlas) et les vallées du Rift au Nord-Est. Des invasions marines ont cependant eu lieu à des

moments au-dessus des plaines côtières et du Sahara pendant le Jurassique, le Crétacé et le Tertiaire.

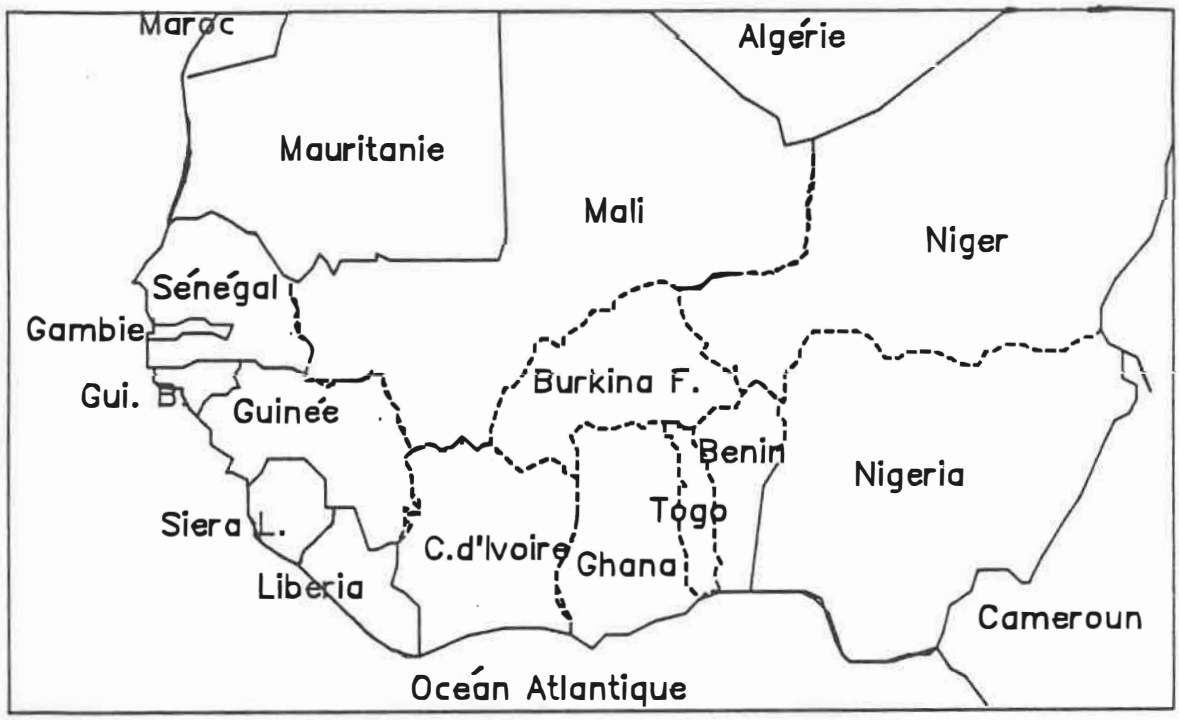


Fig. 1.1. Carte de l'Afrique de l'Ouest.

Les mouvements verticaux (épirogéniques) ont produit des affaissements et des surélévations qui se sont combinés pour donner des bassins

sédimentaires séparés par de hauts plateaux. Les chaines de montagnes jeunes sont les résultats des derniers mouvements tectoniques qui ont eu lieu entre 600 Ma et 450 Ma avant notre ère (Fig.1.2.).

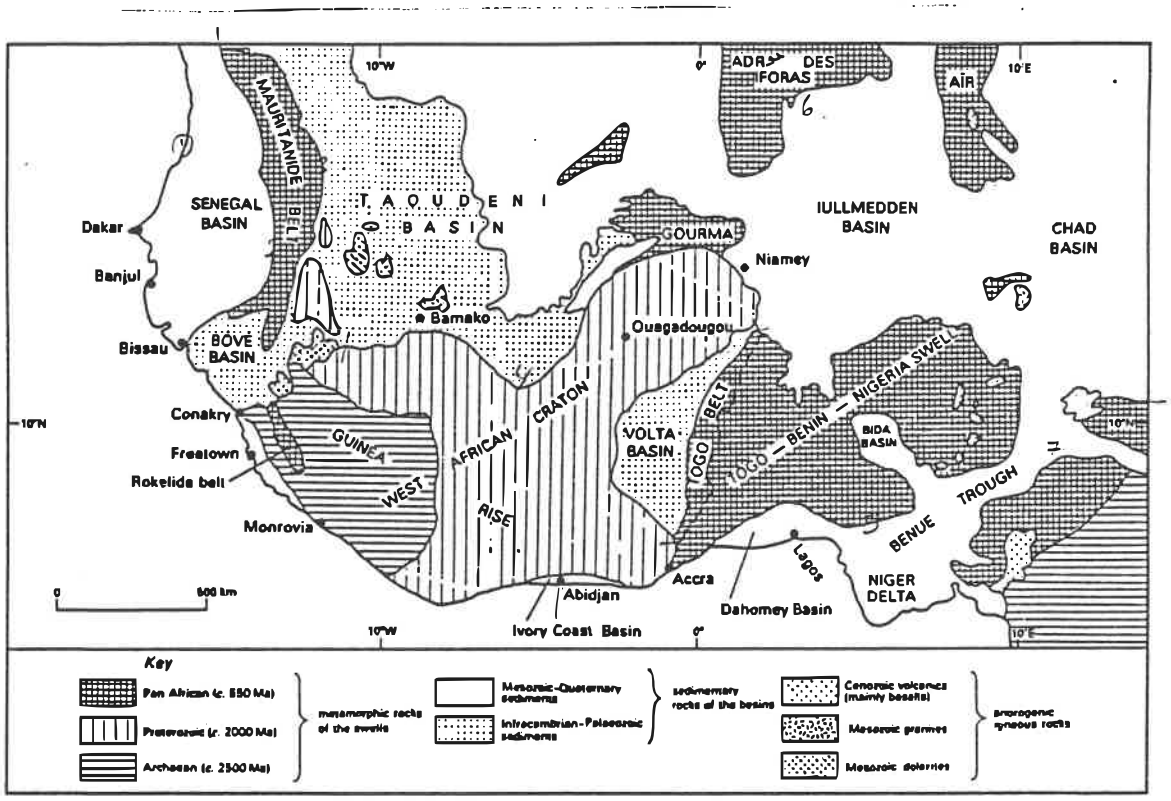


Fig. 1.2. Carte géologique de l'Afrique de l'Ouest.
Source: D'après Wright, Hasting, Jones et Williams [86].

En Afrique de l'Ouest les bassins se regroupent en bassins anciens dont les sédiments sont d'âge précambrien (-2500 Ma, -600 Ma) et bassins

jeunes qui se rapportent à l'Éocène. Le 1er groupe comprend le bassin de la Volta, le bassin de Taoudeni, celui de Bové et la dépression de Gourma. Le groupe des bassins jeunes comprend les bassins intérieurs de Iullmedden et du Tchad, et les bassins côtiers du Sénégal, du Dahomey et du Delta du Niger. Les sédimentations se sont produites en conditions marines pendant les périodes de transgression et se sont poursuivies en conditions fluviales ou lacustres en périodes de régression. La phosphatogenèse s'est produite dans ces mêmes conditions; elle est de nature chimique en conditions marines par le phénomène des courants ascendants (upwelling), ou résultat d'activités biologiques en milieux lacustres. Les gisements de phosphate en Afrique de l'Ouest sont donc de type sédimentaire. On retrouve les mêmes phénomènes en Afrique du Nord où ces formations forment la plus grande réserve phosphatée au monde, la province du Thetian phosphogénique qui s'étend du Maroc à l'Egypte. Les ressources en phosphates y sont considérables.

1.3. Les ressources en phosphate.

En Afrique de l'Ouest les ressources en phosphate sont limitées même si on trouve des indices un peu partout. On évalue les réserves à 4900 Mt surtout dans les bassins jeunes du Sénégal et du Dahomey [60]. Tous les pays recèlent des indices et les conditions technico-économiques d'exploitation sont différentes. Nous passons ici en revue les gisements

avec leurs caractéristiques physiques. La Figure 1.3. indique les différentes localisations.

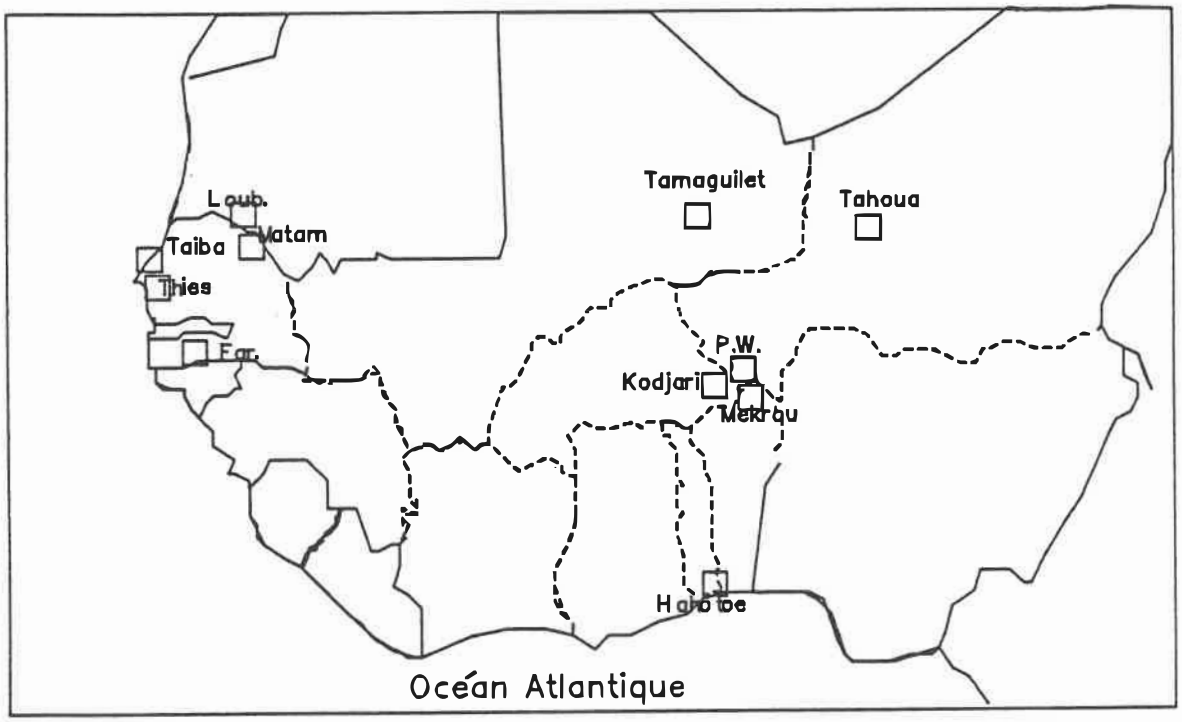


Fig. 1.3. Localisation des gisements de phosphate.

1.3.1 BÉNIN

Le Sud du pays fait partie du bassin de Dahomey et recèle des indices d'âge éocien. Les recherches depuis 1952 n'ont pas mis en

évidence des gisements de valeur commerciale à l'instar du Togo. Par contre le Nord appartient au bassin précambrien de la Volta. Le Service des Mines du Bénin y a mis en évidence vers la fin des année 70 le gisement de la Mékrou. Ce gisement d'âge précambrien a des suites au Niger et au Burkina Faso.

La minéralisation se compose de séquences de grès phosphatés séparées par des couches de shales. Un programme du PNUD a évalué le périmètre le plus prometteur (Sud Marikiné). Les réserves prouvées sont de 3.3 Mt à 25.1% P_2O_5 sous forme de mort terrain sur une étendue de 0.225 km^2 et environ 6 m d'épaisseur [60]. Aucune étude minière n'a suivi.

1.3.2. BURKINA FASO

Les formations de phosphates se situent au Sud-Est du pays en bordure du bassin de la Volta. Ce sont les gites de Kodjari, Arly et Aloub Djouana. La ville la plus proche est Diapaga située à 42 km au Nord de Kodjari et 56 km au Sud de Kantchari. Kantchari est à 375 km à l'Est de Ouagadougou sur l'axe routier Ouagadougou-Niamey. La route reliant Diapaga à Kantchari est une piste latéritique permanente tandis que les liaisons avec Kodjari, Arly et Aloub Djouana sont impraticables en saison des pluies.

Le gisement le plus connu est celui de Kodjari. La coupe lithologique de bas en haut sur 50m présente

- une couche gréseuse,

- des tillites basales,
- des lentilles carbonatées,
- une zone de cherts (silexites),
- une zone de shales et siltites presque à découvert.

La minéralisation est portée par cette dernière couche et est constituée de fluorapatite carbonatée sous forme de grains microscopiques, subsphériques ou ovales, de 35 à 300 μm de diamètre avec une moyenne de 80 μm. Elle est associée à des débris de quartz, des argiles, de la pyrite et des oxydes de fer.

La composition minéralogique est la suivante:

#Echt	P_2O_5	SiO_2	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	MgO	K_2O	F
1	27.83	24.07	40.00	1.30	2.42	0.19	0.20	2.70
2	28.35	20.90	41.45	1.38	3.18	0.39	0.50	2.80
3	19.70	29.25	34.56	1.70	3.31	2.11	0.60	1.90

Tableau 1.1. Analyse chimique des phosphate de Kodjari.
Source: Phosphate Deposits of Tropical Sub-saharan Africa by G.H. McClellan and A.J.G. Notholt [51].

L'épaisseur de la couche minéralisée varie de 1 à 5 m et la teneur varie de 20% à 32% P_2O_5 avec une moyenne de 27.5%.

Les réserves sont évaluées à [29]:

Kodjari	60 Mt à 26-27% P_2O_5 découvert au 1/3
Arly	3 Mt à 29% P_2O_5
Aloub Djouana	50-100 Mt à 29% P_2O_5

Le gisement de Kodjari est exploité en carrière depuis 1978 au taux de 200t/j.

1.3.3. GHANA

Des nodules phosphatés titrant 14.75% P2O5 ont été retrouvés dans les shales du Sud-Ouest du pays (région de Sekondi) mais n'ont aucun intérêt économique.

Les sédiments précambriens du bassin de la Volta, porteurs de minéralisation au Niger, au Burkina Faso et au Bénin sont répandus au Ghana mais leur potentiel en phosphate n'a pas été évalué.

1.3.4. MALI

Les phosphates du Mali se situent à l'Est du Pays en bordure Ouest et Sud du massif précambrien de l'Adrar des Iforas (Fig.1.3.). Le gite le plus connu est celui de Tamaguilet, coline située sur la rive gauche de la vallée fossile de Tilemsi. Mais les indices s'étendent sur toute la région. Les villes les plus proches de Tamaguilet sont Gao et Bourem au Sud sur le fleuve Niger respectivement à 170 et 120 km. Le climat est de type sahélien avec des températures variant de 14°C en décembre à 44°C en mai et des vents de sable de secteur Nord-Est. Gao est relié à Niamey et Mopti par des routes praticables en toute saison.

La connaissance du gisement a connu plusieurs étapes:

– découverte des indices de phosphate à l'Est du pays: Th. Monod (1927–1935), V. Perebaskine (1932);

– découverte du gisement de Tamaguilet: M. Chidaine et V. Urvoy (1935); ils estiment les réserves à 15 Mt à 26–31% P_2O_5;

– prospection minière détaillée par la réalisation de puits et analyse chimique des échantillons: A. Allon (1957–1959);

– reconnaissance géologique et synthèse des travaux réalisés: BRGM–France (1979–1980);

– études technico-économiques de mise en valeur: KLOCKNER, IFGRARIA, ONUDI, IFDC, GTZ, IRAT...

Il ressort que: les phosphates de Tamaguilet sont des dépôts résultant d'intenses activités biologiques en milieu lagunaire confiné, en voie d'assèchement et à affinité tropicale (Éocène moyen). La minéralisation est sous forme de collophanite avec de l'apatite microcristalline. L'endogangue stérile est faite de quartz, de paillettes d'argile et d'oxydes métalliques. La composition minéralogique n'est pas très homogène et peut être donnée comme suit:

#Echt	P2O5	SiO_2	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	MgO	MnO_2
1	31.73	3.29	45.68	5.10	3.50	0.17	1.58
2	28.28	10.65	41.08	7.90	4.94	0.05	1.19
3	28.70	10.65	42.76	7.10	2.76	0.13	0.89

Tableau 1.2. Composition chimique des phosphates de Tam
Source: Phosphate deposits of tropical sub-saharan Africa by G.H. McClellan and A.J.G Notholt [61].

Au plan minier, les niveaux phosphatés affleurent sur plusieurs km le long de la vallée. L' affleurement sur la colline de Tamaguilet a 7 km^2 de superficie. Les couches ont 1 à 4 m d'épaisseur avec une moyenne de 2 m. Le mort terrain de 2 à 9 m est constitué d'argile. Les réserves sont évaluées à 12 Mt de produit meuble titrant 18 à 31.5% P_2O_5 dont:

- 2 Mt à l'affleurement accessibles sous moins de 2 m de mort terrain,
- 10 Mt sous 2 à 25 m de stérile.

Les autres gites sont dispersés et peu connus. Les réserves possibles s'évaluent à 20 Mt.

L'exploitation du gisement de Tamaguilet a commencé en 1976 en vue de pourvoir la consommation domestique d'engrais phosphatés.

1.3.5. NIGER

Trois régions recèlent des indices de phosphate au Niger:

- des formations sédimentaires datant du Crétacé Supérieur ont été rapportés par le BRGM-France (1954-1955) à Ashia Tinamou au Nord-Est de Zinder à 45 km au Sud-Ouest du massif de Termit [15]. Ces formations d'origine marine n'affleurent nulle part et se situent à des profondeurs de plus de 150 m, ce qui leur enlève tout intérêt économique;
- les formation du Paléocène de Tahoua;
- les formations du Précambrien du W (Tapoa, Mékrou).

1.3.5.1. Les formations de Tahoua

On trouve les indices de phosphate dans les formations sédimentaires de tout l'Adar Doutchi. Les gites de In Akker et de Tawaswas à 5 km l'un de l'autre et 60 km au Nord-Ouest de Tahoua sont les plus connus.

Tahoua est situé à 550 km au Nord-Est de Niamey. Les gites minéralisés sont reliés à la ville par des pistes en terre, praticables sauf en saison de pluies (Juin-Sept). La connaissance actuelle des sites est le résultat des principaux travaux suivants:

- découverte des indices: J. Greigert;
- reconnaissance spécifique pour phosphate: J. Roure (1948);
- prospection détaillée: Watt-Griffis-Mac-Ouat Inc.(1970-1971);

- travaux de reconnaissance: DRGM-Niger (1980);
- analyses chimiques et minéralogiques: Truong et al. (1978), IFDC (1985).

Les dépôts sont d'origine marine et de milieu confiné. Les niveaux à découvert se localisent dans une série argileuse surmontant des calcaires et des marnes du Paléocène. Ils sont seulement masqués par une pellicule d'alluvions et de sable éolien.

La minéralisation de 3 à 5 m d'épaisseur est portée par des nodules de 10 à 30 cm de diamètre inclus dans la série argileuse. Les nodules sont de grande dureté et sont en partie enrobés d'oxydes métalliques. ils sont composés d'apatite à plus de 70%, de goethite, d'argile, d'oxydes et de silice. Leur composition minéralogique est très variée mais peut être donnée comme suit:

Echt.	P_2O_5	SiO_2	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	MgO	CO_2	F	Cl
1	28.61	14.27	35.56	6.28	3.02	0.28	-	-	-
2	30.86	10.85	37.73	5.75	2.19	0.27	-	-	-
3	29.90	14.30	43.12	-	9.30	0.21	0.3	0.2	2.6
4	27.90	11.70	39.00	10.30	2.10	0.20	0.5	-	-

Tableau 1.3. Composition Minralogique des phosphates de Tahoua

Source: Phosphate deposits of tropical sub-saharan Africa by G.H. McClellan and A.J.G Notholt [61].

Au plan minier il n'y a pas d'évaluation des réserves. Le niveau phosphaté a 1 à 4% de nodules et moins de 10% du niveau est composé de plus de 2% en nodules sur une superficie de 500 km^2 [24]. Le taux de découverture est nul.

L'exploitation du gisement a commencé en 1975 de façon semie-artisanale avec les opérations suivantes:

- décapage superficiel,
- rippage des niveaux phosphatés;
- ramassage des nodules à la main;
- transport des nodules sur Tahoua par camions.

Une station de concassage-broyage-ensachage à Tahoua conditionne le produit broyé qui est mis en sac de 50 kg destiné à l'épandage direct en agriculture. La capacité de la station est de 2.5 t/h. L'opération est en arrêt depuis 1984 à cause de problème de commercialisation.

1.3.5.2. Les formations du W

Les phosphates du W se situent 150 km au Sud de Niamey, à proximité des rivières Tapoa et Mékrou, 8 km à l'intérieur du Parc National de W. Le parc, à cheval sur la frontière du Niger, du Burkina Faso et du Bénin, constitue également la plus importante réserve du pays pour la faune. La ville la plus proche est Say, 100 km par piste carrossable en saison sèche.

Au plan géologique les formations se situent en bordure Nord-Est du bassin de la Volta, ce qui les relient aux gisements du Bénin et du Burkina Faso. Mais ici les sédiments sont plissés. Les principaux travaux réalisés à ce jour sont:

- découvertes des indices: M. Pascal (1970-1972);
- confirmation des indices: Iron Essex Comp. (1973);
- recherche par sondages: DMG-Niger (1974) et BUREM-Niger (1975);
- évaluation des réserves : ONAREM-Niger (1979-80);
- évaluation des propriétés minéralurgiques: SNC, IFDC (1981).

Le secteur de la Tapoa est le plus connu et la plupart des données se rapportent à cette région.

Les dépôts apparaissent au sein d'une structure synclinale assymétrique d'axe NE-SO, les flancs Est et Ouest pendant entre 10° et 20° et 20° et 30° respectivement. La minéralisation est dans une séquence de grès grossiers, moyens puis fins de bas en haut. Cette séquence a jusqu'à 68 m d'épaisseur au centre du synclinal sous 200 m de sédiments argileux, mais affleure du côté Ouest. La couche de grès moyens est la plus riche (20 à 32% P_2O_5). Au plan minéralogique, le grès est composé d'apatite dans un ciment de silice, d'argile et de goethite. La grosseur des grains varie entre 50 et 250 μm. La composition chimique est donnée comme suit:

P_2O_5	SiO_2	CaO	Fe_2O3	Al_2O_3	MgO	K_2O	CO_2	Na_2O	F
28.9	25.7	39.9	1.9	1.0	0.03	0.04	1.2	0.13	1.5

Tableau 1.4. Composition Minralogique des phosphates de W
Source: Phosphate deposits of tropical sub-saharan Africa
by G.H. McClellan and A.J.G Notholt [61]

Les essais de traitement ont montré que le minerai se prête bien à la flottation même si le taux élevé de silice exige un broyage poussé pour la maille de libération (WI = 12.9 kWh/t pour 200 mailles) [61].
Les réserves géologiques sont énormes et sont évaluées à plus de 335 Mt à 24.5% P_2O_5 pour le seul secteur de la Tapoa [43].
L'intérêt minier porte surtout sur le secteur Ouest où on évalue les réserves sur une superficie de 18 km^2 et sous 7 à 10 m de cuirasse ferrugineuse à:

- réserves prouvées: 70 Mt à 27.8% + 47 Mt à 24.8% P_2O_5
- réserves possibles: 90 Mt à 27% P_2O_5.

1.3.6. NIGERIA

Des indices de phosphates furent découverts au Nigeria dès 1921 par le Geological Survey of Nigeria au Sud-Ouest du pays dans la Province d'Abéokuta, 50 km au Nord de Lagos. Des travaux subséquents en 1958 ont montré que le dépôt était en couches intercalées de très faible épaisseur

avec un taux élevé de phosphate d'aluminium. La couche supérieure est sous 3 m de mort-terrain et n'a que 1 m d'épaisseur. Son exploitation produirait 20 000 t de minerai à 22%-32% P_2O_5 [61]. Les couches inférieures n'ont que quelques cm à 1 m de puissance à plus de 15 m de profondeur. L'intérêt économique est alors nul.

Les dépôts sont équivalents en âge aux formations du Togo.

1.3.7. SÉNÉGAL

Le Sénégal recèle d'importantes réserves en phosphate qui ont donné naissance à une industrie minière et chimique.

Il est avec le Togo exportateur de concentré et occupe le 7ème rang mondial avec une production autour de 1.8 Mt/an de concentré à 38% P_2O_5.

Les principaux dépôts sont de type sédimentaire formés dans le bassin côtier du Sénégal à l'Éocène sur les plaques continentales et en milieu marin. Les plus connus sont ceux exploités depuis 1960 à Taïba par la Compagnie Sénégalaise des Phosphates de Taiba (CSPT); ceux à côté de Thiès exploités par la Société Sénégalaise des Phosphates de Thiès (SSPT); d'autres gisements existent à l'Est dans la Région du Fleuve (Matam), dans la région de Saint-Louis et au Sud en Casamance.

1.3.7.1. Les phosphates de Taïba

Le complexe minier de Taïba est situé à 20 km au Nord-Ouest de Tivaouane. Tivaouane est situé à 93 km de Dakar sur la voie ferrée Dakar-St-Louis (Fig.3.3.).

Les gisements occupent le côté Sud-Ouest d'un bassin phosphaté de 22 km * 10 km et se divisent en 2 zones: la zone de Keur Mor Fall (1000 ha sur 1.6 km de largeur) aujourd'hui en exploitation et celle de Tobéné au Sud (2500 ha).

L'horizon phosphaté a une épaisseur moyenne de 7 m mais peut atteindre 15 m par endroits. Il comprend une couche inférieure très hétérogène caractérisée par la présence de nombreux silex et une couche supérieure homogène et plus riche. Le tout repose sur une couche d'argile à attapulgite homogène. Le toit du gisement est constitué d'argile surmontée par une formation de phosphate oxydé. Le tout est recouvert de sable dont l'épaiseur varie de 15 à 40 m avec une moyenne de 25 m. Les réserves minières sont évaluées à l'équivalent de 70 Mt de concentré à 37% P_2O_5 (25 Mt aujourd'hui). La minéralisation est faite de fluorapatite avec comme impuretés la silice, la calcite et les ferals (oxydes de fer et d'aluminium).

L'exploitation minière sous forme de stripping a connu plusieurs modifications depuis son démarrage en juin 1960.

1.3.7.2. Les phosphates de Thiès

À Thiès, 93 km à l'Est de Dakar, les phosphates appartiennent au même contexte géologique que ceux de Taïba avec cependant une particularité. Alors qu'à Lam-Lam (16 km au Nord-Est de Thiès) le dépôt est constitué de phosphates de chaux normaux, à Pallo (15 km au Nord de Thiès) ils ont subi une latérisation poussée et sont sous forme de phosphates d'aluminium. Les 2 gisements sont exploités par la SSPT.

A Pallo, l'exploitation du phosphate d'aluminium se fait en carrière. Les couches minéralisées ont en moyenne 17 m d'épaisseur sous 2.5 m de mort-terrain ferrugineux [64]. Les réserves prouvées sont estimées à 100 Mt à 28-29.5% P_2O_5 avec 6 à 10% de Fe_2O_3 et 27 à 32% de Al_2O_3. Une analyse échantillonnale du minerai est donnée comme suit:

P_2O5	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	TiO_2	H_2O
28.04	7.58	5.51	25.86	13.84	1.39	14.9

Tableau 1.5. Analyse chimique des phosphates d'aluminium de Thiès.
Source: World Survey of Phosphate Deposits [65].

L'exploitation au taux de 600 000 t de minerai par an comprend:

- un décapage du mort terrain au bulldozer et dumper;
- un sautage à l'explosif ou parfois un simple rippage;
- un chargement;

- un transport par camion jusqu'à l'usine de traitement située à Lam-Lam.

Pour le traitement on effectue une coupure granulométrique à 4 mm. Les fines sont rejetées; les grossiers sont utilisés soit pour la production du "Phos-Pal" après simple broyage, soit pour l'exportation après avoir été calcinés et broyés. Le Phos-Pal est utilisé directement en agriculture et sa composition est donnée comme suit:

P_2O_5	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	TiO_2	H_2O
34	35	10.4	11.5	2.9	1.7	0.3

Tableau 1.6. Analyse chimique du Phos-Pal.
Source: Phosphorus and Potassium No 75, Janvier/Février 1975.

L'exploitation des phosphates de chaux à Lam-Lam se fait suivant les mêmes opérations minières. Le traitement du minerai consiste en un lavage et classification. La capacité de production est 150 000 t/an de concentré à 33% P_2O_5. Les réserves sont évaluées à 4 Mt d'équivalent concentré [64]. Les couches minéralisées ont 7 m d'épaisseur sous 24 m de mort-terrain.

1.3.7.3. Les autres gisements du Sénégal

Le Nord-Est de la Région du Fleuve à cheval sur la frontière avec la Mauritanie constitue une zone de déposition comme la région de Thiès. L'autre zone est celle du Sud sur la frontière avec la Guinée Bissau.

Les gisements de Ouadi-Douala (Matam) dans la Région du Fleuve ont 40 Mt de réserves prouvées à 28.7% P_2O_5. Les couches minéralisées ont en moyenne 3 m d'épaisseur sous 4 à 16 m de mort-terrain [70]. On trouve des formations analogues de l'autre côté de la frontière avec la Mauritanie (Bofal et Louboïra) [35].

Au Sud, les indices découverts en Casamance sont la suite des gisements de Farim-Saliquinhé découverts de l'autre côté de la frontière en Guinée Bissau [72].

1.3.8. TOGO

Les gisements de phosphate du Togo sont situés à 26 km de la mer au Sud du Pays. Ils s'étendent sur une bande de 35 km * 2 km de direction NE-SO, au Nord du Lac Togo. L'Office Togolais des Phosphates (OTP) par l'entremise de la COTOMIB (Compagnie Togolaise des Mines du Bénin) exploite la carrière de Hahotoé depuis 1961 et a ouvert une 2ème à Akoumapé en 1973. Une voie ferrée de 26 km relie l'exploitation aux installations de traitement de minerai et au port d'embarquement à Kpémé.

La formation est de type sédimentaire datant de l'Éocène dans le bassin côtier du Dahomey. Elle se trouve dans une série d'argile et de shales avec des inclusions de calcaires et de grès. Dans les parties exploitées présentement il y a 2 couches minéralisées séparées par une couche d'argile. Seule la couche supérieure est exploitée. La minéralisation est constituée d'oolithe et de gravier.

L'épaisseur de la couche exploitée varie de 2 à 6 m, celle du mort-terrain de 7 à 30 m. Les réserves sont évaluées à 130 Mt d'équivalent concentré à 36% P_2O_5 [64].

La capacité de production est 4.5 Mt/an de concentré. La composition du concentré est la suivante:

P_2O_5	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O	SiO_2	Cl	F	CO_2	SO_3
36.2	51.2	1.5	1.0	0.15	0.2	0.07	2.99	0.1	3.9	2.0	0.3

Tableau 1.7. Composition chimique du concentré du Togo.
Source: World Survey of Phosphate Deposits [65].

Pays	Dépôt	Réserves Mt	Teneur %P_2O_5	Épaisseur m Mort-terrain	Minerai	Formation Géologique Type	Age
Bénin	Mékrou	3.3	25.1	30	6	Séd. primaire	Cambrien
Burkina	Kodjari	60	27.5	< 1	1 - 15	Séd. primaire	Cambrien
Mali	Tilemsi	12	28	0 - 5	1 - 4	Phosphorite	Éocène moyen
Niger	Tapoa	70	27.8	7 - 10	> 10	Séd. primaire	Cambrien
	Tahoua	-	-	< 1	3 - 5	Phosphorite	Éocène
Sénégal	Taïba	90	28.5-29.5	25	7	Séd. primaire	Éocène moyen
	Lam-Lam	5		24	7	Séd. primaire	Éocène moyen
	Pallo	10	28 - 29.5	2.5	17	Séd. primaire Altéré	Éocène
	Matam	40	28.7	5 - 16	3	Séd. primaire	Éocène
Togo	Ba.- Ak			7 - 3	2 -	Séd. primaire	Éocène

Tableau 1.8. Sommaire des gisements et leurs caractéristiques.

1.4. Aperçu de la situation mondiale.

Les Figures 1.5. et 1.6. ci-après donnent les réserves et les productions mondiales pour 1987 selon le USBM. Les plus grosses réserves se situent en Afrique du Nord (Maroc surtout) et aux États-Unis.

Les réserves du Maroc sont de type sédimentaire et sont localisées dans quatre régions du pays: le Plateau d'Oulad Aboun, le Plateau de Ganntour, le district de Melaska et le Bassin de Bou Craa dans le Sud.

Aux États-Unis les réserves sont de type sédimentaire dans le Sud-Est (Floride et Caroline du Nord) et de type igné dans l'Ouest (Idaho, Montana, Utah, Wyoming).

En 1987 27 pays produisent du phosphate mais trois pays contribuent pour plus de 80% de la production mondiale: les ÉTats-Unis, l'URSS et le Maroc. Dans ces pays l'industrie est très concentrée. Par exemple 95% de la production américaine est entre les mains de 15 compagnies et toute la production du Maroc est contrôlée par l'OTP (Office Chérifien des Phosphates). On observe aussi une tendance à une intégration verticale, les compagnies prenant de plus en plus contrôle de la mine, du concentrateur, et des usines d'acide phosphorique et d'engrais.

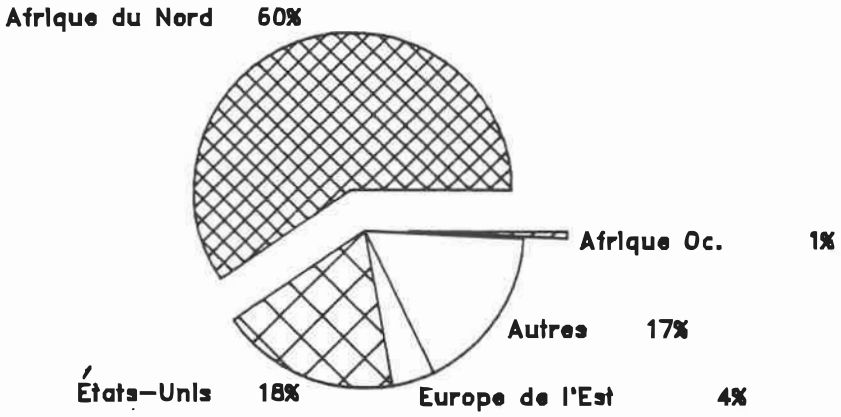


Fig. 1.4. Réserves mondiales
(Total 35.7 milliards de t > 5%)
Source: International Strategic Minerals Summary Report – Phosphate, 1984.

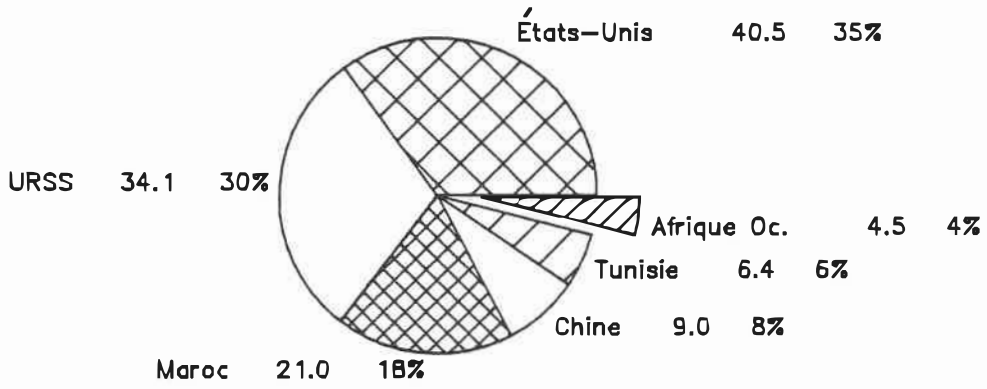


Fig. 1.5. Les grands producteurs
(Mt P205 1987)
Source: Mineral Industry Survey, Jan. 1989.

2.. EXPLOITATION - TRAITEMENT - TRANSPORT

La mise en valeur des gisements de phosphate en Afrique de l'Ouest revêt deux aspects: l'identification de réserves importantes dans les pays ayant un accès direct à la mer a développé une industrie minière de production de concentré destiné surtout au marché international (Sénégal, Togo); d'autre part la mise en évidence de la carence des sols en phosphore et de la disponibilité des réserves a suscité l'intérêt d'exploiter ces gisements pour fabriquer des engrais.

L'évaluation commence par une étude détaillée de la minéralogie et la pétrographie. Cette étude indique les constituants du minerai, sa teneur et sa qualité en fonction des normes indutrielles. Elle suggère les utilisations comme:

- produit pour application directe,
- fabrication de concentré pour acidulation,
- production de phosphate calciné,
- etc.

2.1. Caractérisation du minerai

Elle consiste à déterminer la composition chimique et minéralogique et à évaluer les potentialités pour le traitement par voie physique (broyage, classification), chimique (flottation) ou la réactivité avec le sol.

L'apatite sédimentaire se présente dans la série de substitution entre la fluorapatite ($Ca_5(PO_4)_3F$) et la francolite ($Ca_{10-a-b}Na_aMg_b(PO_4)_{6-x}(CO_3)_xF_{2+0.4x}$ où a, b et x sont des facteurs de substitution). D'autres éléments peuvent s'associer à cette composition de base; ce sont les oxydes Fe_2O_3 et Al_2O_3 qui peuvent se substituer au Na et Mg.

La première étape pour caractériser le minerai consiste à déterminer la forme exacte de l'apatite dans la série de substitutions. Les techniques utilisées sont:

- l'analyse chimique,
- l'analyse par R-X,
- la diffraction par poudre,
- l'analyse par microscope en lumière polarisée.

A partir de la composition chimique du minerai (apatite plus gangue) et la répartition des éléments entre l'apatite et la gangue, on détermine le % de l'apatite dans le minerai. Ceci permet d'envisager le mode de traitement.

D'autre part, le degré de substitution des éléments Na, Mg, CO_3 détermine la réactivité du minerai.

2.2. Problèmes liés à la caractéristique du minerai

Dans une perspective industrielle un minerai est dit à problème s'il se prête mal à la production d'acide phosphorique. Les variables

considérées sont la teneur en P_2O_5 et les impuretés. Les plus critiques de celles-ci sont la teneur en silice, la teneur en carbonates et les teneurs en ions métalliques dérivés de la dégradation des oxydes, des hydroxydes et des argiles. Les spécifications industrielles pour les teneurs du concentré en différents composés sont données dans le Tableau 2.1..

Composé ou rapport	Limites de la teneur ou du rapport
P_2O_5	28%-42%
$CaO:P_2O_5$	1.32-1.61
$(Fe_2O_3+Al_2O_3):P_2O_5$	< 0.10
$MgO:P_2O_5$	< 0.022
$(Fe_2O_3+Al_2O_3+MgO):P_2O_5$	< 0.12
$F:P_2O_5$	> 1.05
Cl	< 3000 ppm
U	< 100 ppm
Cd, As, Fe, Pb, Cr, Hg	< 10 ppm

Tableau 2.1.: Normes de qualité pour le concentré de. phosphate

Source: Phosphate Deposits of Tropical Sub-Saharan Africa by G.H. McClellan and A.J.G. Notholt [61].

Les minerais à problèmes sont classés en minerais à silice, minerai à carbonates et minerais à oxydes métalliques. Certains minerais peuvent présenter une combinaison de ces problèmes.

La silice se présente sous forme de quartz amorphe qui exige un traitement poussé jusqu'à la flottation. Les coûts de réduction et de réactifs sont élevés.

Les carbonates sont nuisibles parce qu'ils augmentent la consommation d'acide sulfurique et produisent des mousses qui limitent les réactions dans la fabrication d'acide phosphorique. La seule méthode pour réduire le taux en carbonates est la calcination, ce qui augmente le coût d'énergie.

Les ions métalliques ont pour effet de réduire les propriétés de surface de la roche.

D'autres impuretés comme les chlorures, les matières organiques et les métaux lourds peuvent causer des problèmes et nuire à la qualité du minerai.

2.3. Exploitation minière.

Le phosphate est un produit de faible valeur marchande par unité de poids. Pour déterminer à quel point un gisement est exploitable il faut fixer des limites pour un certains nombre de facteurs techniques et économiques. Ces limites sont très flexibles et leur choix est propre à chaque gisement car il n'y a pas de conditions identiques. On peut toutefois les fixer à partir des cas d'exploitation à succès dans des conditions comparables. Ces facteurs sont: les caractéristiques géologiques du gisement, le taux de découverture, la méthode de minage,

la teneur et la qualité du minerai, le taux de récupération, le rapport de concentration et le transport.

Les phosphates sont à 90% exploités en surface. Deux méthodes sont généralement utilisées: le stripping et l'exploitation en fosse.

Le stripping est de loin la méthode d'exploitation la plus répandue. 70% de la production mondiale de phosphate se fait de cette façon. Il s'applique dans les formations tabulaires, peu profondes et pas très dures. Comme pour le charbon ou la potasse, l'opération se fait aux draglines, excavateurs à godets, pelles mécaniques et camions.

Les dépôts massifs exigent l'usage d'explosifs et sont exploités en fosses.

Les taux de découvertures sont élevés (1 à 10) et les opérations exigent une grande capacité de manutention. C'est le cas au Sénégal et au Togo.

Il y a peu de publication sur les données d'opérations de ces exploitations. Les rares informations proviennent du USBM et sont fragmentaires. Une analyse des chiffres montre que les coûts d'opérations par tonne de concentré sont dans la gamme des coûts les plus bas au monde ($22.00 contre $22.50 au Maroc, $15.50 en Floride) [20]. Mais cet avantage est atténué par des coûts élevés en capital.

Les petites exploitations font face à des situations différentes. La taille des gisements et l'inaccessibilité à un marché plus grand suppriment toute économie d'échelle et rend l'investissement coûteux. Même à petite échelle l'écoulement de la production est difficile à cause de la concurrence et la faiblesse de la demande. Les opérations se localisent

dans les parties les plus accessibles des gisements. Elles se résument à un décapage superficiel suivi de rippage au bulldozer.

2.4. Traitement de minerai

Les méthodes de traitement dépendent de la caractéristique du minerai et des spécifications du concentré. Ce sont surtout les contraintes économiques qui imposent les limites à la concentration, plutôt que la faisabilité technique.

Les coûts de traitement sont fonction de la dureté de la roche, sa texture, sa composition minéralogique, et les taux de récupération et de concentration envisagés.

Les techniques de traitement visent la libération du phosphate de la matrice puis l'élimination de la gangue (silice, carbonates, argiles). Les étapes nécessaires dépendent des minerais traités. Le cycle de traitement comporte une combinaison des étapes suivantes: réduction – classification – lavage – criblage – cyclonage – flottation – filtration – séchage – séparation magnétique – calcination.

La réduction suivie de lavage et de classification prépare le minerai à la flottation. Mais dans beaucoup de cas ces étapes suffisent à fournir un produit suffisamment concentré. La flottation utilise les propriétés de surface pour séparer le phosphate de la gangue surtout dans le cas de minerais riches en silice.

La calcination est utilisée pour la réduction du calcaire et des matières organiques.

Le Tableau 2.2. donne quelques paramètres d'opérations de concentrateurs à travers le monde.

En Afrique de l'Ouest le traitement se fait suivant le cycle lavage - criblage - cyclonage - filtration - séchage au Togo; au Sénégal le minerai de Taïba exige un traitement poussé jusqu'à la flottation tandis que le minerai classique de Thiès donne un produit suffisamment concentré après un simple broyage et une classification. La Figure 2.1. donne le schéma du circuit de traitement à Kpémé (Togo).

Pour les petites exploitations le traitement consiste à un concassage et un broyage.

Région	Teneur alim. % P_2O_5	Teneur conc. % P_2O_5	Récup. %
États-Unis			
Sud-Est.....	8.4	31.7	89.6
Ouest.....	25.2	30.6	80.1
Amérique du Sud.....	10.3	35.2	61.7
Afrique de l'Ouest...	28.5 - 30	36 - 37	90.2
Afrique du Nord.....	29.5	31.5	62.3

Tableau 2.2. Paramètres d'opération des concentrateurs.

Source: Phosphate Rock Availability - World. Bureau of Mines Information Circular IC 8989, 1984.

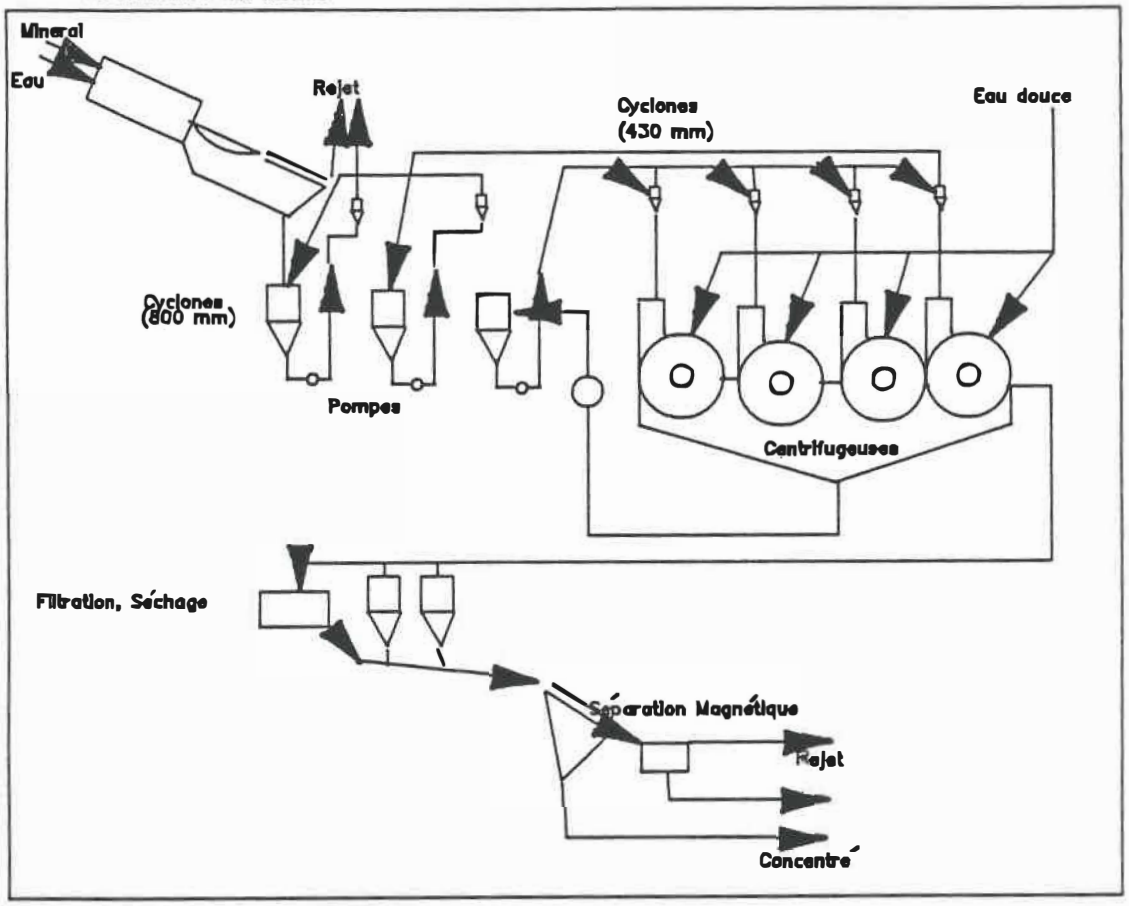


Fig. 2.1. Schéma du circuit de traitement à Kpémé (Togo)
Source: World Survey of Phosphate deposits p.124 [65]

2.5. Transport

Dans cette rubrique les opérations considérées sont:

- le transport du minerai de la mine au concentrateur,

- le transport du concentré jusqu'au port d'embarquement, l'usine de fabrication d'engrais ou de produits intermédiaires,

- le transport des produits intermédiaires ou des réactifs à l'usine d'engrais,

- la distribution des engrais de l'usine aux centres de consommation et aux ports d'exportation.

À cause de la faible valeur marchande du phosphate relativement à son poids, le transport est le facteur le plus limitatif dans la décision d'exploiter ou non un gisement. Ce facteur est si important que tous les gisements en exploitation pour le marché international sont situés à moins de 100 km d'un port.

L'enclavement par rapport au marché international ou local est le facteur qui détermine le plus la rentabilité d'une exploitation. En Afrique de l'Ouest le problème est encore accentué par l'insuffisance des infrastructures de transport. Le réseau de chemins de fer se limite à quelques axes reliant les port à certains centres urbains (Fig.2.2.) et les lignes souffrent de problèmes de gestion et de fiabilité avec un matériel parfois ancien. La qualité des routes est très variable et ne permet pas le mouvement de gros tonnages d'où l'utilisation de véhicule de capacité moyenne à coût d'exploitation plus élevé à la tonne. Les pluies torrentielles pendant les mois de mai à septembre rendent certains tronçons impraticables. Ainsi les tarifs de transport intérieur varient entre $0.03/t.km pour le rail, à $0.15/t.km pour les pistes.

Le transport fluvial est limité car les cours d'eau ne sont pas navigables en toutes saisons et les travaux d'aménagement tardent à se faire. Le fleuve Sénégal est navigable pendant trois mois jusqu'à Kayes. Le fleuve Niger est navigable pendant trois mois de Kankan (Guinée) à Assongo (Mali) et de Tillabéri à Gaya (Niger) ainsi que sur son parcours du Nigeria. Mais des aménagements sont nécessaires pour rendre ces parcours fiables. Un exemple d'utilisation des voies fluviales est le transport du phosphate par barges au Mali de Bourem vers l'Ouest du pays.

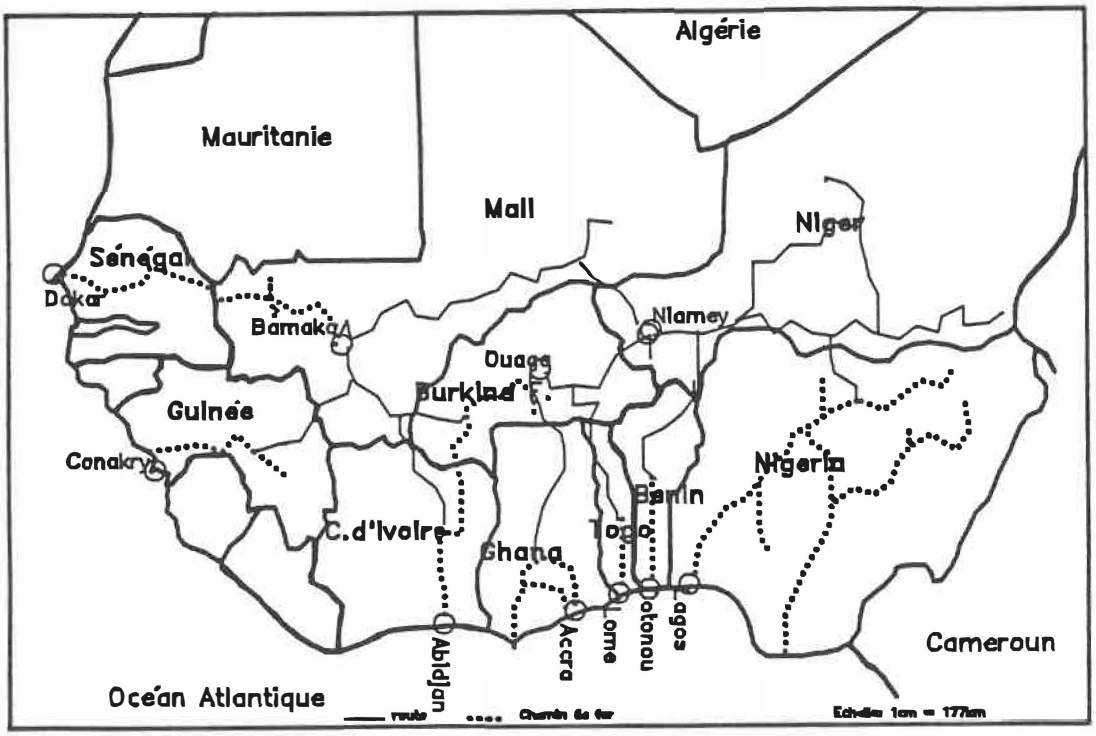


Fig. 2.2. Carte du réseau de transport.

Cette situation rend prohibitif tout transport de minerai au delà de quelques centaines de km. Les gisements intérieurs sont donc condamnés à une production de petite échelle. Une étude de préfaisabilité sur l'un des gisements en 1982 a abouti à un coût d'opération de $34.61/t de concentré alors que le transport jusqu'au marché visé coûterait $80.00/t.

Lorsque le gisement se situe non loin des côtes et d'un port, le marché international est accessible mais le transport vers les marchés intérieurs devient coûteux.

Une approche de solution au problème de transport consiste à ajouter de la valeur au produit en fabricant des produits intermédiaires sur le site même, réduisant ainsi le volume à transporter. La production d'acide phosphorique en est un exemple et on peut rallonger la chaine jusqu'à la fabrication d'engrais. Le Sénégal donne cet exemple. Il faut cependant faire face à de gros investissements et à des installations qui requièrent une certaine maitrise technique.

3.. INDUSTRIE RÉGIONALE DES ENGRAIS PHOSPHATÉS EN AFRIQUE DE L'OUEST

Le gros consommateur de la production minière des phosphates est l'industrie des engrais. 90% de la production mondiale de concentré de phosphate finit toujours sous forme d'engrais destinés à l'agriculture. Ce chapitre donne d'abord un aperçu sur les techniques de fabrication d'engrais phosphatés; nous présentons ensuite les différentes unités de fabrication d'engrais en Afrique de l'Ouest.

3.1. Généralités

La fabrication des engrais est née du désir d'accroître la production agricole. Pendant des siècles l'homme utilise la fumure animale, les cendres et les os broyés à cette fin. Ces pratiques sont encore courantes dans certains pays. Les résultats ne sont pas toujours prévisibles et il a fallu attendre les travaux sur la théorie de la croissance des plantes et la chimie des sols au 19ème siècle pour jeter les bases de l'industrie moderne des engrais.

La fonction d'un engrais est de fournir à la plante un ou plusieurs des éléments dont elle a besoin pour croître.

L'industrie chimique en produit une grande variété. Ces éléments nutritifs peuvent être classés en deux catégories: les macroéléments et

les microéléments ou traces. La classification peut se schématiser comme suit:

1. Macroéléments	éléments naturels	- C - H - O
	élements primaires	- N - P - K
	éléments secondaires	- Ca - Mg - S
2. Microéléments		- Mo - Br - Mn - Zn - Cl - Fe

Les éléments naturels sont fournis par l'eau et l'air. Les éléments primaires sont requis en quantités substantielles par les plantes. Ils sont fournis par le sol et l'apport en engrais. La terminologie des engrais dérive d'ailleur de ces éléments: engrais phosphatés (P), engrais azotés (N), engrais potassiques (K), engrais mixtes (N,P,K). Les engrais phosphatés sont ceux dont le principal élément primaire est le phosphore. La matière première pour leur fabrication est le concentré de phosphate. Les formes d'engrais et les produits intermédiaires couvrent la roche broyée ou partiellement acidulée, les superphosphates, l'acide

phosphorique, les nitrophosphates et les phosphates d'ammonium.

3.2. Les techniques de fabrication

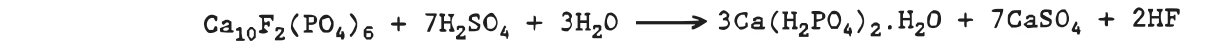
Les premières forme d'engrais phosphatés, les os broyés, ont commencé à être utilisés en Europe. Le traitement des os à l'acide sulfurique a commencé en 1830. La fabrication du superphosphate avec du minerai a commencé en 1840 en Angleterre et celle de l'acide phosphorique en 1870 en Allemagne. Les nitrophosphates ne sont devenus populaires qu'à partir de 1930 et les phosphates d'ammonium à partir de 1960.

3.2.1. Roche pour application directe.

L'application de la roche phosphatée comme engrais direct s'envisage dans des conditions économiques très contraignantes. Les facteurs considérés dans une telle approche sont le pouvoir d'achat des agriculteurs, la stabilité des prix et de l'offre à l'importation, le chômage, les économies en devises et les opportunités de développer des infrastructures. En ce qui concerne la roche elle même, le facteur le plus important est son potentiel agronomique. Ce potentiel est fonction de sa réactivité, la chimie du sol et le climat. (Pour plus de détails sur la question se référer à [48,49]).

3.2.2. Le superphosphate simple (SSP).

Le super simple est obtenu par attaque de l'acide sulfurique sur le concentré de phosphate suivant la réaction:



$$Ca_{10}F_2(PO_4)_6 + 7H_2SO_4 + 3H_2O \longrightarrow 3Ca(H_2PO_4)_2.H_2O + 7CaSO_4 + 2HF$$

Le phosphore est apporté au sol par le groupement $Ca(H_2PO_4)_2.H_2O$, soit le phosphate monocalcique (PMC). En plus du phosphore le SSP apporte du soufre contenu dans le sulfate de calcium.

La technologie est peu compliquée comme l'indique le schéma à la Figure 3.1..

Les facteurs les plus importants pour le choix de la roche sont la teneur en P_2O_5 et la réactivité; des teneurs élevées en ferals sont nuisibles ainsi qu'un rapport $CaO:P_2O_5$ élevé.

3.2.3. Le Phosphate Partiellement Acidulé (PPA)

Le PPA se distingue du SSP par la quantité d'acide sulfurique utilisé dans la réaction précédente. Le rapport stochiométrique pour la production du SSP est de 0.54t de H_2SO_4 par tonne de concentré. Un PPA à 50% veut dire que 0.27t de H_2SO_4 sont utilisées par tonne de minerai dans l'acidulation. Ainsi le produit est un mélange de PMC, de sulfate

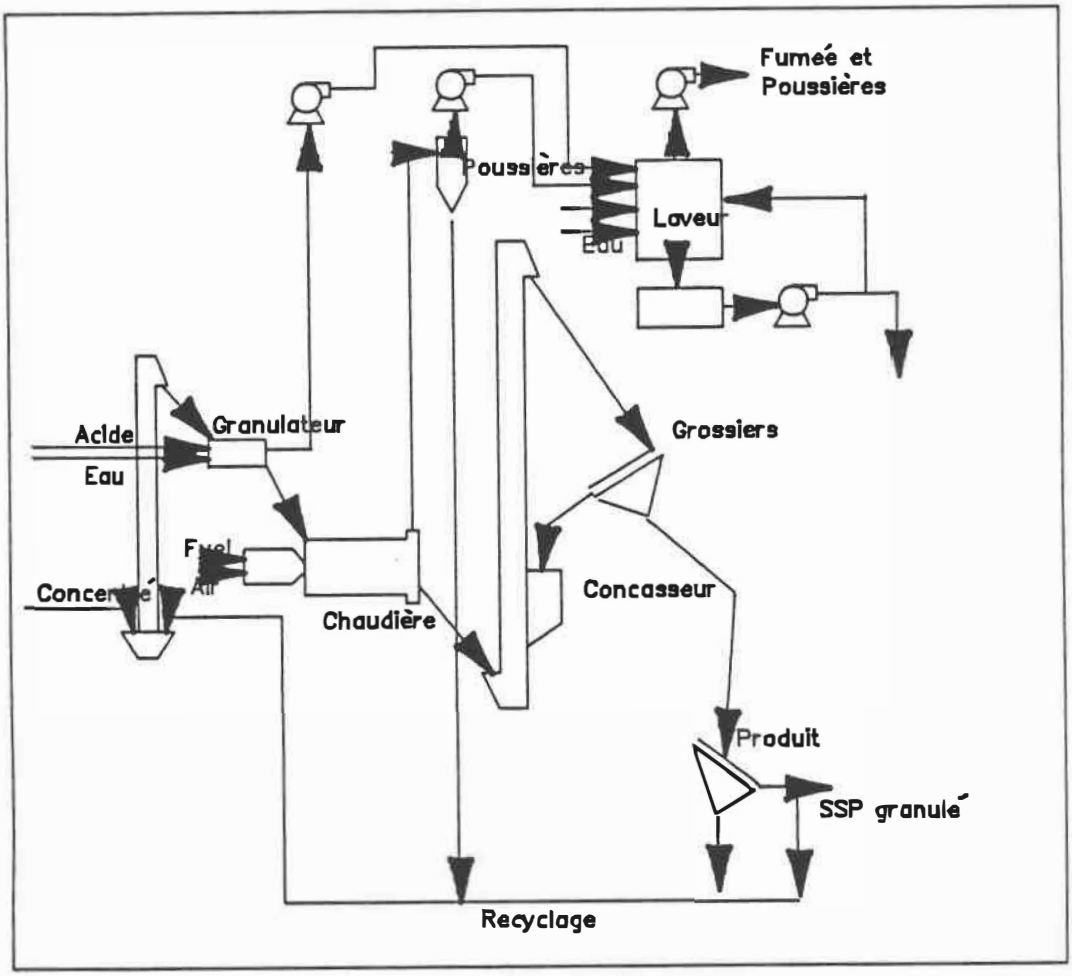


Fig. 3.1. Schéma de fabrication du SSP

de calcium et de la roche qui n'a pas réagi. C'est une solution en réponse au mauvais résultats que donnent certaines roches lorsqu'elles sont acidulées à 100% à cause de leur teneur en ferals, leur faible

réactivité ou les conditions particulières du sol. C'est aussi une source d'économie d'acide sulfurique. C'est donc une solution pour des roches à problèmes ou dans des conditions de rentabilité difficiles (enclavement, teneur peu contrôlable, faible demande).

3.2.4. Acide phosphorique et engrais dérivés.

L'acide phosphorique est le composé intermédiaire dans la fabrication de plus de 90% des engrais phosphatés. Deux procédés sont utilisés pour le fabriquer:

- l'acide phosphorique par voie de fournaise: le concentré est mis en combustion dans des fournaises électriques pour produire du phosphore élémentaire; celui-ci est mis en réaction avec de l'eau pour donner de l'acide phosphorique. Ce type d'acide ne rentre pas dans la fabrication des engrais.

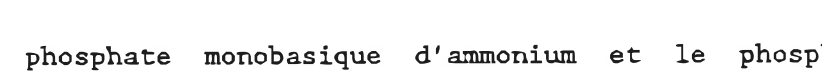
- dans le procédé humide (Fig.3.2.) le concentré est mis en réaction avec de l'acide sulfurique en quantité plus importante que dans le cas du SSP; le résultat est une boue qui est filtrée pour séparer l'acide phosphorique du sulfate de calcium (gypse). La réaction comme précédemment s'écrit:

$$Ca_{10}F_2(PO_4)_6 + 10H_2SO_4 + 10nH_2O \longrightarrow 6H_3PO_4 + 10CaSO_4nH_2O + 2HF$$

La réaction produit de la chaleur.

Les engrais les plus importants fabriqués à partir de l'acide phosphorique sont:

- le TSP: on l'obtient par réaction de l'acide phosphorique sur le concentré; la réaction chimique est la suivante:



$$Ca_{10}F_2(PO_4)_6 + 14H_3PO_4 + 10H_2O \longrightarrow 10Ca(H_2PO_4)_2.H_2O + 2HF$$

- le phosphate monobasique d'ammonium et le phosphate dibasique d'ammonium sont obtenus par réaction de l'acide phosphorique avec de l'ammoniaque, ce qui en fait des engrais composés.

D'autres composés sont produits à moindre échelle à partir de l'acide phosphorique.

3.3. Situation de l'industrie en Afrique de l'Ouest.

L'agriculture domine l'économie des pays de l'Afrique de l'Ouest mais la performance de ce secteur est resté faible. L'utilisation des fertilisants est l'une des composantes de la solution. D'où la naissance de l'industrie des engrais dans certains pays. Cette industrie revêt trois formes:

Les pays ayant une grande potentialité agricole ont construit des unités de production d'engrais à partir de matières premières d'importation.

C'est ainsi que le Nigeria possède deux unités de production. Une usine de capacité de 100000 t/an à Kaduna dans le Nord du pays produit du SSP. L'acide sulfurique est fabriqué sur place avec du soufre importé. Le tout

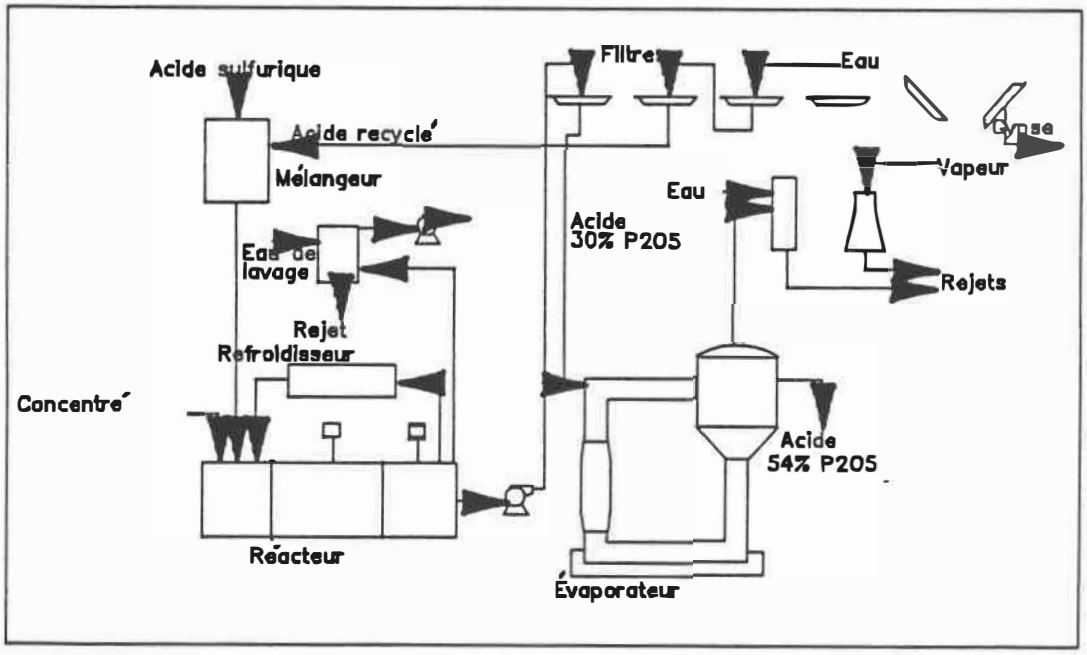


Fig. 3.2. Schéma de fabrication de l'acide phosphorique

est opéré par une compagnie d'état, la Federal Superphosphate Fertilizer Company (FSFC). Une deuxième usine est en voie de démarrage à Onnee non

loin de Port Harcourt au Sud du pays. Sa capacité est de 413000 t/an d'urée, 300000 t/an de NPK et 56000 t/an d'ammoniaque. L'acide phosphorique sera importé.

La Côte d'Ivoire possède une usine gérée par la Société Ivoirienne des Engrais (SIVENG) en opération depuis 1971. L'usine comprend une unité de granulation de NPK de 480 t/j, une unité de production de SSP de 150 t/j, une unité de fabrication d'acide sulfurique et une autre de fabrication de sulfate d'ammonium.

Le Sénégal, grâce à ses ressources en phosphates et un accès facile au marché mondial a développé toute une industrie. L'Industrie Chimique du Sénégal (ICS) opère deux unités depuis 1984. Une usine d'acide phosphorique opère à Darou-Khoudoss et utilise le concentré de Taïba. Sa capacité est de 250000 t/an d'équivalent P_2O_5. 90000 t de cette production sont destinées à l'usine de M'Bao située non loin de Dakar . Cette usine fabrique du TSP, du DAP et du NPK. La capacité est de 250000 t/an, tous produits confondus.

Les petites exploitations minières au Burkina Faso, au Niger, et au Mali alimentent des stations de concassage pour la production d'engrais d'application directe.

Le Togo n'a pas encore installé d'unité de transformation.

Le Bénin a complété depuis 1984 la construction d'une usine de formulation des NPK près de Cotonou, mais pour des questions de marché l'usine n'est pas encore en opération. La Figure 3.3. donne la localisation des différentes unités.

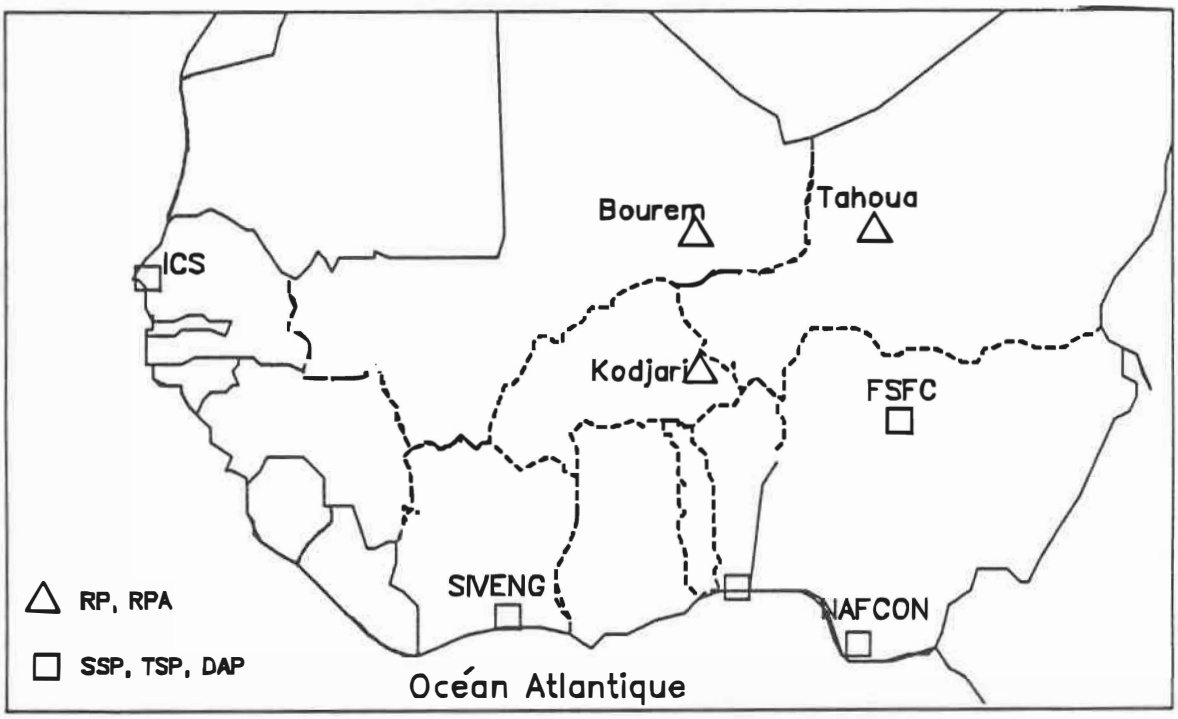


Fig. 3.3. Localisation des usines d'engrais.

4.. LE MARCHÉ

L'agriculture utilise 90% de la production mondiale des phosphates. Elle domine l'économie de tous les pays de l'Afrique de l'Ouest et est la principale source de revenu de la population. Dans ce chapitre nous analysons les conditions générales d'utilisation d'engrais.

4.1. Données générales.

La région considérée couvre une superficie de 4.28 M km^2. Le Tableau 4.1. donne les superficies par pays. Le Niger, le Mali et le Nigeria sont les plus vastes avec 26%, 25% et 19% de la superficie totale respectivement. Le Togo avec 1% est le plus petit.

Le Tableau 4.1. donne également les % des terres agricoles en 1984. La moyenne de la région est de 12%.

Le climat régional est très varié. Il varie du Sud au Nord d'un climat équatorial humide avec 2 saisons de pluies et 2 saisons sèches, à un climat chaud et sec de type sahélien au Nord et à l'Ouest.

Le Tableau 4.2. donne la population par pays et le taux de croissance de cette population. Le Nigeria est le plus peuplé avec 61% des 171.4 M d'hts pour toute la zone. Les taux de croissace varient de 2.3% à 3.4% par an. 54 à 90% de cette population est rurale.

Pays	Superficie (km2)	Terres agricoles (% de la superf.)
Bénin	115800	16
Burkina Faso	274200	10
Côte d'Ivoire	323700	13
Ghana	227000	12
Guinée	245900	6
Mali	1204000	2
Niger	1267000	3
Nigeria	923300	34
Sénégal	197200	27
Togo	56800	26
TOTAL	4834900	11.87

Tableau 4.1. Superficie par pays et % des terres agricoles.
Source:FAO Production Yearbook (1988)

La langue de travail est le Français sauf au Nigeria et au Ghana. Les variétés cultivées sont fonction du climat et varient d'un pays à un autre. Elles se divisent en cultures vivrières de loin les plus importantes et en cultures de rente. Les cultures vivrières les plus importantes sont le mil, le sorgho, le maïs, le riz, le manioc et l'igname. Les principales cultures de rente sont le café, le cacao, l'arachide, le coton, le tabac et la canne à sucre. Elles utilisent plus de fertilisants, en particulier dans les grandes exploitations.

Pays	Population (million)	Taux de croissance %
Bénin	4.1	3.0
Burkina Faso	7.1	2.6
Côte d'Ivoire	10.5	3.0
Ghana	13.6	3.4
Guinée	6.2	2.3
Mali	7.9	2.8
Niger	6.4	2.8
Nigeria	105.4	3.0
Sénégal	6.9	2.9
Togo	3	3.1
TOTAL	171.1	2.97

Tableau 4.2. Population par pays et Taux de croissance annuelle
Source:The Europa Yearbook (1988)

4.2. Utilisation des engrais.

Le problème majeur de l'agriculture africaine est son manque de productivité. Le taux d'utilisation des engrais est l'un des plus bas au monde. Pour l'Afrique de l'Ouest le Tableau 4.3. donne la consommation annuelle par type d'engrais et par pays. Ce tableau appelle les commentaires suivants:

- le chiffre de 900000 t est très bas par rapport à la superficie cultivée;
- la disparité entre les pays est très grande; 68% du total est consommé au Nigeria.

Pays	Urée	SA	DAP	SSP	TSP	RP	MOP	SOP	NPK	AUTRES	TOTAL
	Type de produit (tonne)										
Bénin	4160	82	1300	3	1540	-	302	62	13000		20449
Burkina Faso	4347	1030	23	-	650	800	600	-	17771		25221
Côte d'Ivoire	19450	-	-	4150	3950	4500	21685	6600	46460	202	106997
Ghana	10	7560	-	522	-	-	-	-	12485	33	20610
Guinée	1399	800	-	-	826	-	-	100	4275	500	7900
Mali	11540	-	1454	196	-	962	-	-	19959	-	34111
Niger	3835	61	-	1584	530	484	-	-	2503	90	9087
Nigeria	41949	25177	32813	141353	-	-	2863	-	249921	112152	606228
Sénégal	10500	-	-	-	-	-	-	-	38500	1000	50000
Togo	2240	134	309	307	220	2	939	10	10953	-	15114
TOTAL	99430	34844	35899	148105	7716	6748	26389	6772	399827	113977	879707
% du Total	11.3	3.9	4.1	16.8	0.9	0.8	3.0	0.8	45.5	12.9	100

Tableau 4.3. Consommations par types d'engrais (1987).
Source: FAO Fertiliser Yearbook (1987).

Le Tableau 4.4. donne les consommations par pays en regroupant les

Pays	N	NP	P	K	NPK	Autres	Total
			(tonne)				
Bénin	4242	1300	1543	364	13000		20449
Burkina Faso	5377	23	1450	600	17771		25221
Côte d'Ivoire	19450		12600	28285	46460	202	106997
Ghana	7570		522		12485	33	20610
Guinée	2199		826	100	4275	500	7900
Mali	11540	1454	1158		19959		34111
Niger	3896		2598		2503	90	9087
Nigeria	179278	32813	141353	2863	249921		606228
Sénégal	10500				38500	1000	50000
Togo	2374	309	529	949	10953		15114
TOTAL	246426	35899	162579	33161	415827	1825	895717
% du Total	28%	4%	18%	4%	46%	0%	100%

Tableau 4.4. Consommations par groupes d'éléments (1987).
Source: FAO Fertiliser Yearbook (1987).

engrais à base des éléments N, NP, NPK, P et K. Les engrais composés NPK dominent de loin les autres groupes avec 46% du total en poids. Les engrais P constituent 18% du total.

Le marché des engrais à base de phosphate est résumé dans le Tableau 4.5.. Le total est évalué à 614305 t de NP, NPK et P, avec un contenu de 114957 t de P_2O_5. Les NPK rentrent pour 58% du total. Les RP et le TSP sont de consommation très faible. Pour le SSP le Nigeria constitue à lui seul 95% du marché. Ceci est dû au fait qu'il est le principal producteur avec l'usine de Kaduna.

Par pays, le Nigeria reste le principal consommateur d'engrais phosphatés, suivi de la Côte d'Ivoire et du Sénégal. Dans ces deux derniers pays les demandes en NPK sont en partie satisfaites par la production intérieure.

Pays	DAP	SSP	TSP	RP	NPK	TOTAL Produit	TOTAL P_2O_5
			(tonne)				
Bénin	1300	3	1540		13000	15483	4167
Burkina Faso	23		650	800	17771	19244	4541
Côte d'Ivoire		4150	3950	4500	46460	59060	11361
Ghana		522			12485	13037	5031
Guinée	1454		826		4275	5105	726
Mali	1454	196		962	19959	22571	9594
Niger		1584	530	484	2503	5101	1041
Nigeria	32813	141353			249921	424087	108900
Sénégal					38500	38500	7430
Togo	309	307	220	2	10953	11791	2315
TOTAL	35899	148145	7716	6748	415827	613979	156193
% du Total	6%	24%	1%	1%	68%		100%

Tableau 4.5. Consommation des engrais phosphatés (1987).
Source: FAO Fertiliser Yearbook (1987).

Le DAP et le TSP sont surtout importés de l'Europe de l'Ouest.

Le SSP est produit au Nigeria et en Côte d'Ivoire. La mise en route de la nouvelle usine de la NAFCON au Nigeria changera sûrement les sources d'approvisionnement en NPK et en DAP surtout.

4.3. Prévision de la demande.

Dans cette section nous dégageons certains faits qui portent à croire que la consommation des engrais phosphatés va croître en Afrique

de l'Ouest. L'objectif n'est pas de faire une prévision de la demande mais plutôt de présenter des arguments pouvant créditer certaines hypothèses. En effet le domaine de prévision de la demande pour un minéral est très complexe surtout dans un contexte économique contraignant comme celui de l'Afrique.

4.3.1. Rôle potentiel des engrais dans la crise alimentaire.

Le taux de croissance actuel de la population impose une croissance annuelle de 4 à 4.5% de la production agricole pour équilibrer la demande alimentaire dans les années 1990 [66]. La croissance de la production agricole qui était de 2% par an dans les années 1962-1972 est tombée à 1.88% par an dans les années 1972-1982. Dans les années 1960 cette croissance est due essentiellement à l'augmentation des terres cultivées. La part de cette augmentation est tombée à 53% dans les années 1970 et à 41% dans les années 1980. Le reste est dû à l'utilisation croissante des engrais. La croissance des superficies cultivées connaitra sûrement des limites car on considère que seulement 16% ne présentent pas de contraintes à l'agriculture. Les 48% sont des sols à problèmes. Ils sont soit trop humides, soit trop secs, soit trop minces, soit trop riches en minéraux.

L'agriculture africaine n'a pas connu de révolution verte comme en Asie. Les cultures semi-arides (mil, sorgho) n'ont pas connu les transfert

technologiques comme ce fut le cas pour le riz ou le blé. Ici les conditions de cultures ne se reproduisent nulle part dans le monde.
On voit donc que l'utilisation des engrais est une des solutions potentielles.

4.3.2. Les réponses des différentes cultures.

Les engrais phosphatés sont une source de phosphore pour les plantes. Toutes les études agronomiques ont conclu que les sols ouest-africains ont une carence en cet élément et que l'application des engrais rehaussait considérablement le rendement des cultures [32]. Mais tous les engrais ne donnent pas le même rendement. Si les engrais chimiques ont une réputation bien établie, les engrais naturels doivent être évalués localement. Diverses études ont étés menées dans les buts suivants:

- déterminer l'efficacité en fonction des cultures;
- déterminer les doses d'application nécessaires;
- fixer les modalités d'application.

Ces études ont abouti à plusieurs résultats d'ordre qualitatif et quantitatif [31,71]. Les engrais locaux évalués par rapport au SSP donnent des résultats qui peuvent être résumés comme suit: Tableau 4.6..
Ce sont ces paramètres qui seront utilisés pour la comparaison des alternatives d'approvisionnement.

Source	Nature	Culture	Intervalle d'efficacité
Tilemsi	RP	Maïs-arachide	74%-90%
Togo	RP	Maïs	46%
Togo	PPA	Maïs	72%-100%
Tahoua	RP	Mil	82%
Parc W	RP	Mil	47%
Parc W	PPA	Mil	76%
Kodjari	RP	-	11%
Kodjari	PPA	-	80%-100%

Tableau 4.6. Résultats des essais agronomiques - Efficacités par rapport au SSP.

4.3.3. Prévision de la demande.

Le Tableau 4.7. ci-après donne la consommation historique de l'élément nutritif P_2O_5 par pays en tonnes. La Figure 4.1. montre l'évolution de cette consommation pour toute la région. Ces deux illustrations montrent une tendance générale à la hausse de la consommation. Cette tendance devrait se poursuivre compte tenu de la nécessité perçue par les différents pays d'accroitre leur production agricole. De façon générale nous faisons l'hypothèse que cette

consommation devrait augmenter à un taux compris entre 6% et 20% par an dépendamment des pays. Dans les Tableau 4.8. et 4.9. nous présentons les résultats de deux projections, l'une forte et l'autre faible.

Année	BÉNIN	BURKINA	C.d'IVOIRE	GHANA	GUINÉE	MALI	NIGER	NIGERIA	SÉNÉGAL	TOGO	Total
1979/1980	130	3290	8400	5900	1000	2700	892	30900	13000	727	66939
1980/1981	120	1918	9900	2000	100	3000	1020	56200	7600	974	82832
1981/1982	352	4167	8800	8000	1200	3900	1796	79500	8000	748	116463
1982/1983	1300	4500	7300	5600	1000	1300	1644	67100	9500	918	100162
1983/1984	1500	5800	6500	7000	-	4200	1362	92600	10000	1000	129962
1984/1985	1600	4200	8500	1400	100	4500	1380	9600	5300	2300	38880
1985/1986	3000	3800	9000	4300	100	8200	1101	105000	7500	3400	145401
1986/1987	4167	4541	11363	5031	726	9594	1041	108900	7430	3400	156193

Tableau 4.7.: Consommation d'élément nutritif P_2O_5 de 1980 à 1987 (tonne).
Source: FAO Fertilizer Yearbook (1979, 1980).

Taux %	15	20	15	17	20	17	16	10	10	15	Total
1987/1988	4792	5449	13067	5886	871	11225	1208	119790	8173	3910	174372
1988/1989	5511	6539	15028	6887	1045	13133	1401	131769	8990	4497	194800
1989/1990	6337	7847	17282	8058	1255	15366	1625	144946	9889	5171	217775
1990/1991	7288	9416	19874	9428	1505	17978	1885	159440	10878	5947	243640
1991/1992	8381	11299	22855	11030	1807	21034	2186	175385	11966	6839	272783
1992/1993	9639	13559	26283	12905	2168	24610	2536	192923	13163	7864	305651

Tableau 4.8.: Projection de la consommation d'élément nutritif P_2O_5 de 1987 à 1993: hypothèse forte (tonne).

Taux %	7	10	8.7	10	15	15	8	6	5.6	8	Total
1987/1988	4459	4995	12352	5534	835	11033	1124	115434	7846	3672	167284
1988/1989	4771	5495	13426	6088	960	12688	1214	122360	8285	3966	179253
1989/1990	5105	6044	14594	6696	1104	14591	1311	129702	8749	4283	192180
1990/1991	5462	6648	15864	7366	1270	16780	1416	137484	9239	4626	206155
1991/1992	5844	7313	17244	8102	1460	19297	1530	145733	9757	4996	221276
1992/1993	6254	8045	18744	8913	1679	22192	1652	154477	10303	5395	237653

Tableau 4.9.: Projection de la consommation d'élément nutritif P_2O_5 de 1987 à 1993: hypothèse faible (tonne).

La Figure 4.1. ci-après représente l'évolution de la consommation et celle des prévisions des tableaux 4.8 et 4.9.. Rappelons que ces prévisions ne sont que des hypothèses.

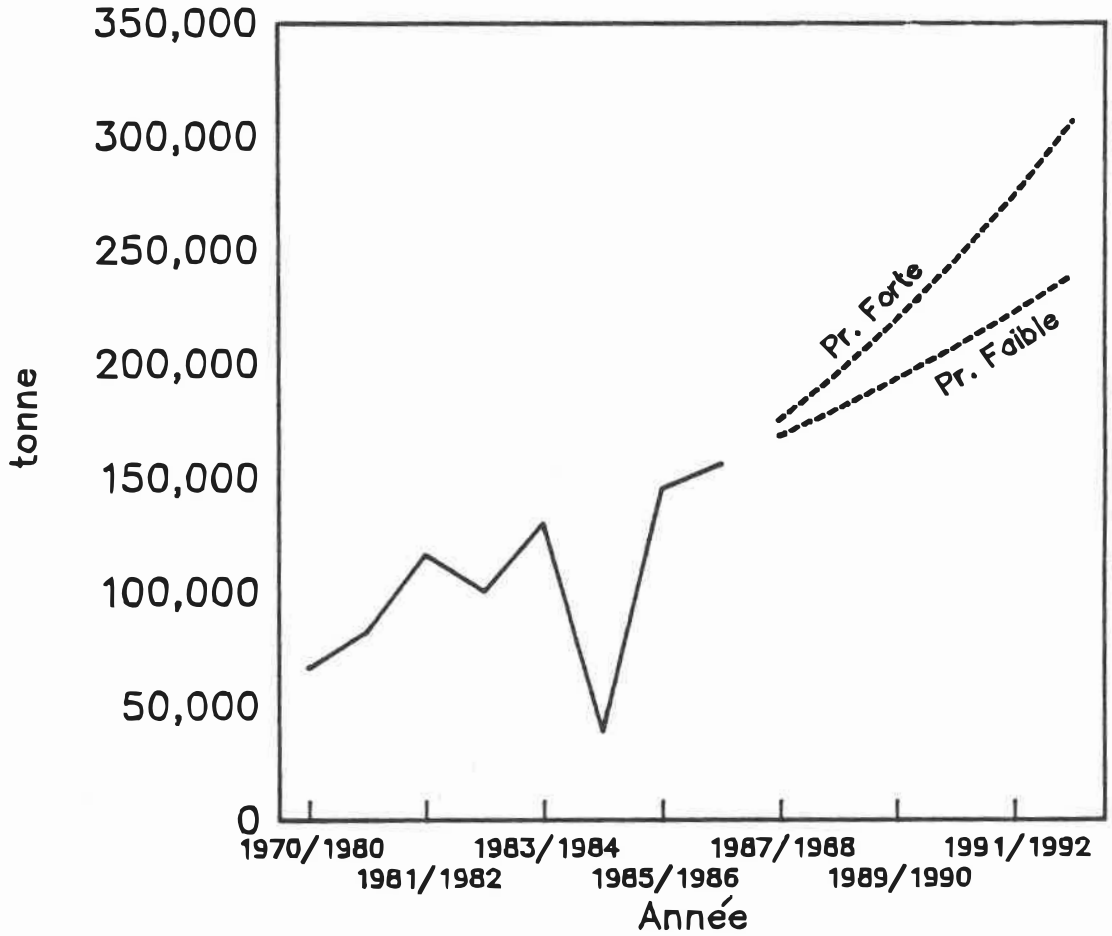


Fig. 4.1. Évolution de la consommation régionale de P_2O_5.

5.. MODÈLE DE COÛTS ET ÉVALUATION DES DIFFÉRENTS SCHÉMAS

L'industrie des phosphates en Afrique de l'Ouest n'a pas toujours été considérée de façon globale. Les études à date portent toujours sur un projet particulier. Une exception cependant est l'approche adoptée par les pays de l'Autorité du Liptako Gourma, ALG (Burkina Faso, Mali, Niger) pour l'étude d'un projet de construction d'une usine d'engrais phosphatés pour les trois pays.

5.1. Choix des projets et des opérations à évaluer.

Dans une perspective globale et compte tenu de l'importance des ressources potentielles, il se pose la question du choix des projets à inclure dans le modèle. Ceci suppose l'établissement de critères qui feront que tel projet sera considéré ou non. Ces critères basés sur des conditions géologiques, minéralogiques et technico-minières, ne sont pas encore définis au plan régional et nous n'envisageons pas de les établir dans ce travail. L'Annexe I donne à titre d'exemple les critères techniques qui font qu'un gisement est considéré comme réserves potentielles dans l'industrie américaine des phosphates [77]. Par hypothèse ici nous évaluons les schémas suivants:

- les industries en opération (mines, usines d'engrais),
- les projets de mise en valeur de certains gisements qui sont d'actualité.

5.2. Les méthodes d'estimation.

Qu'il s'agisse d'une opération existante ou d'une étude de faisabilité, l'estimation des coûts est une étape délicate parce qu'elle fait beaucoup appel au jugement et à l'expérience de l'estimateur en plus d'un minimum de données sur la situation géographique, le contexte géologique, les propriétés physico-chimiques de la roche, l'environnement économique, etc.

5.2.1. Les types d'estimation.

De façon générale on distingue quatre types d'estimation soit:

- l'estimation de l'ordre de grandeur,
- l'estimation préliminaire,
- l'estimation définitive,
- le calcul détaillé.

L'estimation de l'ordre de grandeur permet de prendre une décision appropriée quand à la faisabilité d'un projet aussitôt qu'il est pensé et permet d'engager ou non des dépenses subséquentes. La précision d'un tel estimé est entre -30% et +50%. Les données utilisées sont la localisation du projet, les réserves et la teneur du gisement, les méthodes d'opération et une liste sommaire des équipements requis. Ce type d'estimation se fait à partir d'un projet jugé similaire. Par exemple, le

coût en capital d'un nouveau projet A est estimé à partir de celui d'un projet connu B en utilisant la relation:

$$\frac{\text{Coût en capital de A}}{\text{Coût en capital de B}} = \left(\frac{\text{Capacité de A}}{\text{Capacité de B}}\right)^{x}$$

L'estimation préliminaire permet d'établir un budget et s'appuit sur le design conceptuel des opérations. L'ordre de précision est compris entre -15% et +30%. À ce stade, des informations précises sur les réserves, la teneur, la méthode de production, le plan d'opération, le flowsheet de traitement, la liste et les dimensions des équipements sont nécessaires. L'estimé définitif est celui qui permet de prendre une décision finale au niveau d'une étude de faisabilité. Tous les paramètres du projet sont alors fixés. Sa précision est de -10% à +15%. Le calcul détaillé complète l'estimé définitif et permet de débuter les travaux de construction. Pour une opération en cours les niveaux d'estimation sont les mêmes avec toutefois des objectifs différents.

5.2.2. Les modèles de coûts.

Les modèle de coûts sont les outils de l'estimation. La difficulté dans leur réalisation réside dans le fait qu'il faut intégrer des paramètres variables et mal définis à certaines étapes de l'évaluation. Ces pararmètres peuvent être classés en trois groupes:

Les variables physiques: elles englobent les résistances, la dureté, la teneur, la densité, les propriétés de surface, etc; elles dépendent beaucoup de l'histoire géologique du milieu et leur détermination exige dans la plupart des cas une approche statistique.

Les variables économiques: ce sont les différents coûts unitaires des facteurs tels que la main-d'oeuvre, l'énergie, les pièces d'équipement, etc; elles sont propres à l'environnement économique local et varient dans le temps; on tient compte de cette variation en utilisant des indices de coûts.

Les variables d'opération: elles sont en général fixées par l'estimateur ou le concepteur en fonction des deux catégories précédentes; ce sont les taux de production, le taux de récupération et de concentration, les dimensions des équipements, etc.

Cette variabilité des paramètres fait que les qualités d'un modèle d'estimation sont sa flexibilité et sa précision. Dans la pratique les modèles sont soit trop spécifiques (manque de flexibilité), soit trop généraux (manque de précision). Nous présentons ici les modèles courants et celui que nous avons utilisé avec les raisons qui ont motivé notre choix.

5.2.2.1. Le modèle de O'HARA [68].

C'est un modèle d'estimation rapide des coûts en capital, des coûts d'opérations et des revenus d'exploitation minières. Les coûts sont

donnés sous forme d'équations et de courbes de la forme $Y = a * X^b$ pour les exploitations à ciel ouvert, les mines souterraines et les usines de traitement. Le paramètre X est tantôt le taux de production journalier, tantôt le taux annuel, ou la capacité des équipements. Y est le coût en $CAN de 1979. Les courbes sont dérivées par analyse statistique à partir d'observations des exploitations minières au Canada et à l'étranger.

Le mérite du modèle est de constituer la première approche de modélisation des coûts d'exploitations minières au Canada. Il est rapide d'application et permet une bonne estimation préliminaire.

Il a par contre le désavantage d'être trop général. La variabilité des paramètres de la roche est peu prise en considération. De plus il reflète les conditions économiques de 1979 et ne présente pas de méthode d'actualisation des résultats.

5.2.2.2. Le modèle de Borquez [34].

C'est un modèle d'estimation de coûts de forage-sautage. L'auteur base son estimation sur les paramètres géotechniques en considérant les paramètres économiques et opérationnels constants.

Le taux de pénétration p est relié à la résistance en compression uniaxiale Sc, au diamètre du trou Φ, à la charge sur le foret r et au nombre de tours par minute rpm à l'aide d'une formule empirique.

Le fardeau B est relié à la résistance en tension de la roche Ts, la puissance de l'explosif Ex, le diamètre de la colonne de charge ϕ et la structure géologique représentée par un facteur k.

Des relations sont fournies pour déterminer l'espacement, les hauteurs de charge et le sous-forage.

Le degré de fragmentation D_f est calculé à l'aide de l'indice de Bond WI, la taille des fragments s et le fardeau B. Il permet d'apprécier les résultats du sautage.

Le taux de pénétration et le patron de forage permettent de calculer les coûts d'opération.

Le modèle présente une bonne approche d'estimation en mettant l'accent sur les paramètres physiques.

Le grand désavantage est le caractère empirique des relations utilisées. De plus tout ceci ne concerne que le forage sautage dans les exploitations à ciel ouvert. Il est donc très restreint.

5.2.2.3. La méthode des coûts par consommation.

Le modèle de coûts par consommation est celui utilisé par A. Piché (1983) pour la modélisation du marché mondial du minerai de fer [41,71]. Il se base sur le principe selon lequel, pour une opération donnée, les propriétés physiques et les paramètres opérationnels déterminent les consommations de matières, d'énergie ou de main-d'oeuvre. Par exemple la

dureté de la roche exprimée par le taux de pénétration en m/h permet d'estimer la consommation de taillant, de tige, d'énergie, et d'explosif par tonne de minerai. Les consommations sont ensuite multipliées par les coûts unitaires.

Les relations liant les paramètres aux consommations sont déterminées soit de façon statistique à partir d'observations dans les exploitations de fer dans plusieurs pays, soit par simples calculs.

Le modèle présente les avantages suivant:

- l'utilisation des consommations pour calculer les coûts évite le délicat processus d'actualisation; les coûts de facteurs utilisés sont ceux en vigueur sur le lieu et au moment de l'estimation;
- la méthode peut s'appliquer à n'importe quel type de minerai en dérivant les équations correspondantes;

Par contre les désavantages suivants peuvent être soulignés:

- les relations statistiques sont établies pour les exploitations de fer qui en général présentent les mêmes caractéristiques; ce travail doit être repris chaque fois qu'on considère d'autres exploitations où les caractéristiques du minerai sont différentes;

- le détail dans les calculs exige la connaissance du coût de tous les facteurs; ceci augmente la quantité d'informations requises pour chaque estimé.

5.2.2.4. La méthode du USBM [2,3].

Le Bureau des Mines du Ministère de l'Intérieur des États-Unis a pour mission d'établir une base de données sur les opérations minières se rapportant à plus de 34 minéraux stratégiques à travers le monde. Ceci se fait dans le but de produire des estimés pour la politique d'approvisionnement. C'est dans ce but qu'un guide d'estimation des coûts Intitulé " Cost Estimation System Handbook " (CES) est édité. La première version du guide date de 1975, elle a été revisée en 1984.

5.2.2.4.1. Construction du modèle.

Le modèle est construit à partir d'une analyse de chaque activité dans une opération minière. Un exemple d'activité peut être le forage. Pour chaque activité unitaire un maximum d'information est recueilli à travers la littérature, les contacts industriels et les manufacturiers d'équipements.

On procède d'abord à une analyse du type d'équipements utilisés ainsi que les limites de leurs capacités.

On produit ensuite une estimation détaillée des coûts pour quelques niveaux de capacités. À partir des résultats obtenus on procède à une estimation sommaire pour les autres niveaux. Une analyse par régression géométrique permet d'établir une courbe générale de coûts pour tous les

niveaux. Les courbes de formes générales $Y = a * X^b$ doivent tomber dans ±25% des données en mains.

5.2.2.4.2. Les composantes du coût.

Pour chaque activité, les coûts sont divisés en coût en capital et coût d'opération. Ces coûts sont exprimés en $US de 1984 dans les conditions générales d'opération. Des facteurs d'ajustement sont prévus pour tenir compte des conditions particulières.

Les coûts en capital comprennent le coût de la main-d'oeuvre de construction, le coût du matériel de construction, le coût d'achat de l'équipement utilisé et le transport. La Figure 5.4. donne un exemple des courbes utilisées.

Les coûts d'opération sont divisés en coûts de main-d'oeuvre, coût de fournitures et coût d'opération des équipements. La Figure 5.5. en donne un exemple.

5.2.2.4.3. Actualisation des coûts.

Pour utiliser les courbes et les équations hors du contexte dans lequel elles ont été établies, deux types d'ajustement sont nécessaires:

- ajustement des coûts de facteur: ceci se fait pour un pays donné en divisant l'indice de prix américain pour le facteur par l'indice de prix du pays;

- ajustement dans le temps: on divise l'indice des prix de l'année d'estimation par celui de 1984.

La nouvelle version du CES sur chiffrier de Lotus 123 fournit les indices de prix de plus de 50 pays pour les années 1984 à 1987.

Le modèle est conçu pour évaluer une opération dans sa globalité et ainsi tient compte de l'interaction entre différentes activités. Il n'est pas conseillé de l'utiliser pour évaluer une activité isolée.

Toutes les activités d'une opération minière se retrouvent dans le modèle.

Les facteur d'ajustement et d'actualisation permettent avec un bon jugement de tenir compte de toutes les situations.

Le principal reproche fait au modèle est sa génaralité. La précision des estimés est de ±25%.

5.2.2.5. Autres modèles.

Nous mentionnerons ici le modèle de Zellars-Williams rapporté par Deborah J. Shields (1984). Ce modèle se rapproche beaucoup du modèle de coût par consommation et concerne les exploitations des phosphates aux États-Unis.

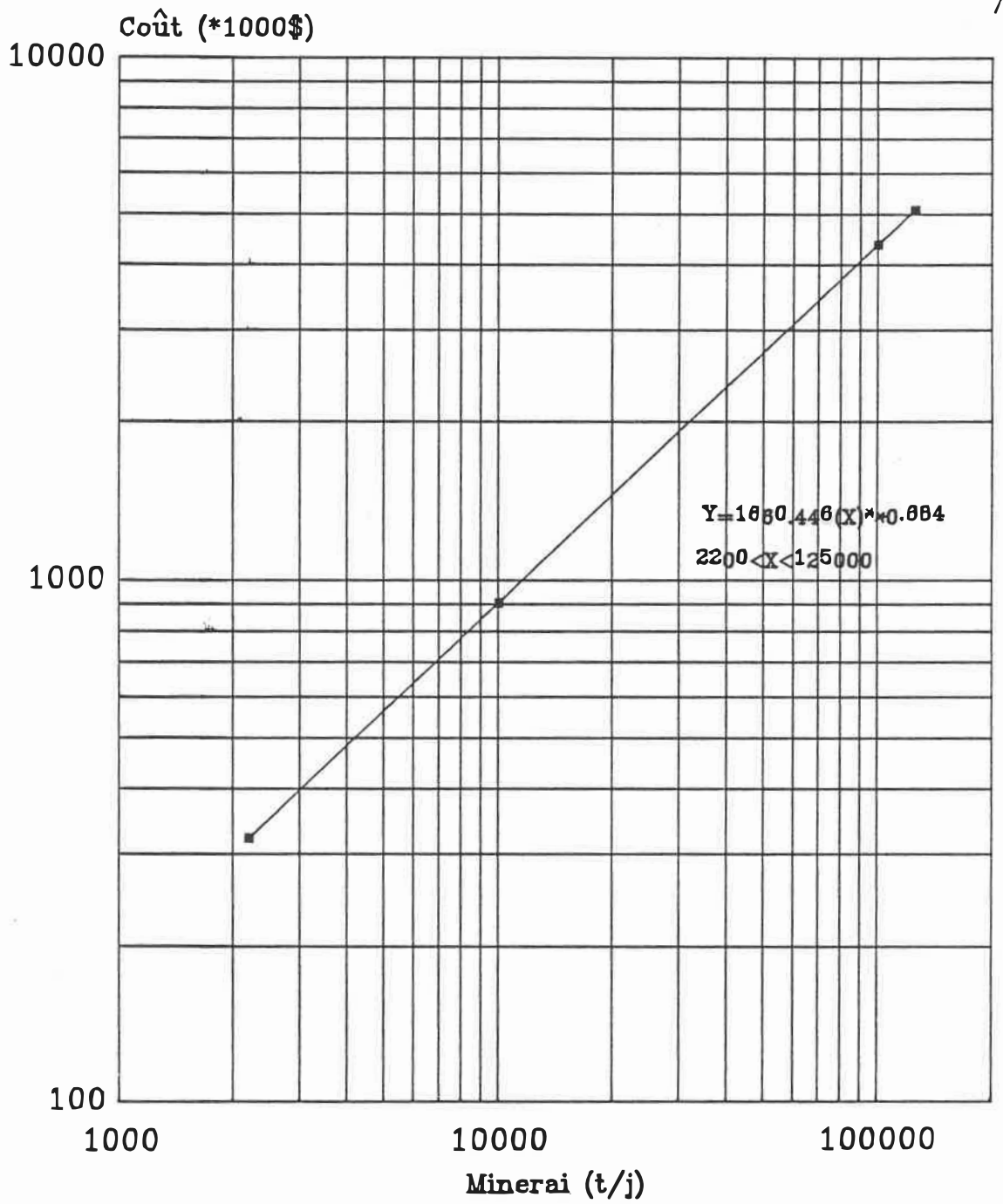


Fig. 5.1. Coût en capital - Roue-pelle
Méthode de USBM.

Source: Cost Esctimation System Handbook: 1) Surface and Underground Mining, IC 9142 Bureau of Mine Information Circular, 1987.

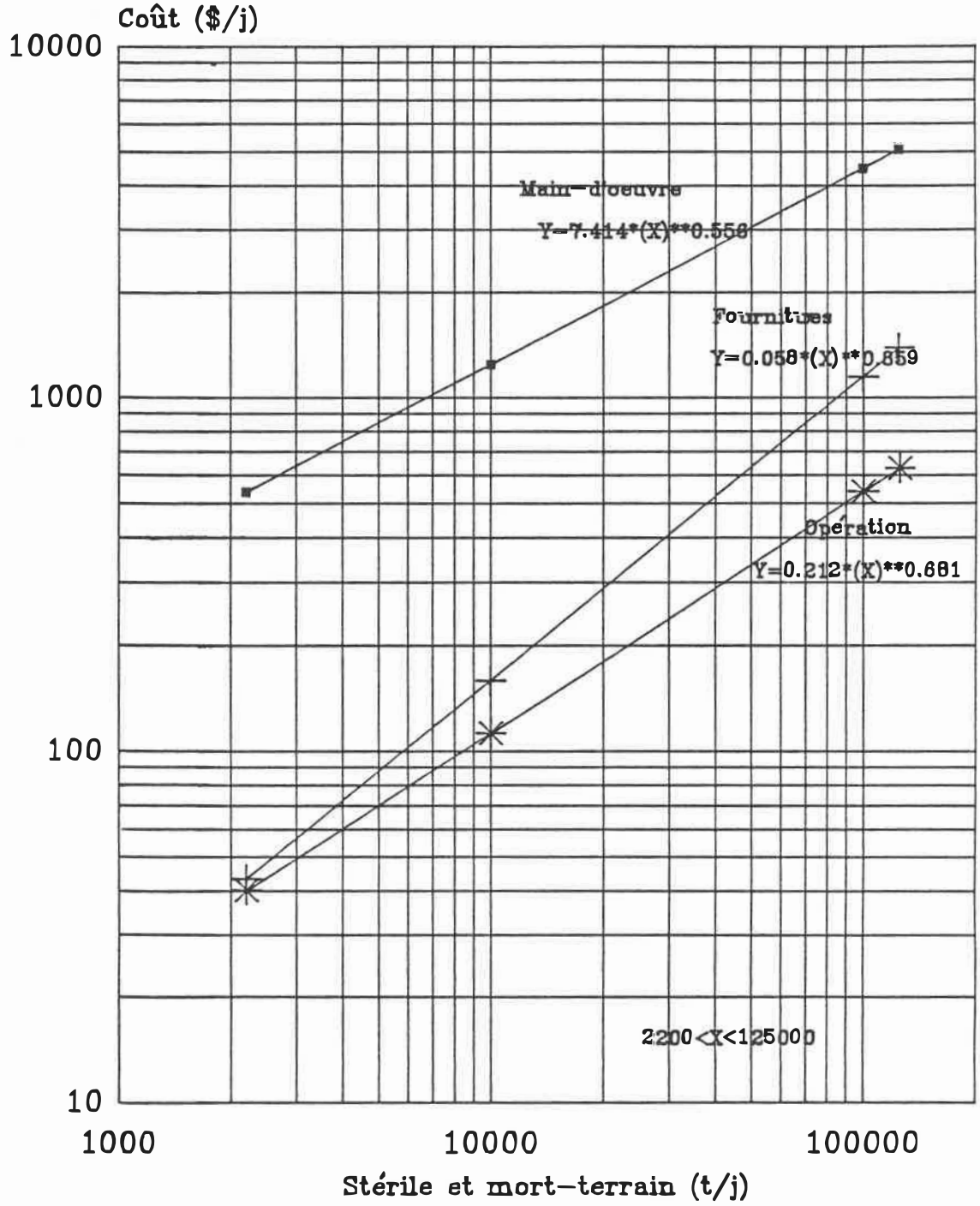


Fig. 5.2. Coût d'opération - Roue-pelle
Méthode de USBM.

Source: Cost Esctimation System Handbook: 1) Surface and Underground Mining, IC 9142 Bureau of Mine Information Circular, 1987.

5.3. La méthode utilisée.

De tous les modèles que nous avons passés en revue, aucun ne peut être adopté pour évaluer toutes les opérations comprises dans cette étude principalement à cause de problèmes d'échelle.

Les exploitations minières au Sénégal (Taïba et Thiès) et au Togo ainsi que l'exploitation hypothétique du Parc W peuvent être évaluées en utilisant le modèle de consommations, mais il aurait fallu construire les courbes du modèle. Peu de données sont disponibles pour faire un tel travail.

Les exploitations au Burkina Faso et au Mali sont de trop petite échelle pour cadrer dans un modèle quelconque.

Pour toutes ces raisons nous avons procédé comme suit:

Les exploitations de Taïba, de Thiès, du Togo et du W sont evaluées en utilisant le modèle du USBM. Les informations relatives à ces exploitations sont tirées de la littérature, des études effectuées par des bureaux conseils, et par le biais de contacts privés; pour tenir compte de conditions spécifiques de la région, beaucoup de soins ont été apportés aux facteurs d'ajustement. Le Tableau 5.1. donne ces facteurs pour le Sénégal. Ces indices nous ont été communiqués par le USBM et nous les avons ajustés à partir de notre propre jugement. On remarquera que les rapports des prix à l'exception du coût de la main-d'oeuvre d'opération sont supérieurs aux rapports américains qui ont été utilisés

comme référence. L'unité monétaire utilisée est le $US. D'autre part on remarque une baisse notoire des indices des prix pour 1980 à 1985 avec une remontée en 1986. La baisse des indices pour les premières années correspondent à la montée du $US par rapport au FCFA pendant cette période. Par contre la chute du $US à partir de 1986 explique la remontée des indices. À défaut d'avoir des indices pour 1987, nous avons utilisé ceux de 1986. La démarche fut la même pour les autres pays.

FACTEURS D'AJUSTEMENT

	M-O OPERAT.	M-O CONST.	PIECES RECHAN.	ACIERS TAILLTS	BOIS	FUEL	EXPLOSIFS ACCESSOI. SAUTAGE	PNEUX	MATERI. CONST.	MATERI. INDUST.	TRSPORT	ELECT.
RAP.PRIX	0.20	1.20	1.25	1.25	0.90	1.50	1.25	1.15	1.15	1.15	1.25	3.00
RAP. M-O	1.20	1.00										

INDICES DES PRIX

1975	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
1980	127.7	127.7	175.6	146.5	198.7	165.0	162.3	183.5	194.8	159.5	121.6	99.9
1981	103.9	103.9	155.2	115.8	168.1	186.9	141.2	161.5	180.9	141.6	94.6	85.9
1982	101.0	101.0	145.1	118.9	138.9	170.4	126.5	148.5	167.9	131.9	100.2	75.1
1983	93.40	93.4	135.8	120.0	118.7	152.5	113.4	139.1	153.9	124.5	90.9	66.1
1984	87.0	87.0	127.5	106.8	113.9	138.3	98.4	129.7	139.5	119.2	83.7	59.0
1985	93.5	93.5	135.9	113.7	122.9	124.4	104.3	139.0	163.7	127.7	87.0	60.6
1986	140.8	140.8	204.7	167.1	205.7	228.9	172.6	209.7	240.6	182.3	124.6	93.2

Tableau 5.1.: Facteurs d'ajustement et indices des prix pour le Sénégal.

Les petites exploitations ont été évaluées par une méthode au long qui s'appuit sur les équipements utilisés. L'estimation se base sur des études et des propositions existantes dans le cas des unités de fabrication de PPA de Say et Kodjari et la remise en opération de l'unité de broyage de Tahoua. L'Annexe II donne un exemple du mode de calcul.

L'estimation des coûts pour les usines d'engrais est basée sur les lignes générales exposées dans le Fertilizer Manual [12] et sur l'étude de quelques projets réalisés par l'IFDC en Afrique et en Asie. Elle se base sur un modèle de calcul de coût d'investissement et l'utilisation de consommations standards pour évaluer les coûts d'opération. L'Annexe III donne un exemple du mode de calcul utilisé.

Les tarifs de transport terrestre dans la région sont tirés de différentes études de projets. En aucun cas avons nous utilisé de modèle de coût de transport.

Par contre pour le transport maritime un modèle de la forme

$Y = a + b * X$ est utilisé avec:

Y = coût unitaire de transport ($/tonne),

a = facteur constant représentant les coûts fixes,

b = coût unitaire par unité de distance,

X = distance en miles nautiques.

Ce modèle reflète la situation dans l'industrie des phosphates, la taille des navires (< 30000 t) et la capacité des ports [29].

Pour les opérations portuaires un forfait est utilisé. Il représente la moyenne des tarifs des différents ports de la région.

Les coûts pour le marché international sont tirés des publications se rapportant au secteur (USBM, Mineral Industrie Surveys, Industrial Minerals, Green Market). Les tableaux 5.2. et 5.3. résument les résultats des différents calculs des coûtd de production et de transport du concentré et des engrais.

	Coût de prod. et teneur	ICS	SIVENG	NSFC	ALG	E.O.(1)	ASIE(2)	USA(3)	E.E.(4)	A.SUD(5)
		6.26	44.09	85.51	86.54	46.88	102.05	54.48	52.96	46.88
		25.54	25.54	25.54	25.54	25.54	25.54	25.54	25.54	25.54
CSPT (Taiba)	25.54 0.37	85.95	188.19	300.14	302.92	195.72	344.84	216.26	212.15	195.72
		2.94	40.77	82.19	83.22	43.55	77.11	29.54	49.63	43.55
	23.07	23.07	23.07	23.07	23.07	23.07	23.07	23.07	23.07	23.07
SSPT (Thiès)	0.34	76.49	187.75	309.58	312.60	195.95	294.65	154.73	213.83	195.95
		36.99	30.15	59.99	75.72	45.01	83.61	53.84	50.40	38.93
	21.29	21.29	21.29	21.29	21.29	21.29	21.29	21.29	21.29	21.29
COTOMIB	0.36	161.88	142.88	225.79	269.47	184.15	291.40	208.68	199.14	167.26
		126.64	130.40	84.47	84.51	116.73	151.17	124.95	121.53	109.67
	44.46	44.46	44.46	44.46	44.46	44.46	44.46	44.46	44.46	44.46
Parc W	0.34	503.24	514.31	379.20	379.31	474.07	575.38	498.26	488.20	453.33
		29.98	37.99	78.23	89.82	23.64	79.88	42.26	22.12	46.44
	22.5	22.50	22.50	22.50	22.50	22.50	22.50	22.50	22.50	22.50
MAROC (Casablanca)	0.34	154.34	177.92	296.28	330.34	135.71	301.12	190.47	131.24	202.76
		48.31	57.62	98.66	100.07	41.88	77.03		46.32	38.84
	28.5	28.50	28.50	28.50	28.50	28.50	28.50		28.50	28.50
FLORIDE (Tampa)	0.34	225.90	253.28	373.99	378.15	207.00	310.38		220.06	198.06

Tab.5.2. MATRICE DES COUTS ORIGINES - DESTINATIONS: CONCENTRE (Production et Transport)

(1) Moyenne de Londres, Rotterdam, Anvers et Dunkerque
(2) Inde
(3) Baltimore
(4) Dakar, Yougoslavie
(5) Tubararo, Bresil

	ICS	SIVENG	FSFC	ALG	ALG-REL.	INTERN
	371.68	526.47	707.55	828.45	413.95	120
	138.92	285.32	196.88	485.49	268.38	74.23
	371.68	526.47	707.55	828.45	413.95	120.00
BENIN (Parakou)	510.60	811.79	904.43	1313.94	682.33	422.23
	277.20	212.25	862.21	828.45	378.77	93.70
	371.68	526.47	707.55		413.95	120.00
BURKINA (Bobo)	648.88	738.72	1569.76	828.45	792.73	464.57
	122.11	91.71	358.25	120.53	499.31	68.33
	371.68	526.47	707.55	828.45	413.95	120.00
C.d'IVOIRE (Bouaké)	493.79	618.18	1065.80	948.98	913.26	409.41
	169.72	399.23	548.05	324.82	478.04	69.35
	371.68	526.47	707.55	828.45	413.95	120.00
GHANA (Tamalé)	541.40	925.70	1255.60	1153.27	892.00	411.63
	168.96	394.19	596.09	371.88		97.18
	371.68	526.47	707.55	828.45		120.00
GUINEE (Kouroussa)	540.64	920.66	1303.64	1200.33		472.13
	176.36	382.73	2000.00	332.50	459.38	169.24
	371.68	526.47		828.45	413.95	120.00
MALI (Ségou)	548.04	909.20	2000.00	1160.95	873.33	628.77
	220.92	862.27	121.25	650.03	315.00	113.69
	371.68	526.47	707.55	828.45	413.95	120.00
NIGER (Maradi)	592.60	1388.74	828.80	1478.48	728.95	508.02
	170.63	358.25		862.21	527.18	90.417
	371.68	526.47	707.55	828.45	413.95	120.00
NIGERIA (Kaduna)	542.31	884.72	707.55	1690.66	941.14	457.43
	30.352	109.41	454.95	568.30		55.033
	371.68	526.47	707.55	828.45		120.00
SÉNÉGAL (Kaffrine)	402.03	635.88	1162.50	1396.75		380.51
	115.85	232.256	412.752	464.090	457.19	65.029
	371.68	526.47	707.55	828.45	413.95	120.00
TOGO (Atakpamé)	487.53	758.73	1120.30	1292.54	871.14	402.24

Tab. 5.3. MATRICE DES COUTS DE TRANSPORT ORIGINES - DESTINATIONS: t P2O5 (Engrais)

6.. PROGRAMMATION LINÉAIRE ET MODÉLISATION DE MARCHÉ

La forme générale d'un problème d'optimisation avec contraintes est:

Minimiser f(X)

Sujet à:

$$g_i(X) <= a_i \qquad i=1,\ldots,m$$

$$h_j(X) = b_j \qquad j=1,\ldots,n$$

$X = (x_1,\ldots\ldots,x_p)$ est un p-uplet d'un espace fermé P de R^p.

x_1, $x_2,\ldots\ldots,x_p$ sont les variables de décision. En méthodes quantitatives les décisions sont des nombres et les valeurs des variables de décision représentent des niveaux d'activités.

f est une fonction de P dans R et est appelée fonction objective. Le problème consiste à trouver la plus petite valeur de la fonction f pour les p-uplets $(x_1,\ldots\ldots,x_p)$ tout en respectant les contraintes ou conditions restrictives.

gi et hj sont des fonctions des variables x_1, $x_2,\ldots,x_p$. Elles représentent les contraintes en ce sens que leurs valeurs pour x_1, $x_2,\ldots,x_p$ doivent respecter des inégalités et égalités dont les termes de droite sont a_i et b_j. Les valeurs de x_1, $x_2,\ldots,x_p$ respectant ces inégalités et égalités pour g et h sont des solutions possibles du problème. Une solution optimale du problème est un p-uplet $(x1,\ldots\ldots,x_p)$ qui en plus d'être une solution possible donne une valeur minimale pour f.

L'optimisation avec contraintes a connu ses premières applications pendant la 2ème guerre mondiale pour résoudre des problèmes de logistique. Aujourd'hui elle s'étend dans toutes les études de planification, le secteur de la défense, de la santé, du transport, les problèmes d'allocation de ressources, etc.

Dans l'industrie minière on trouve des exemples dans la minimisation des erreurs d'estimation en géostatistique, la planification des opérations et l'étude des marchés des minéraux. Nous donnerons des exemples dans le paragraphe suivant.

6.1. Programmation linéaire.

6.1.1. Forme générale.

Lorsque les fonctions f, gi et hj sont des fonctions linéaires des variables x_1, $x_2,\ldots,x_p$ le problème est un problème de programmation linéaire (LP). Le LP est donc un cas particulier de problème d'optimisation avec contraintes, qui peut alors s'écrire:

$$\text{Minimiser } \Sigma\, c_l * x_l \qquad l=1,\ldots,p$$

Sujet à:

$$\Sigma\, k_{il} * x_l <= a_i \qquad i=1,\ldots,m \qquad (1)$$

$$\Sigma\, k_{jl} * x_l = b_j \qquad j=1,\ldots,n$$

6.1.2. Cas particuliers: problème de transport.

6.1.2.1. Formulation.

Le problème de transport est un cas particulier de PL. Il représente la situation où on se trouve à distribuer un produit à partir de m origines ayant chacune une quantité a_i (offre) vers n destinations ayant chacune un besoin b_j (demande). On suppose un système équilibré, i.e.

$$\Sigma\, a_i = \Sigma\, b_j.$$

De plus les a_i et les b_j sont positifs et les coûts unitaires de transfert de l'origine i à la destination j est c_{ij}.
Le problème est de trouver les quantités de produit à transférer des différentes origines aux différentes destinations de sorte que le coût global soit minimum. Le problème se formule comme suit:

$$\text{Minimiser } \Sigma\, \Sigma\, c_{ij}\, x_{ij}$$

Sujet à:

$$\Sigma\, x_{ij} = a_i \qquad i=1,\ldots,m \qquad (2)$$

$$\Sigma\, x_{ij} = b_j \qquad j=1,\ldots,n$$

$$x_{ij} >= 0$$

(1) diffère de (2) par le fait que les k_{i1} et k_{j1} sont tous égaux à 0 ou 1. Le problème dual s'écrit:

$$\text{Maximiser } \Sigma\ \mu_i * a_i + \Sigma\ \beta_j * b_j$$

Sujet à:

$$\mu_i + \beta_j <= c_{ij} \quad i=1,\ldots m,\ j=1,\ldots n.$$

C'est le cas où un entrepreneur veut maximiser son profit en se proposant d'acheter le produit au coût unitaire μ_i à l'origine i et le propose au prix β_j à la destination j.

6.1.2.2. Résolution.

L'algorithme le plus courant pour la résolution des problèmes de PL est celui du simplexe [37]. Différentes variantes sont utilisées pour adapter le mode de résolution à la structure du problème. C'est ainsi qu'on a le simplexe-réseau, le simplexe-transport, etc. Le problème de transport admet toujours une solution avec au plus (n+m-1) variables de décisions non nulles [37]. En effet on se trouve devant un système de (n+m) équations loinéaires à (n+m) inconnues. Mais l'égalité entre l'offre et la demande totale fait que (n+m-1) équations seulement sont linéairement indépendantes.

La résolution par la méthode du simplexe fournit les résultats suivants:

- la valeur optimale de la fonction objective $f(X^*)$,

- les valeurs optimales des variables de décision x_{ij}^*,
- les coûts réduits δ_{ij},
- les valeurs optimales des variables duales μ_i, β_j,
- les intervalles de variation des coûts c_{ij} qui ne changent pas la solution optimale,
- les intervalles de variation possibles des a_i et b_j qui ne changent pas la solution optimale.

La valeur $f(X^*)$ de la fonction objective est un résultat numérique qui représente le coût de transfert total minimum dans les conditions du problème.

Les valeurs x_{ij}^* donnent les quantités optimales expédiées des origines a_i aux destinations b_j.

Le coût réduit δ_{ij} représente la baisse minimale du coût c_{ij} pour que la variable x_{ij} soit non nulle dans la solution optimale. Pour toutes les variables non nulles dans la solution optimale les coûts réduits sont nuls.

La variable duale μ_i^* représente la baisse du coût global de transfert quand a_i augmente d'une unité toute chose étant égale par ailleur. De même β_j^* représente l'augmentation du coût global de transfert lorsque b_j augmente d'une unité.

Les intervalles de variation des coûts c_{ij} nous disent de combien peut changer c_{ij} sans que la solution optimale ne change. Pour une variation de c_{ij} dans cet intervalle les variables optimales ne changent pas mais peuvent changer de valeur. La fonction objective peut changer aussi.

De même les intervalles de variation des a_i et b_j sont ceux pour lesquels les μ_i et β_j sont valables.

Les intervalles et les variations de valeur présentés ne concernent qu'un paramètre à la fois. L'examen de ces valeurs permet d'identifier les paramètres critiques du problème et d'orienter les analyses de sensibilité. Le Tableau 6.1. donne un exemple théorique de problème de transport et sa solution avec identification des paramètres. L'algorithme utilisé est le simplexe.

6.2. Modélisation du marché Ouest-africain des phosphates.

6.2.1. Revue de la littérature.

Comme nous l'avons dit l'optimisation avec contraintes a aussi ses applications dans l'industrie minière, en particulier dans la modélisation de marché. Les exemples ci-après en témoignent:

La Commission Économique de l'O.N.U. pour l'Europe présenta en 1968 la programmation linéaire comme un outils pour l'étude de marché des minéraux et l'utisa pour étudier le marché de fer [28].

PROBLEME:

Min 10 X11 + 15 X12 + 8 X13 + 25 X14 + 12 X21 + 17 X22 + 13 X23
+ 15.2 X24 + 35 X31 + 19 X32 + 8 X33 + 7 X34

SUJET A:

X11 + X12 + X13 + X14 <= 10000
X21 + X22 + X23 + X24 <= 7000
X31 + X32 + X33 + X34 <= 2500
X11 + X21 + X31 >= 11000
X12 + X22 + X32 >= 3000
X13 + X23 + X33 >= 1500
X14 + X24 + X34 >= 3500

SOLUTION:

OPTIMUM TROUVÉ A LA 8ème ITÉRATION

VALEUR DE LA FONCTION OBJECTIVE: 210700.0000

VARIABLE	VALEUR	COUT REDUIT
X11	8500.000000	.000000
X12	.000000	.000000
X13	1500.000000	.000000
X14	.000000	11.800000
X21	2500.000000	.000000
X22	3000.000000	.000000
X23	.000000	3.000000
X24	1000.000000	.000000
X31	.000000	31.200000
X32	.000000	10.200000
X33	.000000	6.200001
X34	2500.000000	.000000

LIGNE	VARIABLE D'ÉCART	PRIX DUAL
2)	.000000	2.000000
3)	500.000000	.000000
4)	.000000	8.200000
5)	.000000	-12.000000
6)	.000000	-17.000000
7)	.000000	-10.000000
8)	.000000	-15.200000

INTERVALLES DANS LESQUELS LA SOLOUTION NE CHANGE PAS:

VARIABLE	COEFFICIENT ACTUEL	CROISSANCE MAXIMALE	DECROISSANCE MAXIMALE
X11	10.000000	.000000	3.000000
X12	15.000000	INFINI	.000000
X13	8.000000	3.000000	10.000000
X14	25.000000	INFINI	11.800000
X21	12.000000	3.000000	.000000
X22	17.000000	.000000	17.000000
X23	13.000000	INFINI	3.000000
X24	15.200000	11.800000	6.200001
X31	35.000000	INFINI	31.200000
X32	19.000000	INFINI	10.200000
X33	8.000000	INFINI	6.200001
X34	7.000000	6.200001	INFINI

MEMBRES DE DROITE

LIGNE	COEFFICIENT ACTUEL	CROISSANCE MAXIMALE	DECROISSANCE MAXIMALE
2	10000.000000	2500.000000	500.000000
3	7000.000000	INFINI	500.000000
4	2500.000000	1000.000000	500.000000
5	11000.000000	500.000000	2500.000000
6	3000.000000	500.000000	3000.000000
7	1500.000000	500.000000	1500.000000
8	3500.000000	500.000000	1000.000000

Tableau 6.1.: Exemple de résolution d'un problème de LP.

Margueron C. [57] utilisa un modèle de transport pour évaluer les potentialités du Brésil dans le marché mondial du minerai de fer.
L'auteur a commencé par une évaluation sommaire des coûts de minage et de traitement des exploitations groupées par pays. Puis il évalua les coûts de transport du concentré jusqu'aux différents ports d'embarcation et les coûts de transport maritime. Il procéda ensuite à une estimation des consommations de fer des grands pays industrialisés qu'ils regroupa en blocs (Amérique du Nord, Europe de l'Ouest, Europe de l'Est, Royaume Uni et Japon). Il fit une estimation de la demande pour 1975 pour établir les courants optimaux du commerce de minerai de fer pour cette année dans l'hypothèse d'un marché libre.
Différentes analyses de scénarios sont présentées.
Le modèle prédit entre autre une régionalisation du marché et des difficultés pour les exploitations qui ont des teneurs faibles.
La faiblesse du modèle réside dans le caractère sommaire des estimations des coûts.

Piché A. et J. Elbrond [41,71] reprirent la même étude en raffinant l'estimation des coûts par la méthode de consommation (voir 5.2.3.) et en mettant l'accent sur les producteurs canadiens avec des données de 1980.
Les coûts utilisés incluent les dépenses de capital et les taxes.
Diverses analyses de scénarios hypothétiques sont faites. Ces scénarios portent sur la levée de certains contrats d'importation et l'augmentation des coûts de production.

Shield D. [77] utilisa un modèle de réseau linéaire pour étudier le marché intérieur des phosphates aux États-Unis pour 1983. Les noeuds du réseau sont représentés par les mines, les usines de traitement, les stocks de réserves (minerai brut et concentré), les usines de fabrication d'acide phosphorique et les demandes intérieures et extérieures d'acide et de concentré. Les arcs sont construits à partir des noeuds en utilisant les informations sur les activités de l'industrie. Les différents coûts sont obtenus du USBM. Aucun coût en capital n'était inclus. L'objectif était de minimiser le coût global sur tous les arcs en respectant les contraintes de capacité et de demande.

Le modèle reproduisit assez bien les niveaux d'activité de l'industrie avec des erreurs inférieures à 5%. Ces erreurs étaient plus faibles que la précision des données (20%). Par contre le modèle est limité par le fait qu'il ne présente aucune analyse de scénarios.

6.2.2. Modélisation.

La structure de l'industrie des phosphates et des engrais phosphatés a été décrite aux chapitres précédents. De même nous avons établi les consommations historiques de P_2O_5 et dégagé les tendances. Nous tentons ici de formuler et résoudre le problème suivant:

- étant donné les productions minières de concentré,

- étant donné la demande en concentré des usines régionales d'engrais phosphatés,
- étant donné les demandes des pays en P_2O_5,
- étant donné une offre et une demande de concentré sur le marché international,
- étant donné une offre d'engrais phosphatés sur le marché international,

i) trouver les lignes de distribution de P_2O_5 sous forme de concentré qui minimisent les coûts globaux de transfert, des points d'offre aux points des demandes; l'offre et la demande en concentré considérées sont régionales et internationales;

ii) trouver les lignes de distribution de P_2O_5 sous forme d'engrais qui minimisent les coûts de transfert, des points d'offre aux points de la demande; la demande en engrais est ici régionale.

On fait dans un premier temps l'hypothèse d'un marché libre où les paramètres sont l'offre, la demande et les coûts de transfert en faisant abstraction de tout lien commercial. La Figure 6.1. ci-après schématise la structure du problème.

A1 représente les mines produisant du concentré;

A2 représente les unités produisant du RPA ou du RP;

B représente les usines d'acide phosphorique;

C représente le marché international pour l'offre et la demande de tous les produits;

D1 représente les usines de TSP;

D2 représente les usines de SSP;

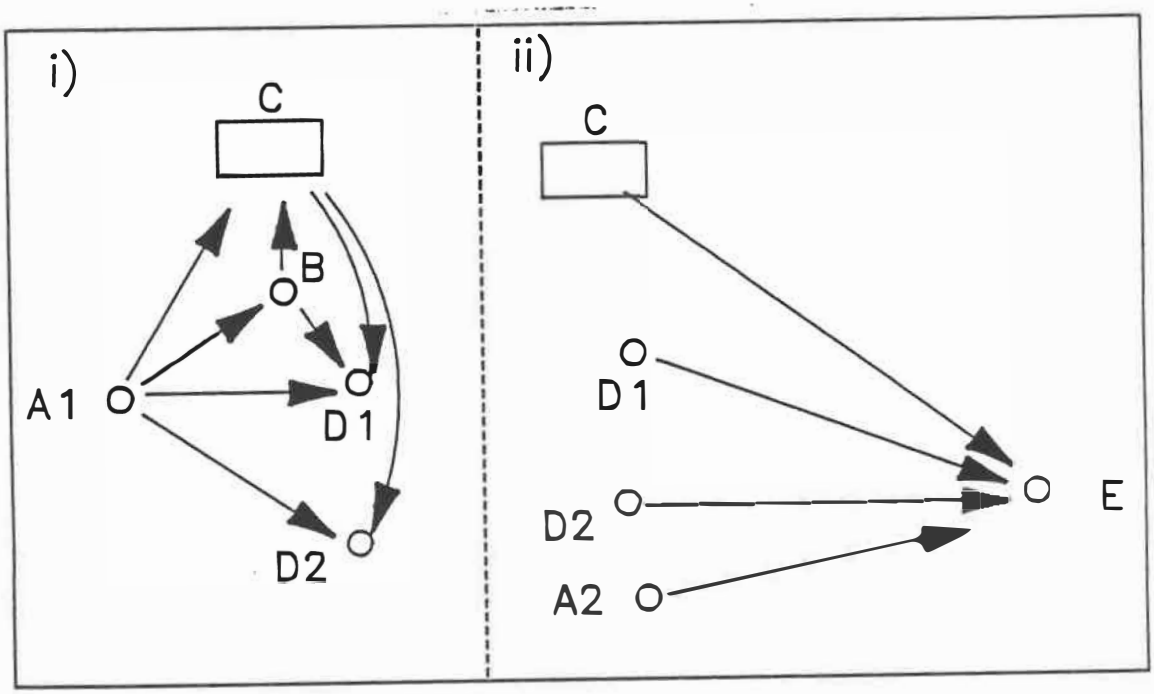


Fig. 6.1. Schéma du modèle.

E représente les demandes des pays pour différents types d'engrais phosphatés.

Le problème peut se formuler en un problème général de PL ayant une structure apparente de réseau.

$$\text{Minimiser } \Sigma\, c_{ij} * x_{ij}$$

$$\Sigma\, x_{ij} - \Sigma\, x_{ij} = b_i \quad (i,j) \in N^2$$

$$\Sigma\, x_{ki} = 2.39\, \Sigma\, x_{li} \quad i \in U,\ k \in A,\ l \in M$$

$$x_{ij} >= 0$$

L'équation en x_{ij} traduit la conservation de flot en tout noeud. N est l'ensemble des noeuds.

La 2ème contrainte s'applique aux usines de TSP qui reçoivent du P_2O_5 sous forme d'acide phosphorique et de concentré dans une certaine proportion. Cette contrainte altère la structure réseau du problème qui ne peut alors être résolu que par un algorithme général de programmation linéaire. D'autre part l'examen des données nous montre qu'il n'y a qu'un seul producteur d'acide phosphorique au niveau de la région: l'ICS à m'Bao. Cette production est essentiellement destinée à l'exportation en dehors d'une petite quantité consommée à Darou Khoudoss. Nous faisons donc abstraction du commerce d'acide phosphorique, ce qui élimine la contraite de proportionalité. Le problème i) devient alors un problème de transport entre les point d'offre et de demande de concentré.

Ceci se formule comme suit:

$$\text{Minimiser } \Sigma\, c_{ij} * x_{ij}$$

$$\Sigma\, x_{ij} = a_i \quad i=1,\ldots,m$$

$$\Sigma\, x_{ij} = b_j \quad j=1,\ldots,n$$

$$x_{ij} >= 0$$

Les Figures 6.2 et 6.3. donne la localisation géographique des points d'offre et de la demande régionales et le contexte internationale du modèle.

Le problème ii) se formule aussi en un modèle de transport où les a_i représentent les besoins des pays en P_2O_5 et les b_j les capacités des usines régionales et l'offre sur le marché international. La Figure 6.4. donne les différentes localisations.

Les données servant à résoudre le problème sont:

Les c_{ij} sont les coûts de transfert de l'origine i à la destination j en $US début 1987 par tonne de P_2O_5. Ils incluent les coûts de production et de transport. Nous n'avons pas inclus dans les coûts de production les intérêts et les taxes pour les raisons suivantes: 1) à cause de l'implication des gouvernements, la plupart des investissements dans les projets considérés sont subventionnés; 2) nos informations sur la

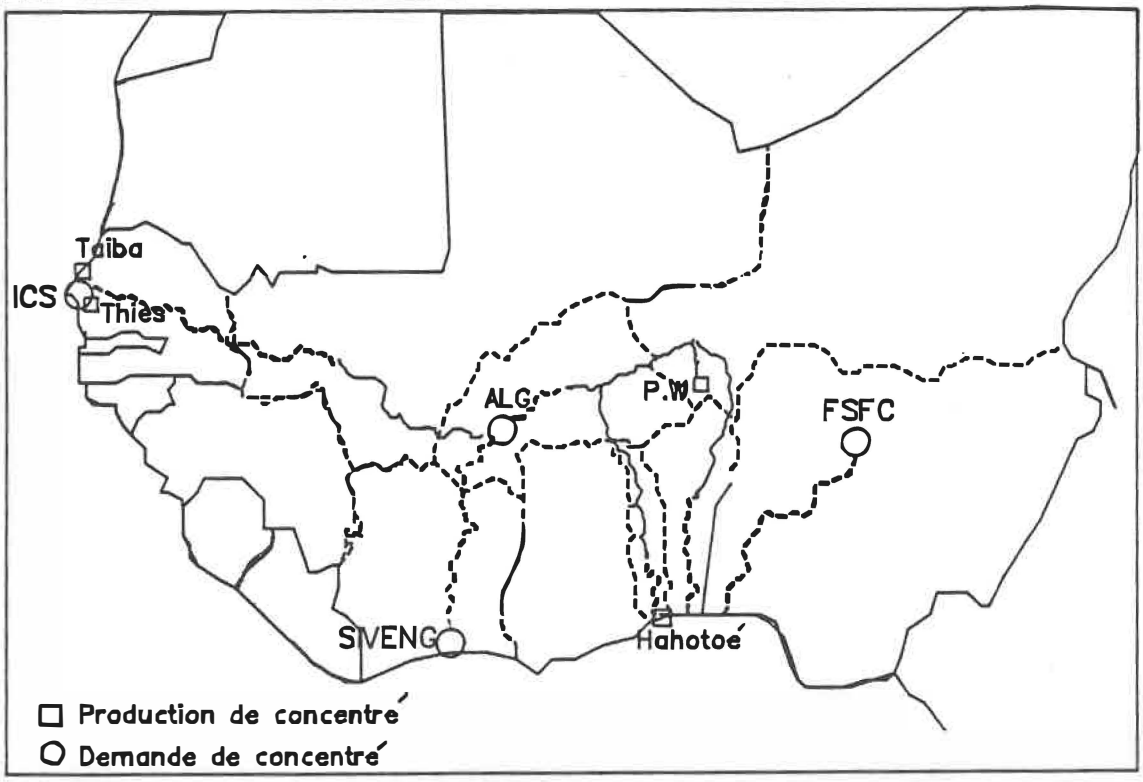


Fig. 6.2. Offres et demandes intérieures de concentré.

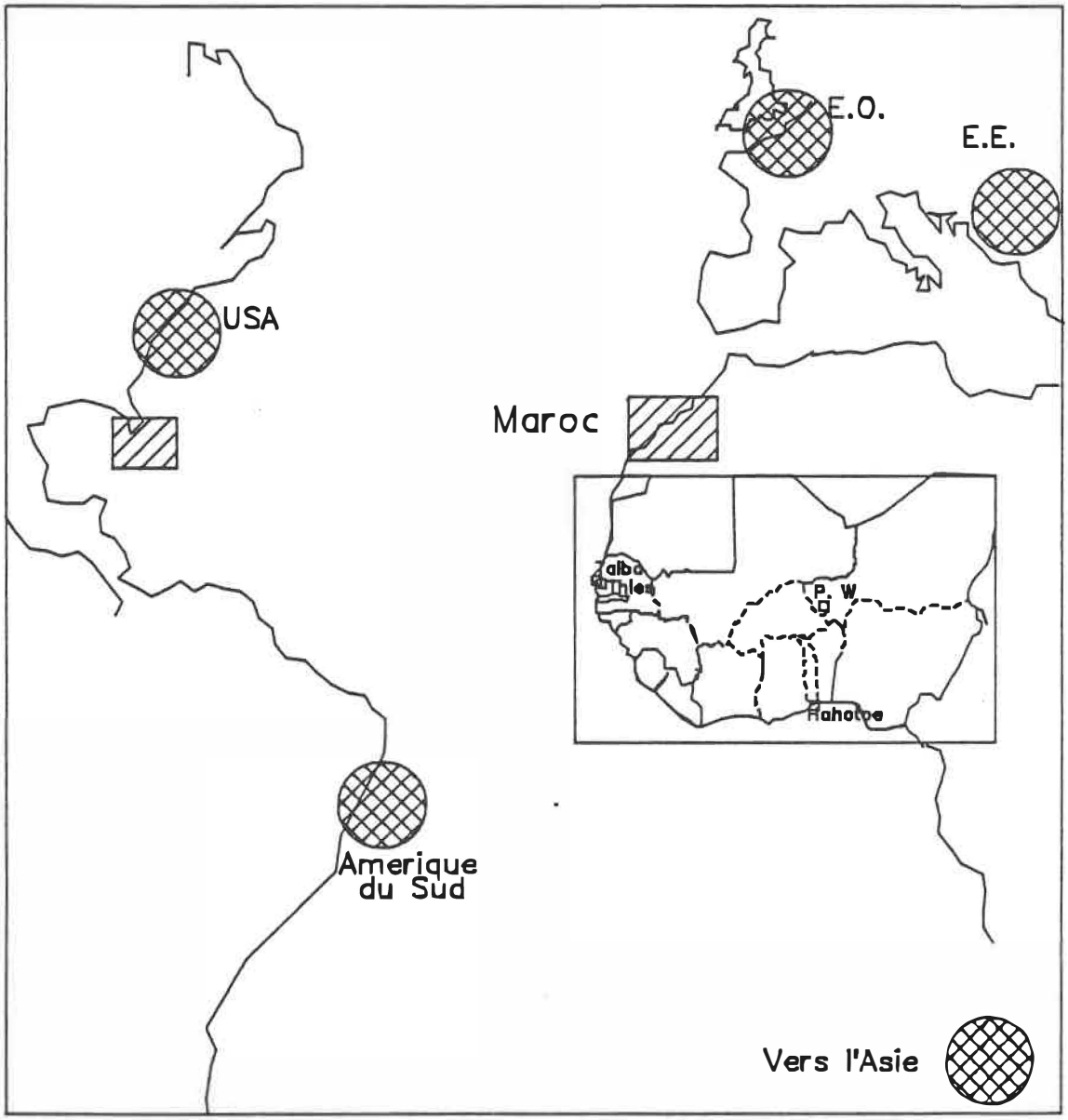


Fig. 6.3. Offres et demandes internationales de concentré.

structure en capital des exploitations ne sont pas toujours précises; 3) dans la plupart des pays le système de taxation ne s'applique pas à l'industrie et au mouvement des intrants agricoles; les

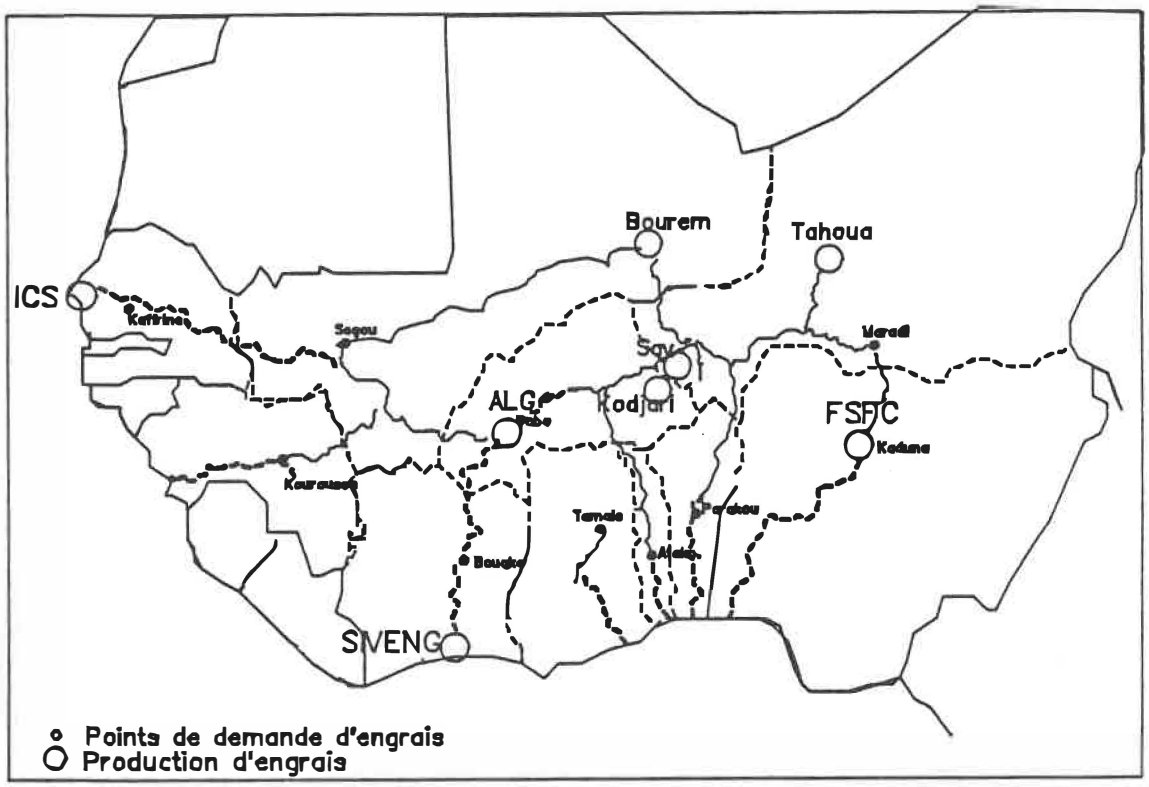


Fig. 6.4. Offres et demandes intérieures d'engrais.

usines d'engrais actuelles opèrent à une fraction de leur capacité de design. L'analyse se limite donc aux coûts marginaux de production.

Le coût de transport est calculé en considérant le trajet le plus court. Ce trajet peut contenir des tronçons de voies maritimes, de chemins de fer et de route. Les cours d'eau intérieurs ne sont pas considérés sauf dans le cas du Mali.

Pour les concentrés de différentes teneurs et les différents types d'engrais les coûts par tonne de P_2O_5 sont obtenus en divisant le coût de la tonne du produit par la teneur en P_2O_5. On fait ici l'hypothèse que les usines d'engrais s'ajustent à la variation de la teneur du concentré. Pour les PPA et les RP les coûts par tonne de P_2O_5 sont calculés en utilisant le coût de transfert et l'efficacité par rapport au SSP (voir Tab. 4.5.).

Les capacités a_i sont celles du design des exploitations minières ou des usines d'engrais telles que fournies par différentes sources. Elles sont exprimées en tonnes de P_2O_5 par an.

Les demandes b_i correspondent soit aux capacités des usines soit aux besoins des pays en équivalent P_2O_5 pour l'année 1987. Pour chacun des pays la demande est supposée concentrée en un seul lieu géographique assez représentatif de la dispersion de la demande dans tout le pays.

La demande internationale de concentré est représentée par 5 pôles: l'Europe de l'Ouest, les États-Unis, l'Europe de l'Est, l'Asie et l'Amérique latine. Le point de la demande est un port d'entrée de chacune de ces régions.

L'offre internationale de concentré provient essentiellement des États-Unis et du Maroc.

La demande internationale des engrais en provenance des producteurs africains est localisée en Asie. L'offre quant à elle provient de l'Europe de l'Ouest.

Les tableaux 6.2. et 6.3. ci-après donnent les valeurs de l'offre et de la demande pour les différentes origines et destinations. Le tableau 6.4. donne les localisations sous forme de liste avec les types de produit.

	ICS Sénégal 252	SIVENG C.Ivo. 10	NFSC Nigeria 20	ALG Burkina 20	EUR.OC. (1) 4012	ASIE (2) 1608	EUR.EST (3) 1310	USA (4) 241	AM.SUD (5) 452
TAÏBA 743									
THIÈS 51									
TOGO 824									
PARC W 57									
MAROC 4236									
USA 2051									

Tableau 6.2. MATRICE ORIGINES - DESTINATIONS: CONCENTRE (*1000t P2O5)
(1) Moyenne de Londres, Anvers, Rotterdam et Dunkerque
(2) Inde
(3) Bakar, Yougoslavie
(4) Côte Est
(5) Brésil

	BÉNIN Parakou 3435	BURKINA Bobo 4598	C.IVOI. Bouaké 10634	GHANA Tamalé 5203	GUINÉE Kouroussa 132	MALI Ségou 10845	NIGER Maradi 1284	NIGERIA Kaduna 117978	SÉNÉGAL Kaffrine 8364	TOGO Atakpamé 3966
ICS 129000										
SIVENG 10000										
NFSC 20000										
ALG 20000										
INTERNA.										

Tableau 6.3. MATRICE ORIGINES - DESTINATIONS: ENGRAIS (t P2O5)

Production de Concentré:	Engrais phosphatés:	
TAÏBA (Sénégal)	ICS (Sénégal)	TSP
THIÈS (Sénégal)	SIVENG (Côte d'Ivoire)	SSP
KPÉMÉ (Togo)	FSFC (Nigeria)	SSP
PARC W (Niger)	ALG (Burkina Faso)	SSP
MAROC	SAY (Niger)	PPA
FLORIDE	KODJARI (Burkina Faso)	PPA
	TAHOUA (Niger)	RP
	BOUREM (Mali)	RP

Tableau 6.4. Liste des différentes unités de production.

6.2.3. Justification du modèle.

La position compétitive d'un projet dépend non seulement de ses coûts de production propres mais aussi de la capacité d'absorption du marché visé et de l'offre provenant d'autres producteurs. En dépit des barrières et des contrats à long terme, les marchés tendent toujours vers un équilibre où les producteurs aux coûts les plus bas prennent les plus grandes parts du marché.

L'industrie des phosphates connait un surplus de l'offre par rapport à la demande, du moins au niveau des ressources. La production mondiale de

concentré en 1985 était de 151.363 Mt alors qu'on évaluait les ressources exploitables aux mêmes coûts à 36590 Mt [15]. Cette production correspondait à 39.882 Mt de P_2O_5 dont 88% était sous forme d'engrais. En Afrique de l'Ouest nous avons aussi vu que l'offre en P_2O_5 dépassait de loin la consommation. La situation est donc peu favorable aux producteurs. Dans un tel contexte l'approche par PL vise d'abord à retracer les courants d'échanges majeurs telles que observés dans le commerce des phosphates puis à établir de façon quantifiée l'impact financier d'une décision de mise en valeur d'un gisement ou la construction d'une usine d'engrais. Elle fait ressortir l'importance des facteurs rentrant dans les coûts de production.

Nous avons séparé le marché de concentré de celui des engrais à cause de l'écart entre le niveau de la production minière et celui de la consommation des engrais dans l'agriculture au niveau de la région. En effet, si des productions minières à petite échelle comme au Burkina et au Mali sont tournées vers la satisfaction des besoins intérieurs en P_2O_5, les productions de concentré au Sénégale et au Togo sont par contre destinées au marché international. Les usines locales qu'elles alimentent sont plutôt un marché d'appoint. La position compétitive de ces exploitations ne peut être appréciée que dans un contexte international. Il en est de même de projet comme celui du Parc W.

Dans le problème ii) on considère la distribution des engrais des unités régionales de production aux points de consommation. Ceci suppose que les usines s'approvisionnent en concentré de moindre coût, utilisant les

résultats de i). Tel que formulé, le problème permet donc d'examiner la position compétitive des unités existantes, mais aussi des projets en étude tel que celui de l'ALG.

7.. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans ce chapitre nous présentons les différents scénarios et les résultats auxquels nous aboutissons.

Dans une première partie nous nous interessons seulement au mouvement du concentré des producteurs aux usines d'engrais; la deuxième partie traite de l'offre et de la demande d'engrais. Les résultats seront commentés. Pour les valeurs numériques se reporter à l'Annexe IV, Tableaux IV.1 à IV.13.

7.1. Marché du concentré.

7.1.1. Observations des flux commerciaux.

Le Tableau IV.1. donne les offres et les demandes et les flux commerciaux observés entre les origines et les destinations tels que rapportés dans les statistiques commerciales.

La première remarque est que 23 flux non nuls sont rapportés. Or dans un problème de transport comme nous l'avons souligné en 6.1.2.2. le nombre maximal de flux non nuls qu'on peut obtenir est (n+m-1), soit ici 12. Donc ces courants ne correspondent pas à une solution de PL. Pour avoir une base de travail nous diminuons le nombre d'observations en éliminant les flux «mineurs» pour se ramener à un nombre proche du maximum

possible. Les offres et les demandes sont réajustées en conséquent. Nous obtenons le Tableau IV.2..

7.1.2. Cas de base.

Le cas de base correspond à l'optimisation du coût global de transfert en ne considérant que les contraintes relatives aux offres et aux demandes en concentré. On fait abstraction des contrats d'importation, des barrières commerciales, etc.

Le Tableau IV.3. donne les résultats. Leur examen fait ressortir les points suivants:

Au plan qualitatif tous les courants d'échange rapportés appaissent à l'exception du flux Taïba-SIVENG qui fait place à un flux Togo-SIVENG.

Au plan quantitatif, le nombre de flux trouvés (12) est inférieur à celui des flux observés (18); il ne peut en être autrement compte tenu de la limitation sur le nombre de solutions possibles. D'autre part on peut faire les commentaires suivants:

- pour la zone Afrique de l'Ouest, le Sénégal satisfait sa demande intérieure tandis que le Togo s'empare des autres marchés; donc l'approvisionnement de la SIVENG par Taïba ne peut s'expliquer que par d'autre considération. Les exportations vers l'Europe de l'Ouest ressortent assez bien.

- pour l'Europe la position privilégiée du Maroc est confirmée; par contre l'approvisionnement de l'Europe de l'Ouest par les États-Unis est sous-estimé.
- les courants vers l'Asie et l'Amérique latine sont mal représentés ce qui est une conséquence de la mauvaise représentation des exportations des États-Unis.

Pour expliquer ses distorsions deux hypothèses peuvent être envisagées:

- une baisse des coûts de transfert des États-Unis vers l'Europe de l'Ouest à cause des coûts de transport qui peuvent bénéficier d'un traffic intense et de retour de cargos;
- des accords d'échange privilégiés à cause de l'intégration verticale des entreprise en Europe et aux États-Unis d'une part, ou à cause de la participation de l'Europe et des États-Unis dans les capitaux des entreprises en Afrique de l'Ouest. Dans les faits ces phénomèmes existent.

Nous allons tour à tour considérer ces deux options.

7.1.3. Baisse du coût de transfert USA-Europe de l'Ouest.

L'analyse de sensibilité sur les coûts de transfert USA-Europe de l'Ouest à partir du cas de base nous montre que une baisse de 7% était nécessaire pour changer les résultats. En appliquant cette variation tout en gardant les autres paramètres constants on obtient les résultats du Tableau IV.4..

Cette modification a eu pour seul effet la reprise par les États-Unis de la part du Togo en Europe de l'Ouest avec une baisse équivalente des exportations vers l'Asie qui elles sont prise par le Togo. On se rapproche donc des courant d'échange observés pour les États-Unis mais on s'en éloigne de beaucoup pour le Togo et l'Europe de l'Ouest.

7.1.4. Intégration et participation aux capitaux des entreprises.

Ici nous tenons compte des liens particuliers entre l'Europe de l'Ouest, les États-Unis et l'Afrique d'une part, les États-Unis et l'Afrique d'autre part.

En effet la participation des groupes français aux capitaux de la CSPT est connu de même que les intérêts US au Togo. D'autre part il existe une intégration verticale des producteurs de concentré américain avec les usines européennes d'engrais. Pour tenir compte de ces considérations on fixe le niveau des échanges Europe de l'Ouest-USA et Afrique de l'Ouest-Europe de l'Ouest. On obtient les résultats donnés au Tableaux IV.5..

Ces résultats représentent assez bien les courants vers l'Europe de l'Ouest comme de l'Est en provenance de l'Afrique et des États-Unis. L'approvisionnement de l'Asie s'écarte quelque peu des valeurs observées; la part du Maroc est sous-estimée tandis que celle des États-Unis est un peu surestimée.

De façon générale ce résultat nous semble représenter assez bien la structure du commerce pour les principaux pays.

7.1.5. Hypothèse sur l'exploitation du W et de la mise en route de l'usine de l'ALG.

Ici nous faisons l'hypothèse que le gisement du Parc W rentre en production de même que l'usine de production d'engrais de l'ALG à Koudougou. Dans le problème global ceci entraine un surplus de l'offre par rapport à la demande, ce qui permet d'évaluer la compétitivité des producteurs de concentré. Une demande artificielle sera créée pour l'excédent, ce qui permet de conserver la structure de modèle de transport. Enfin l'hypothèse se fait à partir du cas 7.1.4. qui s'approche le plus de la situation observée.

Le Tableau IV.6. présente les résultats de cette simulation. Ils sont en général les mêmes que ceux en 7.1.4.. L'ALG qui est le nouveau point de demande est approvisionnée par par le Togo. L'analyse de sensibilité nous montre qu'une baisse minimale des coûts de transfert de $152.47 et $108.90 par tonne de P_2O_5 ($58.83 et $37.03 par tonne de concentré à 34% P_2O_5) sont nécessaires pour que W reprenne l'approvisionnement de Kaduna et de l'ALG respectivement. À l'inverse les hausses minimales pour le concentré du Togo seraient de $73.40 et $32.51 par tonne de P_2O_5 ($26.42 et 11.70 par tonne de concentré à 36% P_2O_5). De plus l'analyse de sensibilité laisse apparaitre que pour le W de telle baisse de coût de transfert ne peuvent être obtenues par une économie d'échelle c'est à dire une augmentation du taux de production ceci même en tenant compte

des erreurs d'estimation. Seule une relocalisation de l'ALG peut à la limite produire un résultat différent. Les résultats du scénario évalué pour l'ALG à Say plutôt qu'à Koudougou sont donnés au Tableau IV.7.. Comme prévu W approvisionne alors l'ALG. L'analyse de sensibilité montre que ceci se fait de façon robuste par rapport au concurrent le plus proche qui est le Togo et pour lequel une baisse des coûts de transfert de $162.91 par tonne de P_2O_5 ($55.38 par tonne de concentré à 34% P_2O_5) est nécessaire pour reprendre le marché.

7.2. Marché des engrais.

Ici il ne s'agit pas de retrouver les flux du commerce d'engrais au niveua régional mais d'analyser le système d'approvisionnement des pays en confrontant leurs sources d'approvisionnement locales aux marché international sur la base des coûts de transfert. On a un modèle de transport où l'offre excédentaire est prise par un point de demande artificielle.

7.2.1. Cas de base.

Comme précédemment le cas de base considère un marché libre des engrais phosphatés où la demande est représentée par les besoins des différents pays, et l'offre, par les capacités de production des usines en plus du marché international. Il s'agit dans ces conditions d'établir

les courants commerciaux optimaux en ne tenant compte que des coûts de production et de transport. Ces coûts sont calculés en considérant les sources d'approvisionnement des usines telles qu'obtenues en 7.1.5.. Nous considérons aussi bien les usines de fabrication des SSP, TSP que celles de production des RP et RPA.

On fait l'hypothèse que le marché international a une capacité d'offre pouvant couvrir les besoin de la région et le produit est de type TSP.

Dans les deux cas nous aboutissons aux résultats suivants (Tableau IV.8.):

Tous les pays s'approvisionnent sur le marché international sauf le Mali qui est alimenté par l'ICS. Les industries locales ont des coûts de production trop élevés par rapport aux producteurs européens en dépit du fait que ceux-ci importent leur concentré. Les baisses minimales de coûts requises pour supporter la compétition varient de \$21.52/t de P_2O_5 pour le Sénégal à plus de \$1000/t pour le W. Les producteurs locaux ne supportent pas la concurrence même sur le lieu de production et encore moins dans les pays voisins.

Parmi les facteurs susceptibles de modifier la compétitivité nous avons:

- l'efficacité relative des engrais,
- l'imposition de quota ou de barrières,
- les économies en devises,
- l'effet d'entraînement de la production des engrais sur les autres secteurs de l'économie,

- la variation des coûts de facteurs de production,
- une économie d'échelle résultant d'une augmentation de la production due à une hausse de la demande.

Une évaluation des économies en devises à créditer aux productions locales pour baisser leurs coûts sort du cadre de ce travail. Il en est de même d'une évaluation des bénéfices que peut engendrer une usine d'engrais sur les autres secteur de l'économie ou sur la création de nouveaux emplois.

L'examen des intervalles de variation possible des demandes nous indique que l'augmentation requise pour changer les résultats est hors des proportions des demandes actuelles.

De même, nous n'envisageons pas une variation majeure des coûts des facteurs de production (énergie, électricité, main-d'oeuvre, etc).

Pour une analyse de sensibilité nous considérons donc les cas suivants à partir du cas de base ii):

i) variation de l'efficacité relative entre les différents types d'engrais,

ii) imposition des quotas d'importation par les pays pour protéger les productions locales.

Ces éventualités seront considérées à partir du cas de base incluant les engrais de type TSP, SSP, et les engrais de type RP et PPA.

7.2.2. Variation de l'efficacité relative des différents types d'engrais.

Le Tableau 4.5. nous donnait l'efficacité relative des engrais d'application directe par rapport au SSP. Pour évaluer l'importance de ces paramètres, nous considérons une augmentation de 10% de ces valeurs. Nous modifions les coûts de transfert par tonne de P_2O_5 en conséquent. Les résultats sont donnés au Tableau IV.9.

L'augmentation de l'efficacité de 10% ne modifie pas les résultats précédents. Ceci veut dire que la baisse de coût par tonne de P_2O_5 qui en résulte n'est pas assez importante pour rendre les engrais d'application directe plus attrayants.

7.2.3. Marché internatinal en SSP.

Le standard sur la marché international d'engrais phosphatés est le TSP. Nous faisons ici l'hypothèse que ce marché fournit plutôt du SSP. Ceci se traduit par un coût de transport plus élevé par tonne de P_2O_5. On néglige la différence de solubilité entre les deux produits et l'apport en soufre du SSP.

Cette hypothèse modifie considérablement les résultats comme le montre le Tableau IV.10.. L'ICS approvisionne tous les pays sauf le Togo, le Ghana et le Burkina Faso. La SIVENG écoule sa production en Côte d'Ivoire et au Burkina Faso. Le Ghana et le Togo s'approvisionnent sur le

marché international. Toute la production du PR du Mali entre dans la consommation nationale et l'écart par rapport à la demande totale du pays est comblé par l'ICS.

En résumé les producteurs africains sont plus compétitifs dans un marché international de SSP où les coûts de transport deviennent plus uniformes. Dans un tel cas même les RP peuvent avoir un intérêt local. Ce résultat met en évidence l'importance de la valeur ajoutée dans les échanges internationaux. Il peut suggérer une orientation de la production vers des produits plus raffinés (ici le TSP), ce que fait déjà l'Europe. Mais il faut tenir compte du problème de la maitrise technologique.

7.3.4. Imposition de quotas d'importation.

Ici nous faisons l'hypothèse que l'offre international ne doit pas fournir plus d'une certaine proportion du marché total de l'Afrique de l'Ouest. Les proportions considérées sont 75%, 50% et 25%.

En limitant la part du marché international à 75% (Tableau IV.11.), la position de l'ICS se trouve renforcée. Elle alimente le Sénégal, la Côte d'Ivoire, le Mali, la Guinée et le Niger à 100%, ainsi que le Nigeria à 8%. Le reste provient du marché international.

A 50% on a les mêmes résultats avec une augmentation de la proportion du marché du Nigeria prise par l'ICS (Tableau IV.12.).

A 25% les résultats sont encore identiques (Tableau IV.13.).

Dans les trois cas l'effet d'imposer les quotas se traduit par une redistribution de la part du marché entre l'ICS et l'offre internationale. Les autres producteurs restent toujours handicapés par des coûts de production élevés, par l'enclavement et la libre concurrence.

7.3. Conclusion.

De façon générale on rapelera les résultats suivants:

Le modèle de transport avec quelques contraintes supplémentaires pour tenir compte des structures des capitaux et de liens commerciaux reproduit assez bien les courants d'échange de l'industrie.

Le Maroc, à cause de sa position géographique et du volume de sa production, domine le marché international de concentré.

Les producteurs sénégalais et togolais s'orienteraient plus vers l'Amérique latine à moins d'établir des liens commerciaux à caractère particulier avec l'Europe.

Les exportations des États-Unis alimentent l'Europe et l'Asie.

La situation difficile de l'exploitation hypothétique du W confirme le handicap qu'ont les gisements loin des côtes et loin d'un marché potentiel.

Pour la production et le commerce d'engrais phosphatés, l'offre internationale à cause des prix bas rend la plupart des producteurs africains non compétitifs même sur le marché national.

La nature de cette offre (TSP ou SSP) introduit une variation majeure dans les coûts globaux de transfert, ce qui rend certains producteurs africains compétitifs.

L'analyse de sensibilité pour le prix du TSP sur le marché international et les coûts de production locaux montrent que seule la production d'engrais hautement raffinés ou une imposition de quotas d'importation peut changer les parts du marché. Dans ce cas les productions sénégalaises de l'ICS domineraient le marché Ouest-africain et l'option TSP poserait le problème du maintient d'installation à technologie avancée.

Les productions de PPA et PR ont des coûts très élevés à cause du transport et restent peu compétitives même en considérant des efficacités élevées.

CONCLUSION

Ce travail constitue une approche d'ensemble à l'industrie des phosphates et des engrais avec un accent particulier porté sur l'Afrique de l'Ouest.

Nous avons d'abord donné un aperçu des potentialités géologiques et minières de la région. À ce sujet les réserves sont abondantes et ceci a donné naissance à une industrie minière qui participe au marché mondial à côté d'autres grands producteurs en dehors de la région comme le Maroc et les États-Unis. Pour d'autres gisements la position géographique surtout, n'a pas permis une mise en valeur à une échelle industrielle. Des petites carrières sont opérées pour satisfaire le besoin local en engrais phosphatés.

En ce qui concerne les engrais eux-mêmes, des petites unités de production existent dans certains pays (Nigeria, Sénégal, Côte d'Ivoire) en plus de production de la roche pour application directe (Burkina Faso, Mali) mais les facteurs limitatifs les plus importants sont la faiblesse de la demande au niveau local et le coût de transport. Le volume total de la demande en P_2O_5 est de 156193 t en 1986/1987 pour les dix pays considérés dans l'étude avec 70% consommés au Nigeria et 7% en Côte d'Ivoire qui sont respectivement le 1er et le 2ème consommateur. Ceci dénote une grande disparité entre les pays.

Pour étudier quantitativement le marché nous l'avons modelisé à l'aide de la programmation linéaire, sous forme de modèle de transport. Nous avons

considéré le marché du concentré d'abord, celui des engrais ensuite. L'objectif était double. Le modèle du marché de concentré visait à montrer comment un simple modèle de transport basé sur les coûts globaux de transfert (production plus transport) permet de retrouver les principaux courants d'échange existants dans un cadre géographique donné. Il visait aussi, par un jeu de scénarios, à évaluer la position compétitive des exploitations par rapport aux points de la demande. L'exercice a donné les résultats suivants:

Le modèle fait ressortir les avantages que possèdent certains producteurs à cause de leur situation géographique. La position du Maroc comme 1er fournisseur de l'Europe en concentré par exemple est confirmée. Mais d'autres considérations sont nécessaires pour expliquer tous les courants d'échange commerciaux. En ajoutant des contraintes pour tenir compte de la participation de certains pays dans les capitaux des entreprises d'autres, ou des liens politiques particuliers par exemple, on reproduit assez bien les flux observés.

Pour la zone Afrique de l'Ouest, les considérations susmentionnées avec l'Europe de l'Ouest sont apparues, autrement le Sénégal et le Togo exporteraient le gros de leurs productions vers l'Amérique latine et l'Asie.

À l'intérieur de la région elle-même, le Togo semble bien placé pour approvisionner le marché du Nigeria, de la Côte d'Ivoire et même l'usine hypothétique de l'ALG. Ceci au détriment du Sénégal et d'une exploitation hypothétique du W. Cette dernière, à cause des coûts élevés de production

et de transport, ne peut être envisagée dans le contexte actuel du marché.

Le modèle pour les engrais met en rapport les usines de productions régionales au fournisseur du marché international sur la base des coûts de production et de transport de la tonne de P_2O_5. L'objectif est de satisfaire les besoins des pays aux couts minimums.

Les unités régionales semblent souffrir de coûts élevés qui les mettent dans une situation peu avantageuse même pour l'approvisionnement des marchés locaux. Tout changement de leur situation compétitive passe par un contrôle plus serré des coûts de production et un relèvement du niveau de la demande.

Pour être complets, tous ces résultats doivent être placés dans le contexte économique global de la région. L'analyse de la position compétitive des usines d'engrais en particulier doit inclure l'effet sur les balances-devises des pays, l'analyse coûts-avantages par rapport aux autres secteurs de l'économie et une étude sur le choix de la technologie appropriée de fabrication d'engrais. Ceci devrait être l'objet des travaux subséquents.

Finalement la programmation linéaire nous semble être un outils de première main simple et efficace pour l'analyse de marché et l'étude de scénarios malgré les limitations suivantes:

- le nombre de solutions possibles non nulles qu'on peut obtenir est limité au nombre de sommets du polygone des contraintes; il est toujours inférieur au nombre de case de la matrice origines-destinations, donc du

nombre de solutions possibles dans la pratique; ce phénomène exclut certaines solutions intermédiaires;

– l'ajout des contraintes pour tenir compte de situations particulières exige un jugement personnel, ce qui nous rapproche des modèles économétriques complexes.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

1. ALLGOOD J.H.. "Fertilizer Situation - Africa 1987", IFDC Pub. Muscle Shoals Al., Sept. 1987.

2. Anonyme, "Bureau of Mines Cost Estimation System Handbook 1) Surface and Underground Mining", Bureau of Mines Information Circular IC 9142, 1987.

3. Anonyme, "Bureau of Mines Cost Estimation System Handbook 2) Mineral Processing", Bureau of Mines Information Circular IC 9142, 1987.

4. Anonyme, "Commodity Trade and Price Trends", World Bank, JHU Press, Baltimore, Feb. 1986.

5. Anonyme, "Economic Evaluation of Fertilizer Supply Strategies for the ASEAN Region: LP approach", IFDC Technical Bulletin T-21, IFDC Pub., Muscle Shoals Al., Oct. 1981.

6. Anonyme, "Estimation of cost of road transportation in Upper Volta", IFDC Pub., Muscle Schoals, Al., 1984.

7. Anonyme, "Etude Rétrospective de l'offre et de la Demande d'Engrais au Niger", Direction des Etudes, de la Programmation et des Statistiques Agricoles, Ministère de l'Agriculture, Rapport interne, Niamey, Niger Sept. 1986.

8. Anonyme, "FAO Report, Nitrogenous, Phosphate and Potash Fertilizers Production - Import - Export - Consumption", FAO Pub. Rome 1984 - 1986.

9. Anonyme, "FAO Fertilizer Yearbook", 1980-1987, FAO Publications Rome.

10. Anonyme, "Fertiilizer Transportation Optimization Study, Nigeria", IFDC/RPT, IFDC Internal Report, Muscle Shoals Al., March 1985.

11. Anonyme, "Fertilizer Manual", IFDC/ONUDI, IFDC Pub. Muscle Schoals, Al., 1979.

12. Anonyme, Industrial Minerals, Janv.1987 - Juil. 1988.

13. Anonyme, "International Strategic Minerals Inventory - Summary Report - Phosphate", US Geological Survey Circular 930-C, 1984.

14. Anonyme, "La Publication d'une thèse de doctorat, d'un mémoire de maîtrise, ou d'un rapport de projet de maîtrise, normes et procédures", 2ème Ed., Service des Etudes Supérieures, Ecole Polytechnique de Montréal, Montréal Août 1986.

15. Anonyme, "La formation de l'Aschia Tinamou", Mémoire du BRGM No 47, 1966 p.168, 171, 531.

16. Anonyme, "Mineral Indutrie Survey", US Departement of the Interior, Bureau of Mines, Mars 1888 - Avril 1989.

17. Anonyme, "Mineral Facts and Problems", USBM Ed. 1985.

18. Anonyme, "Nigeria Fertilizer Sector: Present Situation and Future Prospects", IFDC Technical Bulletin T-18, IFDC Pub. Muscle Shoals Al., June 1981.

19. Anonyme, "Phosphate Rock, Bureau of Mines Mineral Yearbook", US Departement of the Interior, 1986.

20. Anonyme, "Phosphate Availability and Supply, a Mineral Availability Appraisal", Bureau of Mines Information Circular IC 9187, 1988.

21. Anonyme, "Phosphate Rock Statistcis 1986", Comité de Matières lères, Groupe de Travail "Phosphate brute et Acide phosphorique", IFA Pub., Paris Mai 1987.

22. Anonyme, "Prefeasibility Study for a Partially Acidulated Phosphate Rock Plant in Niger", IFDC Study, Muscle Shoals Al., 1984.

23. Anonyme, "Projet Régional d'Industrie d'Engrais Phosphatés pour les Pays Membre de l'ALG, Rapport Définitif Phase I", Rapport interne, SOFRECO Paris 1987.

24. Anonyme, "Projet des Phosphates de Tahoua Niger, Rapport sur la Phase I", Rapport Interne, Watts-Griffis and McOuat Ltd, Toronto 1971.

25. Anonyme, "Sénégal Phosphate Industry at the Crossroads", in Phosphorus and Potassium, No 142, p.28-30, Mars/Avril 1986.

26. Anonyme, "Sénégal: ICS on Stream", Sulfur, No 172, May-June 1984.

27. Anonyme, "The Taiba Phosphate Rock Mine", Phosphorus and Potassium, No 49, Sept/Oct 1970.

28. Anonyme, "The World Market for Iron Ore", United Nations' Economic Commisison for Europe, New York 1968.

29. Anonyme, "The Europa Yearbook 1988 , a World Survey", Vol II, Europa Publications Ltd, Londres 1988.

30. Anonyme, "West Africa Fertilizer Study", Vol I- Vol V, IFDC Pub. Muscle Shoals, Al., 1987.

31. BATIONO A., CHIEN S.H., MOKWUNYÉ A.U., "Chemical Characteristics and Agronomic Values of some Phosphate Rocks in West Africa", International Symposium on Drought in Sub-Saharan Africa, Naïrobi, 1986, Unpublished.

32. BATIONO A., CHIEN S.H., MOKWUNYÉ A.U., HENAO .J., CHRISTIANSON C.B., "Agronomic Evaluation of Two Unacidulated and Partially Acidulated Phosphate Rocks Indegeneous to Niger", IFDC West-Africa, IFDC Pub. Muscle Shoals Al., 1988, Unpublished.

33. BEENHAKER H.L., BRUZELINO N., "Le Transport et la Commercialisation des Produits Agricoles en Côte d'Ivoire", Département de Transport, Abidjan, Mars 1984, Rapport Interne.

34. BORQUEZ G.V., "Estimating Drilling and Blasting Cost - an Analysis and Prediction Model", Engineering and Mining Journal, Jan. 1981.

35. BOUJO A., OULD JIDDOU E.H., "Une Découverte Récente de Phosphate: les Gisements de Bofal et Loubboira (Mauritanie méridionale, Région du Fleuve Sénégal)", Chron. Rech. Min. No 472, p.37-50, 1983.

36. BOUJO M., PRIOUX M., "Compagnie Sénégalaise des Phosphates de Taïba", Industrie Minérale, Mars 1983, p.117-137.

37. BRADLEY S.P., HAX A.C., MAGNANTI T.L., "Applied Mathematical Programming", Arnoldo-Wesley Pub. Co., Reading Mass., 1977.

38. CHAROY J., "Utilisation des phosphates Naturels au Niger", L'Agronomie Tropical, No 3, Juillet-Septembre 1980, p.249-254.

39. CHOKS A.M, MEERAUS A., STOUTJESDIJK A.J., "The Planning of Investment Programm in the Fertilizer Industry", World Bank Press Publications, Baltimore, 1980.

40. CLAYTON W.E., "Special Programm on Fertilizer Distribution and Handling for Government of Nigeria", IFDC Internal Report, Muscle Shoals Al., Oct./Nov. 1988.

41. ELBROND J., PICHÉ A., "A Model of the World Market for Iron Ore", Metal Bulletin, Iron Ore Symposium, Athens, Mars 1983.

42. FANTEL R.J., ANSTETT T.F., PETERSON G.R., PORTER K.E., SULLIVAN D.E., "Phosphate Rock Availability - World, a Mineral Availability Programm Apraisal", Bureau of Mines Information Circular IC 8989, 1984.

43. FILION M, MAHAMADOU S., "Potentiels Miniers des Phosphates de la Tapoa, République du Niger", Niamey Sept. 1980, Rapport Interne.

44. FOURIE J.H., "Plant Practice in the Flottation of Phosphate", Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy, p.101-107, April 1986.

45. FREDERICK E.D., ROTH E.N., "Sulfuric Acid-Based Partially Acidulated Phosphate Rock, Its Production, Cost and Use", IFDC Pub. Muscle Shoals Al., 1986.

46. GENTRY D.W., O'NEIL T.J., "Mine Investment Analysis", SME-AIME Ed. New York, 1984.

47. GOULG J.F., EPPEN G.D., SCHMIDT C.P., "Introductory Management Science", 2nd Ed. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs NJ, 1987.

48. HAMMOND L.L., CHIEN S.H., ROY A.H., MOKWUNYÉ A.U., "Solubility and Effectiveness of Partially Acidulated Phosphate Rock as Influenced by their Iron and Alluminium Oxyde Content", IFDC Study, Muscle Shoals Al., 1987.

49. HAMMOND L.L., CHIEN S.H., MOKWUNYÉ A.U., "Agronomic Values of Unacidulated and Partially Acidulated Phosphate Rocks Indigeous to the Tropics", IFDC Study, Muscle Shoals Al., 1986.

50. HIGNET T.P., DOLL E.E., LIVINGSTON O.W., RAISTRICK B., "Utilisation of difficult Phosphate Ores", ISMA, p.273-288.

51. KEITH B.W., "Mineral Economics, its Definition and Application", Bulletin Mr 127, Mineral Ressources Branch, Departement of Energy, Mines and Ressources Pub., Ottawa, 1972.

52. KILINGMAN D., MOTE J., PHILLIPS N.V., "A logistic Planning System at W.R. Grace", CCDA, University of Texas, Austin, 1988, Unpublished.

53. LABYS W.C., "Quantitative Models of Commodity Market", Ballinger Publishing Company, Cambridge Mass. 1975.

54. LIVINGSTON O.W., "Technology of Production of Phosphate Rock Fertilizers", Phosphorus and Potassium in the Tropics, The Malaysian Society of Soil Sciences, Kuala Lumpur, 1982.

55. LUENDBERGER D.G., "Linear and Nonlinear programming", 2nd Ed., Addison-Weslley Pub. Co., Reading Mass., 1984.

56. MAÏ OUSMANE E.H., "Contribution du Niger au le Séminaire sur les engrais Minéraux en Afrique de l'Ouest", Rapport Interne, MME/DRGM Niger, 1988.

57. MARGUERON C., "A Quatitative Analysis of the Supply-Demand Pattern in Iron Ore: the Future Possibilities of Brazil", Ph.D. Thesis, Colombia University, New York, 1969.

58. MAX R., "La Mise en Valeur des Phosphates du Togo", Annales des Mines No3, 1965.

59. McCLELLAN G.H., "Benefication of Phosphate Rock", UNESCO Phosphorite Geology Workshop Course, May 1982, Macquarie University, North Ryde, Australia.

60. McCLELLAN G.H., CLAYTON W.R., "Francolite: The Commercial Phosphate Mineral", IFDC Pub. Muscle Shoals Al.,1980.

61. McCLELLAN G.H., NOTHOLT A.J.G., "Phosphate Deposits of Sub-Saharan Africa", in "Management of Nitrogene and Phosphorus Fertilizers in Sub-Saharan Africa", Martinus Nijhoff Ed., 1986.

62. McCLELLAN G., COOPER M., LAWENDY T., ANAZIA I., "Some Characterization and Benefication Data on Phosphorites from Parc-W Niger", Sci. Géol., Mém., 77, p.135-141, Strasbourg 1985.

63. McCLELLAN G.H., SAAVEDRA F.N.. "Chemical and Mineral Characteristics of some Cambrian and Precambrian Phosphorites", IFDC Pub. Muscle Shoals Al., 1975.

64. McINTIRE J., "Constraint to Fertilizer Use in Sub-Saharan Africa" in "Management of Nitrogene and Phosphorus Fertilizers in Sub-Saharan Africa", Martinus Nijhoff Ed., 1986.

65. MEW M.C. Editor, "World Survey of Phosphate Deposits",4th Ed., The British Sulfur Corporation Ltd Ed., London 1981.

66. MORAITIS A.C.A., "The Phosphate Industrie of Togo", Fertilizer Market Bulletin, Vol.4, Nov. 1987.

67. MUDAHAR M.S., "Fertilizer Problems and Policies in Sub-Saharan Africa" in "Management of Nitrogene and Phosphorus Fertilizers in Sub-Saharan Africa", Martinus Nijhoff Ed., 1986.

68. O'HARA T.A., "Quick Guides to the Evaluation of Orebodies", C.I.M. Bulletin, Fev. 1980, p.99-202.

69. OPIRCHAL M.A., WANG K-L., "Economic Significance of Florida Phosphate Industrie, an Input - Output analysis", USBM IC8850.

70. PASCAL M.. "Nouvelles Découvertes de Minéralisations Phosphatées au Sénégal: les Gisements de Phosphates de N'Diendouri-Ouali Diala (Département de Matam, Région du Fleuve)", Chron. Rech. Min. No 486, p.3-23, 1987.

71. PICHE A., "Modèle du Marché Mondial du Minerai de Fer", These de Doctorat, Ecole Polytechnique de Montréal, Montréal Dec.1983.

72. PRIAN J.P., GAMA P., "Le Gisement de Phosphate éocène de Farim-Salinquinhé (République de Guinée Bissau)", Chron. Rech. Min. No 486, p.25-53, 1987.

73. ROWTSOTHAM P., "Ocean Shipping of Iron Ore", Metal Bulletin, 4th Int. Ore Symposium, Rome March 1985.

74. RUDAWSKY O., "Mineral Economics, Developpment and Management of Natural Ressources", Ed. Elsever New York, 1986.

75. SCHULTZ J.J., NAM LE., "Phosphate Fertilizer Production and Cost Optimization", Fertilizer Association Seminar of India, Dec. 1986, Unpublished.

76. SHELDON L.V., NAM LE. "Sénégal Fertilizer Study", USAID Sept. 1982, Unpublished.

77. SHIELDS J.D., "A Network Flow Model of Short Term Domestic Phosphate Supply", M.S. Thesis, Colorado School of Mines, Golden, 1984.

78. SHIELDS D.J., GLOVER R., GLOVER F., "A Generalized Network with Material Routing for Mineral Supply Analysis", Draft, Golden Col. 1987.

79. STOWASSER W.F., "Jordan Phosphate Mines", USBM Pub.1987.

80. STOWASSER W.F., "Phosphate Rock: World Ressources, Supply and Demand", USBM Pub. 1985.

81. STOWASSER W. F., "The Phosphate Industrie in the Kingdom of Morocco", USBM Pub., Nov. 1985.

82. STOWASSER W.F., FANTEL R.J., G.R. PETERSON., "The Worldwide Availability of Phosphate Rock", Natural Ressources Forum, UN, New York 1985.

83. STOWASSER W.F., FANTEL R.J., "The Outlook for the US Phosphate Industrie and its Place in the World", SME - AIME Annual Meeting, New York, Feb. 1985.

84. VAN KAUWENBERG S.J., McCLELLAN G.H., "Variation in the Mineralogy of the Florida Phosphate Districts", Geological Society of America Meeting, Oct. 1985.

85. VOLKEMA R.J., "Problem Statement in Managerial Problem Solving", TIM/ORSA Meeting, Washington DC, Avril 1988, Unpublished.

86. WRIGHT J.B., HASTINGS D.A., JONES W.B., WILLIAMS H.R., "Geologie and Mineral Ressources of West Africa", Georges Allen & Unwin Ed., Londres, 1984.

ANNEXE1

Critères de classification des réserves dans l'industrie américaine des phosphates.

a. Gisement dans le Sud-Est (Floride, Caroline du Sud)

1) Réserves > 5 Mt comprises dans un rayon maximal de 2.4 km à partir du centre du gisement.

2) Les réserves doivent être supérieures à 10 Mt si l'épaisseur du mort-terrrain est supérieure à 6 m dans un rayon de 3.2 km maximum.

3) La limite minimale des réserves et maximale du rayon sont 15 Mt et 4 km respectivement si le mort terrain a plus de 9 m d'épaisseur.

4) La teneur du concentré prévue doit être supérieure à 27.5% P_2O_5.

5) L'alimentation de la flottation doit avoir une teneur supérieure à 4.6% P_2O_5.

6) Le taux de concentration doit être au moins égal à 8.

7) L'épaisseur de la minéralisation doit au moins être égale à 1.5 m.

8) Le concentré doit contenir moins de 1.5% de MgO.

b. Gisement de l'Ouest (Utah, Wyoming).

1) Le gisement doit être altéré ou oxydé avec une teneur supérieure à 18% P_2O_5.

2) Le rapport $CaO:P_2O_5$ doit être inférieur à 1.5.

3) La teneur en (Fe_2O_3 + Al_2O_3) doit être inférieure à 3%.

4) L'épaisseur de la minéralisation doit être supérieure à 1.5 m.

5) Le taux de découverture doit être inférieur à 1.5.

6) Les réserves doivent être supérieures à 18 Mt en équivalent concentré.

ANNEXE II

GISEMENT DE TAHOUA: ÉVALUATION

CECI EST UN ESTIMÉ DES COUTS D'OPÉRATION ET DE L'INVESTISSEMENT POUR L'USINE DE PRODUCTION DE PR COMPACTÉ A TAHOUA AU NIGER. LA CAPACITÉ DE PRODUCTION EST DE 60 T/J. LES VALEURS SONT EXPRIMÉES EN $US 1987 (1$US = 320 FCFA).

PRÉVISION DU PERSONNEL ET DES SALAIRES ANNUELS

Classification	Salaire ($/an)	Mine	Usine	Total	$/an
		(Nombre de personnel)			
A. OPÉRATIONS					
Surintendant	15,000		1	1	15,000
Contremaitre	10,000	1	2	3	30,000
Chef de poste	5,000	2	4	6	30,000
Opérateurs	3,000	10	10	20	60,000
Aide opérateurs	1,000	4	6	10	10,000
Sous-total		17	23	40	145,000

B. MAINTENANCE

Surintendant	15,000			1	15,000
Contremaître	10,000		1	1	10,000
Mécaniciens	3,000	3	3	6	18,000
Magasiniers	1,000	2	2	4	4,000
Aides	1,000	2	4	6	6,000
Sous-total		7	10	17	53,000

C. ADMINISTRATION: 100% (A+B) 198,000

TOTAL 396,000

ESTIMATION DE L'INVESTISSEMENT ADDITIONNEL- MINE (*1000$)

A. ÉQUIPPEMENTS

Bulldozers(D6-H)	205
Chargeuses(CAT950E)	157
CAMION (D25C,25t)	237
Nivelleuse 12G	207
Sous-total	806

B. AUTRES

Pièces de rechange(5% A)	40
Contingence (10% A+B)	85
TOTAL	931

ESTIMÉ DE L'INVESTISSEMENT REQUIS (*1000$)

Modification de l'unité de broyage	150
Unité de compactage granulation	520
Entreposage et manutention	100
Services généraux	350
TOTAL	1120

INVESTISSEMENT TOTAL (*$1000)

Investissement additionnel	2051
Estimé de l'investissement existant	500
Sous-total	2551
Fonds de roulement	225
TOTAL	2775

LES COUTS D'OPERATIONS

A. LES COUTS VARIABLES

1.Production de minerai

Equippement	Consom.	% Autres cons.	Production h/j	Coût/t. $/t
Bulldozer l/h	34	10	3	0.70
Chargeuse l/h	38	10	1	0.26
Foreuse+comp. l/h	122	5	0	0.00
Camion l/h	70	8	7	3.31
Minerai	0	15		46.88
				51.15

Coûts fixes

Main-d'oeuvre (1)	5.58
Maintenance (1% du coût des equip.) (2)	0.78
Divers(diesel,déplacements,..0.5% de 1+2)	0.03
Sous-total coûts fixes	6.39
Coût total/tonne de minerai	57.54

2. Coûts variables/tonne de produit

Matière	Consommation	Coût unit.($/t)	Coût/t ($)
EAU-t	0.2	0.55	0.11
MINERAI-t	1	57.54	57.54
ELECTRICITE-KWh	75	0.15	11.25
DIESEL-l	2	0.47	0.94
SAC	20	0.70	14.06
Sous-total			83.90

B. COUTS FIXES

Item	Base de calcul	Coûts(*$1000)	Coût/t ($/t)
Salaire (1)	Tab#1	329	9.97
Maintenace (2)	(4% EQUIP. USINE)	45	1.36
Assurances	1% I	26	0.77
Frais généraux	25%(1+2)	93	2.83
Total coûts fixes		493	14.93
TOTAL COUTS DE PRODUCTION/TONNE			98.83
Dépréciation 6.67% I		170	5.16
TOTAL ($/t)			103.98

FONDS DE ROULEMENT

Item	Niveau d'inventaire (j)	Coûts *$1000
Minerai	45	175
Cash		50
TOTAL		225

COUTS DES FACTEURS

DIESEL (l)	0.47	ANFO (kg)	0.94
EAU (m3)	0.55	MINERAI/J	75
ELECTRICITE (kwh	0.15	STERILE/J	100
SAC	0.70		

ANNEXE III.

ESTIMATION DU COUT DE PRODUCTION DU SUPER SIMPLE: NFSC-KADUNA (NIGERIA). LA CAPACITÉ DE PRODUCTION EST DE 300 t/j DE SSP. L'ESTIMATION EST FAITE POUR LA FIN DE L'ANNÉE 1987 EN $US (1$US = 4.2325 N).

A. INVESTISSEMENT.

Modèle d'estimation du coût d'investissement:

I = 0.9863 X^ 0.5535 M$, X = Capacité en tonnes de SSP/JOUR

Capacité:	300 T/J
I	23.18 M$

B. PRODUCTION

1. Coûts variables

Matière	Consommation/t	Coût unit.($)	Coût/tonne ($) SSP	Coût/tonne ($) P2O5
Concentré	0.66			
Soufre t.	0.12	198.32	24.19	
Electricité kWh	90.00	0.10	9.00	
Eau m3	1.60	0.25	0.40	
Agents chimiques	1.00	5.00	5.00	
Diesel (Equip. mobile)	0.00	150.00	0.30	
Fuel t.	0.01	250.00	1.50	
Main d'oeuvre h-p	0.45	25.00	11.25	
Total coûts variables			51.64	258.22

2. Coûts fixes

Item	Base de calcul	Coût	coût/tonne ($)	
Adm. + Super.	100% de (1)	92812	0.94	
Maintenance	5% de I	1043057	10.54	
Assur.& Taxes	1% de I	208611	2.11	
Total coûts fixes			13.58	67.90
TOTAL COUT DE PRODUCTION (sans la dépréciation)			65.23	326.13
Dépréciation	6.6% de I	1376836	13.91	69.54
TOTAL			79.13	395.66

ANNEXE IV

MATRICE ORIGINES-DESTINATIONS:CONCENTRE: (*1000 t P_2O_5)

Tableau IV.1.: Observations des flux commerciaux (1987).

	ICS Sénégal 252	SIVENG C.Ivo. 10	FSFC Nigeria 20	EUR.OC. (1) 4012	ASIE (2) 1608	EUR.EST (3) 1310	USA (4) 241	AM.SUD (5) 452
TAÏBA 743	252	10		266	175	37		3
THIÈS 51				51				
TOGO 824			20	382	44	162	208	8
MAROC 4236				2486	507	905	33	305
USA 2051				827	882	206		136

(1) Moyenne de Londres, Anvers, Rotterdam et Dunkerque
(2) Inde
(3) Bakar, Yougoslavie
(4) Côte Est
(5) Brésil

ANNEXE IV

MATRICE ORIGINES-DESTINATIONS:CONCENTRE: (*1000 t P_2O_5)

Tableau IV.2.: Flux observés modifiés (1987).

	ICS Sénégal 252	SIVENG C.Ivo. 10	FSFC Nigaria 20	EUR.OC. (1) 4012	ASIE (2) 1564	EUR.EST (3) 1273	USA (4) 208	AM.SUD (5) 441
TAÏBA 703	252	10		266	175			
THIÈS 51				51				
TOGO 772			20	382		162	208	
MAROC 4203				2486	507	905		305
USA 2051				827	882	206		136

(1) Moyenne de Londres, Anvers, Rotterdam et Dunkerque
(2) Inde
(3) Bakar, Yougoslavie
(4) Côte Est
(5) Brésil

ANNEXE IV

MATRICE ORIGINES-DESTINATIONS:CONCENTRE: (*1000 t P_2O_5)

Tableau IV.3.: Cas de base (1987).

	ICS Sénégal 252	SIVENG C.Ivo. 10	FSFC Nigeria 20	EUR.OC. (1) 4012	ASIE (2) 1564	EUR.EST (3) 1273	USA (4) 208	AM.SUD (5) 441
TAÏBA 703	252			294			157	
THIÈS 51							51	
TOGO 772		10	20	301				441
MAROC 4203				2930		1273		
USA 2051				487	1564			

(1) Moyenne de Londres, Anvers, Rotterdam et Dunkerque
(2) Inde
(3) Bakar, Yougoslavie
(4) Côte Est
(5) Brésil

ANNEXE IV

MATRICE ORIGINES-DESTINATIONS:CONCENTRE: (*1000 t P_2O_5)

Tableau IV.4.: Baisse du coût de transfert USA-Europe de l'Ouest (1987)

	ICS Sénégal 252	SIVENG C.Ivo. 10	FSFC Nigeria 20	EUR.OC. (1) 4012	ASIE (2) 1564	EUR.EST (3) 1273	USA (4) 208	AM.SUD (5) 441
TAÏBA 703	252			276			157	
THIÈS 51							51	
TOGO 772		10	20		301			441
MAROC 4203				2930		1273		
USA 2051				788	1263			

(1) Moyenne de Londres, Anvers, Rotterdam et Dunkerque
(2) Inde
(3) Bakar, Yougoslavie
(4) Côte Est
(5) Brésil

ANNEXE IV

MATRICE ORIGINES-DESTINATIONS:CONCENTRE: (*1000 t P_2O_5)

Tableau IV.5.: Liens commerciaux Europe-Afrique-USA (1987).

	ICS Sénégal 252	SIVENG C.Ivo. 10	FSFC Nigeria 20	EUR.OC. (1) 4012	ASIE (2) 1564	EUR.EST (3) 1273	USA (4) 208	AM.SUD (5) 441
TAÏBA 703	252			266	185			
THIÈS 51				51				
TOGO 772		10	20	382		152	208	
MAROC 4203				2486	155	1121		441
USA 2051				827	1224			

(1) Moyenne de Londres, Anvers, Rotterdam et Dunkerque
(2) Inde
(3) Bakar, Yougoslavie
(4) Côte Est
(5) Brésil

ANNEXE IV

MATRICE ORIGINES-DESTINATIONS:CONCENTRE: (*1000 t P_2O_5)

Tableau IV.6.: Hypothèse sur W et ALG (1987).

	ICS Sénégal 252	SIVENG C.Ivo. 10	FSFC Nigeria 20	ALG Burkina 20	EUR.OC (1) 4012	ASIE (2) 1564	EUR.EST (3) 1273	USA (4) 208	AM.SUD (5) 441
TAÏBA 703	252				266	185			
THIÈS 51					51				
TOGO 792		10	20	20	382		152	208	
PARC W 57									
MAROC 4203					2486	155	1121		441
USA 2051					827	1224			

(1) Moyenne de Londres, Anvers, Rotterdam et Dunkerque
(2) Inde
(3) Bakar, Yougoslavie
(4) Côte Est
(5) Brésil

ANNEXE IV

MATRICE ORIGINES-DESTINATIONS:CONCENTRE: (*1000 t P_2O_5)

Tableau IV.7.: Hypothèse sur W et ALG (Relocalisation). (1987)

	ICS Sénégal 252	SIVENG C.Ivo. 10	FSFC Nigeria 20	ALG Burkina 20	EUR.OC (1) 4012	ASIE (2) 1564	EUR.EST (3) 1273	USA (4) 208	AM.SUD (5) 441
TAÏBA 703	252				266	185			
THIÈS 51					51				
TOGO 792		10	20		382		152	208	
PARC W 57				20					
MAROC 4203					2486	155	1121		441
USA 2051					827	1224			

(1) Moyenne de Londres, Anvers, Rotterdam et Dunkerque
(2) Inde
(3) Bakar, Yougoslavie
(4) Côte Est
(5) Brésil

ANNEXE IV

MATRICE ORIGINES - DESTINATIONS: ENGRAIS (t P205)

Tableau IV.8.: Cas de base (1987).

	BÉNIN Parakou 4167	BURKINA Bobo 4541	C.IVOI Bouaké 11363	GHANA Tamalé 5031	GUINÉE Kouroussa 726	MALI Ségou 9594	NIGER Maradi 1041	NIGERIA Kaduna 108900	SÉNÉGAL Kaffrine 7430	TOGO Atakpamé 3400
ICS 129000						9594				
SIVENG 10000										
FSFC 20000										
KODJARI 5610										
INTERNA	4167	4541	11363	5031	726		1041	108900	7430	3400
SAY 5610										
TAHOUA 3960										
BOUREM 10560										

ANNEXE IV

MATRICE ORIGINES - DESTINATIONS: ENGRAIS (t P2O5)

Tableau IV.9. Variation des efficacités relatives des PR et PPA (1987).

	BÉNIN Parakou 4167	BURKINA Bobo 4541	C.IVOI. Bouaké 11363	GHANA Tamalé 5031	GUINÉE Kouroussa 726	MALI Ségou 9594	NIGER Maradi 1041	NIGERIA Kaduna 108900	SÉNÉGAL Kaffrine 7430	TOGO Atakpamé 3400
ICS 129000						9594				
SIVENG 10000										
FSFC 20000										
KODJARI 5610										
INTERNA	4167	5441	11363	5031	726		10441	108900	7430	3400
SAY 5610										
TAHOUA 3960										
BOUREM 10560										

ANNEXE IV

MATRICE ORIGINES - DESTINATIONS: ENGRAIS (t P205)

Tableau IV.10.: **Marché international de SSP (1987).**

	BÉNIN Parakou 4167	BURKINA Bobo 4541	C.IVOI. Bouaké 11363	GHANA Tamalé 5031	GUINÉE Kouroussa 726	MALI Ségou 9594	NIGER Maradi 1041	NIGERIA Kaduna 108900	SÉNÉGAL Kaffrine 7430	TOGO Atakpamé 3400
ICS 129000	4161		6004		726	732	1041	108900	7430	
SIVENG 10000		4541	5359							
FSFC 20000										
KODJARI 5610										
INTERNA				5031						3400
SAY 5610										
TAHOUA 3960										
BOUREM 10560						8862				

ANNEXE IV

MATRICE ORIGINES - DESTINATIONS: ENGRAIS (t P205)

Imposition de quotas d'imporation.

Tableau IV.11. i) 75% (1987).

	BÉNIN Parakou 4167	BURKINA Bobo 4541	C.IVOI. Bouaké 11363	GHANA Tamalé 5031	GUINÉE Kouroussa 726	MALI Ségou 9594	NIGER Maradi 1041	NIGERIA Kaduna 108900	SÉNÉGAL Kaffrine 7430	TOGO Atakpamé 3400
ICS 129000			11363		726	9594	1041	8894	7430	
SIVENG 10000										
FSFC 20000										
KODJARI 5610										
INTERNA	4167	4541		5031				100006		3400
SAY 5610										
TAHOUA 3960										
BOUREM 10560										

ANNEXE IV

MATRICE ORIGINES - DESTINATIONS: ENGRAIS (t P2O5)

Imposition de quotas d'importation

Tableau IV.12. ii) 50% (1987).

	BÉNIN Parakou 4167	BURKINA Bobo 4541	C.IVOI. Bouaké 11363	GHANA Tamalé 5031	GUINEE Kouroussa 726	MALI Ségou 9594	NIGER Maradi 1041	NIGERIA Kaduna 108900	SÉNÉGAL Kaffrine 7430	TOGO Atakpamé 3400
ICS 129000			11363		726	9594	1041	47942	7430	
SIVENG 10000										
FSFC 20000										
KODJARI 5610										
INTERNA	4167	5441		5031				60958		3400
SAY 5610										
TAHOUA 3960										
BOUREM 10560										

ANNEXE IV

MATRICE ORIGINES - DESTINATIONS: ENGRAIS (t P205)

Imposition de quotas d'imporation.

Tableau IV.13.: iii) 25% (1987).

	BÉNIN Parakou 4167	BURKINA Bobo 4541	C.IVOI. Bouaké 11363	GHANA Tamalé 5031	GUINÉE Kouroussa 726	MALI Ségou 9594	NIGER Maradi 1041	NIGERIA Kaduna 108900	SÉNÉGAL Kaffrine 7430	TOGO Atakpamé 3400
ICS 129000			11363		726	9594	1041	86991	7430	
SIVENG 10000										
FSFC 20000										
KODJARI 5610										
INTERNA	4167	5441		5031				21909		3400
SAY 5610										
TAHOUA 3960										
BOUREM 10560										

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
3 9334 00290866 1