



TOGETHER
for a sustainable future

OCCASION

This publication has been made available to the public on the occasion of the 50th anniversary of the United Nations Industrial Development Organisation.



TOGETHER
for a sustainable future

DISCLAIMER

This document has been produced without formal United Nations editing. The designations employed and the presentation of the material in this document do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the Secretariat of the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries, or its economic system or degree of development. Designations such as “developed”, “industrialized” and “developing” are intended for statistical convenience and do not necessarily express a judgment about the stage reached by a particular country or area in the development process. Mention of firm names or commercial products does not constitute an endorsement by UNIDO.

FAIR USE POLICY

Any part of this publication may be quoted and referenced for educational and research purposes without additional permission from UNIDO. However, those who make use of quoting and referencing this publication are requested to follow the Fair Use Policy of giving due credit to UNIDO.

CONTACT

Please contact publications@unido.org for further information concerning UNIDO publications.

For more information about UNIDO, please visit us at www.unido.org



18636-F

Distr. LIMITEE
ID/WG.497/1 (SPEC.)
28 novembre 1989

Organisation des Nations Unies pour le développement industriel

FRANCAIS
Original : FRANCAIS/ANGLAIS

Réunion d'experts sur la transformation
et l'utilisation des phosphates

Dakar (Sénégal), 3-6 janvier 1990

**PRODUCTION D'ENGRAIS A PARTIR
DE PHOSPHATES PAUVRES***

Document établi par

M. Armand L. Davister
Consultant de l'ONU

* Les opinions exprimées dans le présent document sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement celles du Secrétariat de l'ONU. Document n'ayant fait l'objet d'aucune mise au point rédactionnelle.

TABLE DES MATIERES

	Page
INTRODUCTION	
I LA FERTILISATION ET LES MATIERES FERTILISANTES.	3
II INFLUENCE DE L'APPAUVRISSMENT DES PHOSPHATES SUR LES DIVERSES FILIERES DE FABRICATION D'ENGRAIS.	8
ETUDE	15
III GEOLOGIE DES GISEMENTS DE PHOSPHATE.	15
IV ENRICHISSEMENT DES PHOSPHATES PAUVRES.	19
V ENGRAIS NON CONVENTIONNELS AU DEPART DE PHOSPHATES PAUVRES.	37
V-A - Matières pour application directe (sans traitement chimique).	37
V-B - Matières ayant subi une transformation chimique simple.	37
V-C - Matières ayant subi une transformation biochimique.	37
FINALE	61
VI CONCLUSION.	61

INTRODUCTION

L'objectif de ce rapport est d'étudier la production de matières fertilisantes au départ de phosphates naturels à moyenne ou basse concentration. D'où les deux chapitres de ce "préalable".

I I.A FERTILISATION ET LES MATIERES FERTILISANTES. (1)

I.1. Pourquoi fabrique-t-on des engrais phosphatés ?

Les sols naturels sont généralement pauvres en phosphore à cause des exportations par les produits récoltés ; en effet, leur mise en culture interrompt le cycle quasi fermé du phosphore caractéristique des biocénoses naturelles et épuise plus ou moins vite le phosphore accessible : de ce fait, les rendements diminuent et deviennent bientôt insignifiants. Pour éviter cela, il faut au moins restituer le P exporté et même plus, car la fumure phosphatée doit aussi couvrir les pertes résultant de la rétrogradation et du vieillissement des phosphates accessibles du sol. C'est donc cela le rôle des engrais phosphatés : AMENER LE NIVEAU PHOSPHORIQUE DU SOL A UNE VALEUR CONVENABLE ET L'Y MAINTENIR.

I.2. Fertiliser : c'est équilibrer les apports.

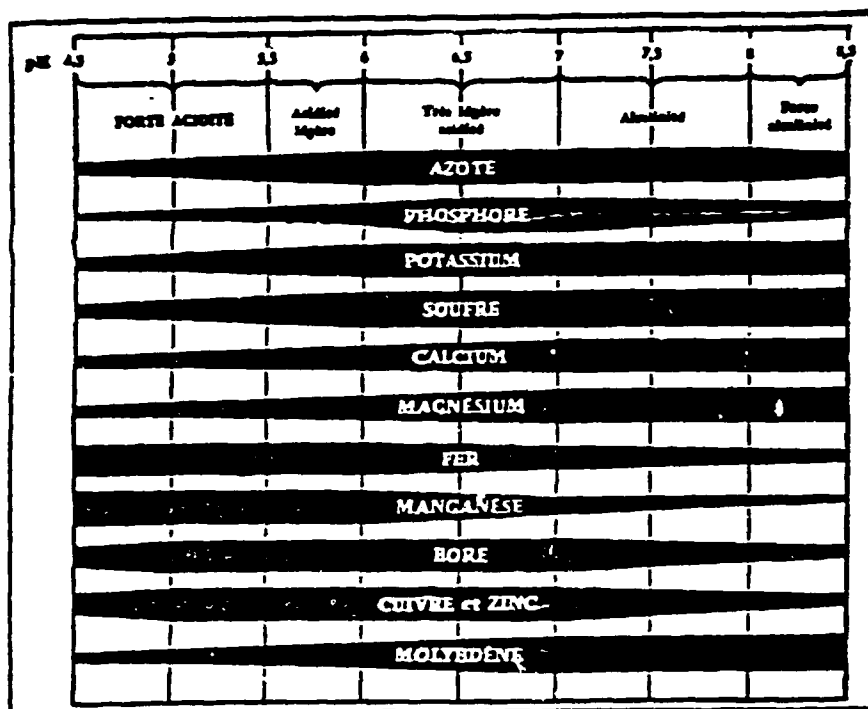
Les notions de bilan, d'exportation, de lessivage et de fixation d'une part, d'apport et de réserves accessibles du sol d'autre part doivent être bien comprises.

(1) Les réflexions qui suivent sont inspirées par la brochure "GUIDE SUR LA FERTILISATION PHOSPHATEE" éditée par l'I.F.A. (International Fertilizer Association) et par des articles de la revue "L'AGRICULTEUR" du 30/10/1988.

I.3. Une légère acidité du sol est préférable à un pH trop élevé.

L'assimilation des principaux éléments nutritifs employés en agriculture est largement fonction du pH des sols considérés

Tableau 1. - Assimilation des éléments nutritifs en fonction du pH des sols (pH exprimé = pH H₂O)



Réf. : D. Soltner. Les bases de la production végétale. Tome 1 : le sol.

N.B. La largeur des bandes noires dans le tableau ci-dessus indique, pour chaque élément nutritif considéré, le pH optimum d' "accessibilité" de cet élément et l'influence qu'il exerce sur la dynamique des nutriments.

I.4. Le Sol : milieu vivant à interactions multiples.

Le sol est un milieu biologique soumis à l'action de nombreux micro-organismes très actifs qui modulent les processus d'humidification, de minéralisation, d'utilisation de l'azote atmosphérique

Ce milieu vivant ne peut être quelconque ; on souhaite qu'il soit :

- bien aéré, modérément humide, bien structuré
- à pH optimal
- bien pourvu en calcium et magnésium.

C'est donc tout le contraire d'un milieu inerte ; il réagit en fonction de ses composantes notamment microbiennes et physico-chimiques.

I.5. Utilité de l'analyse pédologique.

Elle doit fixer l'exploitant quant à la valeur des différents paramètres qui régissent ces équilibres ou qui déterminent le sens de l'évolution : rétrogradation - accessibilité de tel ou tel ion, teneur en Ca, Mg, oligo-éléments.

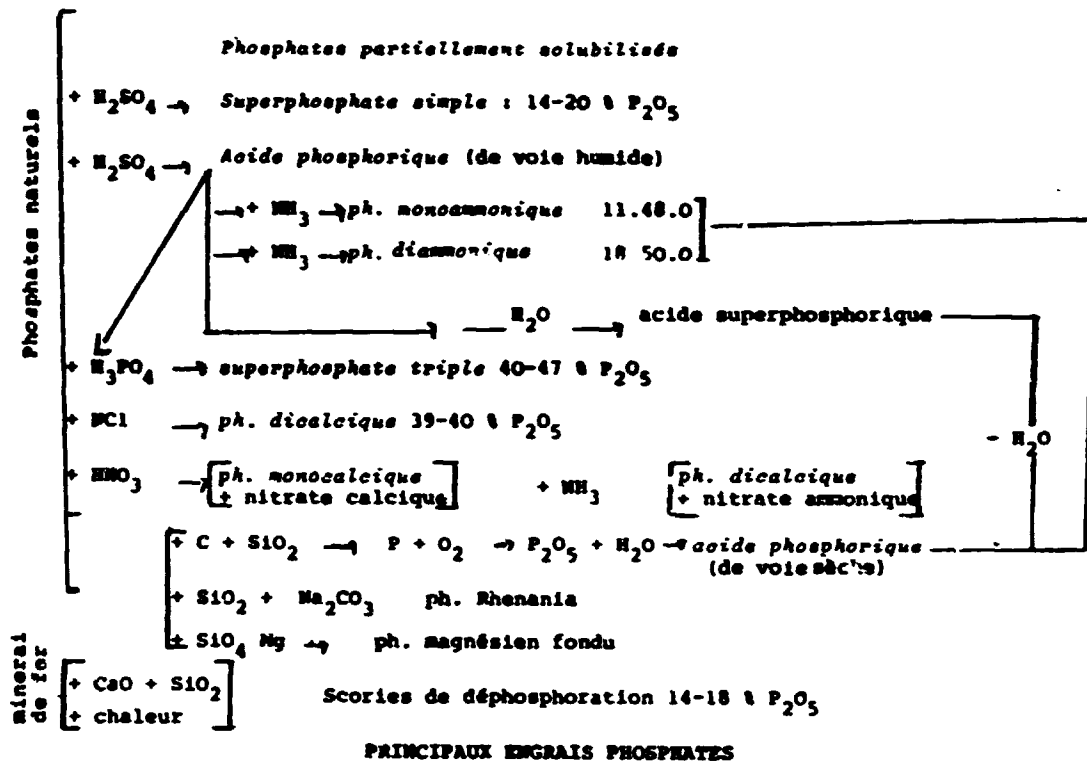
I.6. Quels sont les buts des traitements industriels des phosphates ?

Dans les minerais phosphatés, le phosphore se trouve sous des formes insolubles et inaccessibles à la plante -essentiellement fluorapatite- ; il y est accompagné d'impuretés gênantes parce qu'inutiles, pondéreuses ou indésirables voire toxiques.

Il s'agit donc, dans l'industrie des engrais

- a) de faire passer le phosphore sous une forme accessible à la plante,
- b) d'éliminer les impuretés (avec ou sans récupération).

Le tableau ci-après indique les principales filières de production d'engrais phosphatés.



I.7. Quelle est la solubilité des engrais phosphatés ?

Commercialement, dans la plupart des pays du monde, on classe les engrais phosphatés suivant leur solubilité dans divers réactifs :

I.7.1 - Phosphates solubles dans l'eau :

par exemple l'acide phosphorique, les phosphates mono-calciques, mono et bi-ammoniques.

I.7.2 - Phosphates solubles dans le citrate d'ammonium :

par exemple le phosphate bi-calcique, le phospal (partiellement)

N.B. Il faut cependant faire la distinction entre les citrates alcalins (JOULIE et PETERMAN) et le citrate neutre : ce dernier dissout en plus le phosphate tricalcique de précipitation, présent par exemple dans les superphosphates fortement ammoniés.

I.7.3 - Phosphates insolubles dans les deux précédents réactifs, mais solubles dans les acides plus ou moins forts : par exemple certaines apatites tendres.

Remarque : La solubilité d'un engrais phosphaté ne suffit pas à préjuger de son efficacité, surtout à moyen et long terme : en effet, plus ou moins vite après leur dissolution dans les solutions du sol, les phosphates réagissent avec les composants de celui-ci et ce sont les produits ainsi formés qui assureront l'alimentation de la plante.

I.8. Rôle particulier du phosphore.

L'emploi du Phosphore est délicat en raison des différentes formes sous lesquelles on peut le trouver.

Le tableau ci-dessous tiré des «Annales de Gembloux» explicite les nombreux types d'engrais phosphatés disponibles dans le commerce. La diversité ne devrait guère dérouter l'utilisateur tant il est vrai que le devenir du phosphore dans le sol est quasi le même : il se dissocie en ions phosphoriques.

Tous ces ions phosphoriques seront soumis, dans le sol, aux mêmes interactions et/ou agressions d'origine biologique et ou physico-chimiques.

Tableau 2. - Principaux types d'engrais phosphatés

Type d'engrais	Ti % minimum requis (P ₂ O ₅ %)	Solubilité	Finesse (µ)	Equiv case
Superphosphate simple concentré triple	16 25 38	citrate ammonium neutre dont 5% eau (*)	-	-2 0
Scoons de déphosphoration	10	acide citrique 2%	75% à 360 98% à 630	+40 à +45
Phosphate précipité tricalcique	38	citrate ammonium alcalin (Petermann)	90% à 180 98% à 630	
Phosphate désagrégé	25	citrate ammonium alcalin (Petermann)	75% à 180 96% à 630	
Phosphate aluminocalcique	30 dont 75	acides minéraux citrate ammonium alcalin (Joube)	90% à 180 98% à 630	-6
Phosphate naturel tendre	25 dont 55	acides minéraux acide formique	90% à 63 99% à 125	+26
Phosphate naturel tendre partiellement soluble	20 dont 40	acides minéraux eau	90% à 180 98% à 630	

Extrait : Annales de Gembloux - 3ème trimestre 86 - Tendances actuelles en matière d'amendements et de Fumure de Fond.

Tou: n'est cependant pas «choux verts et verts choux» puisque les différents types d'engrais phosphatés se différencient néanmoins par leur vitesse de dissolution dans le sol.

II INFLUENCE DE L'APPAUVRISSMENT DES PHOSPHATES SUR LES DIVERSES FILIERES DE FABRICATION D'ENGRAIS

II.1. L'appauvrissement des phosphates se traduit généralement par tout ou partie des conséquences suivantes : (1)

- Diminution de la teneur en P_2O_5 du concentré,
- problèmes créés par la présence de quantités accrues d'impuretés cationiques telles que Al, Mg, Fe etc...
- idem avec impuretés anioniques telles que Cl, CO_3 etc...
- l'effet de teneurs croissantes en matières organiques,
- l'obligation éventuelle de faire preuve d'imagination
 - * quant à la qualité des engrais que ces phosphates appauvris permettent de produire.
 - * quant au recours à des procédés non conventionnels pour transformer ces phosphates en produits dont le phosphore est assimilable par les plantes.
 - * quant à la stratégie de production et de distribution adaptée à ces nouveaux produits (phosphates pauvres et engrais dérivés).

II.2. Le tableau repris aux quatre pages suivantes résume les effets de diverses impuretés présentes dans les phosphates sur la production de quelques engrais phosphatés traditionnels.

(1) Ce chapitre s'inspire largement des travaux qui ont été réalisés par un Groupe de Travail du Comité Technique de l'I.F.A.

INFLUENCE OF VARIOUS COMPONENTS TO P₂O₅ RATIOS
IN FERTILIZER INDUSTRY

EFFECT(S) ON SOUGHT PRODUCT(S)	EFFECT(S) ON SOUGHT PRODUCT(S)					
	N-SUPER	TSP	WPA	MAP	DAP	NITRIC PHOSPHATES
① 1. Effect of decreased rock BPL (the per se decrease due to the presence of higher inerts than "normal")	<ol style="list-style-type: none"> 1. decreased TP content of product 2. More power required for grinding/tP₂O₅. 3. Throughput reduction 4. Higher freight/tP₂O₅ in product. 5. Increased rock storage volume 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ditto 2. ditto 3. ditto 4. ditto 5. ditto 11. In slurry process, added erosion 	<ol style="list-style-type: none"> 2. ditto 3. ditto 4. ditto 5. ditto 8. May have slight lowering of recovery. 10. Increased waste disposal requirements. 11. Higher pump & agitator erosion 	<ol style="list-style-type: none"> 6. No quality effect 	<ol style="list-style-type: none"> 6. ditto 7. ditto 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ditto 3. ditto 4. ditto 5. ditto 9. Increased solid/liquid separation problems. 11. ditto 7. Disposal of inerts (or 1)
② 2. Effect of Increase in CaO/P ₂ O ₅ ratio.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Higher acid usage. 2. Decrease in product grade. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ditto 3. Grade may increase 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ditto 4. Increased waste disposal 8. Throughput reduction 9. May lower recovery 			<ol style="list-style-type: none"> 1. ditto 5. Increased utility used. 6. Increased calcium nitrate production. 7. Loss of water solubility and 2 8-9 ditto

	N-SUPER	TSP	WPA	MAP	DAP	NITRIC PHOSPHATES
③ Effect of increase in Fe_2O_3/P_2O_5 ratio	1. dilution 5. Rock may be harder to grind 7. Increased curing time 8. Sticky product	1. dilution 5. ditto 7. ditto 8. ditto	2. Sludge formation 3. Higher viscosity 5. ditto	4. IPA up, APA down	4. ditto 6. N/P_2O_5 ratio decreases	1. ditto 3. ditto 9. Loss of water solubility
④ Effect of increase in Al_2O_3/P_2O_5 ratio	1. Sticky product 2. Grade reduction 12. Increased curing time	1. ditto 2. ditto 3. Loss of conversion 12. ditto	5. Higher viscosity 6. Changes in gypsum size and shape. 7. Reduces F evolution 8. Alters filter rate 9. Precludes making feed grade phosphates.	10. IPA up, APA down 2. ditto	10. ditto 11. N/P_2O_5 ratio decreases 2. ditto	2. ditto 4. Loss of water solubility 5. ditto
⑤ Effect of increase in H_2O/P_2O_5 ratio.	1. Increased reactivity 2. Decreased grade 4. Physical condition and cure rate.	1. ditto 3. Grade may increase. 5. Foam(?) in slurry process	6. May require more foam control. 7. Higher viscosity	2. ditto 8. ditto	2. ditto 8. ditto 9. Decreased N/P ratio	2. ditto 7. ditto 8. Loss of water solubility

	N-SUPER	TSP	NPA	MAP	DA	NITRIC PHOSPHATES
5. Effect of Increase in reactive silica/P ₂ O ₅ ratio ⁶	<ol style="list-style-type: none"> 1. Increased F evolution 2. Physical condition may improve 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ditto 2. ditto 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ditto 3. Effects gypsum characteristics. 4. May decrease filter scaling. 5. Changes solution viscosity. 6. Sludge formation may decrease. 8. May decrease corrosion. 	7. Slight grade improvement	7. ditto	<ol style="list-style-type: none"> 1. ditto (mixed acid system) 5. ditto
Effect of Increase in Na ₂ O/P ₂ O ₅ ratio. ⁷	<ol style="list-style-type: none"> 1. Reduced F release 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ditto 	<ol style="list-style-type: none"> 2. More filter scale. 3. Reduction in F release 4. Increased talstonite type sludges 6. May decrease corrosion. 	5. Diluent	5. ditto	5. ditto
Effect of Increase in K ₂ O/P ₂ O ₅ ratio. ⁸	<ol style="list-style-type: none"> 1. Reduced F release 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ditto 	<ol style="list-style-type: none"> 2. More filter scale. 3. Reduction in F release 4. Increased taranakite type sludges 6. Decreases corrosion 	5. Diluent	5. ditto	5. ditto (for NP grades)

	N-SUPER	TSP	NPA	MAP	DAP	NITRIC PHOSPHATES
9. Effect of increase in inorganic CO_2/P_2O_5 ratio.	1. Increased reactivity 2. May decrease throughput	1. ditto 2. ditto 3. ditto (in slurry process)	2. ditto 3. Foam control may be required			2. ditto 3. ditto
10. Effect of increase of organic C/P_2O_5 ratio.	1. Reactivity may be lowered	1. ditto 2. Foam control may be required	2. ditto 3. Throughput may decrease	2. ditto	2. ditto	2. ditto 3. ditto 4. NO_x release 5. Increased tendency to self-sustaining decomposition
11. Sulphides	1. Risk of H_2S evolution	1. ditto 3. ditto (for slurry process)	1. ditto 3. Corrosion rate may increase			1. ditto 2. NO_x release
12. Chloride		1. ditto (slurry process)	1. Corrosion rate increased			1. ditto 2. Safety problems during evaporation

Note : Radio-activity and elements such as Pb, Hg, Cd, As under consideration by environmentalists do not appear to have any adverse effects on fertiliser manufacture.

II.3. Les éléments minéraux indispensables à la plante.

On a coutume de les répartir en

a) Eléments plastiques ou macro-éléments

C	40 à 50 %	}	Somme \approx 95 % de la matière sèche. Ils sont fournis par l'air et l'eau.
O	42 à 44 %		
H	6 à 7 %		

N : 1 à 3 % ; P : 0,05 à 1 % ; K : 0,3 à 3 % : éléments fertilisants majeurs.

Ca : 0,5 à 3,5 % ; S : 0,1 à 0,5 % ; Mg : 0,03 à 0,8 % : éléments fertilisants secondaires.

Na : 0,01 à 3,5 % ; Si : 0,005 à 1,35 % ; Cl : 0,15 à 0,25 %.

A noter encore que

N, P et S ont un rôle plastique car ils sont les constituants de base des protéines et autres substances fondamentales des tissus végétaux.

K, Ca et Mg ont un rôle essentiel dans le transport et la synthèse de substances diverses et maintiennent l'équilibre cations - anions à l'intérieur de la plante.

b) Oligo-éléments ne représentant qu'une partie insignifiante du poids de la plante - environ 1 % - mais qui sont néanmoins indispensables à la plante ou aux animaux :

Fe, Mn, Cu, Zn, B, Mo, Co, Al, F, Se, Br, I.

II.4. Réflexion sur les phosphates "pauvres".

L'énumération ci-dessus montre que les "impuretés" des phosphates considérés au point II.2. sont parfois des éléments indispensables en grandes quantités aux cultures tels Ca, Mg et S.

Mais au cours des récentes décennies, la vogue des engrais de plus en plus concentrés, généralement produits par neutralisation de l'acide phosphorique les a fait considérer comme indésirables, soit qu'ils contrarient les processus technologiques (influence sur la filtration du gypse ou sur la stabilité des engrais liquides), soit plus simplement que leur présence dilue les engrais finals.

Mais si elles sont présentes dans le minerai en pourcentage appréciable et que leur élimination est compliquée, onéreuse voire impossible au stade de l'enrichissement du minerai, cela ne constitue pas toujours une raison pour récuser définitivement ce minerai.

Certes, il ne pourra servir d'alimentation à une unité de classe mondiale produisant des engrais concentrés pour tous les marchés couverts par les adjudications internationales ; mais il peut se révéler excellent pour produire des fertilisants moins riches destinés à un usage local ou régional.

Ici, se termine l'introduction de ce rapport ; que le lecteur en excuse la longueur ; elle se justifie par la nécessité de bien poser le problème à étudier.

Face à la diversité des personnes destinées à se saisir du sujet, une mise au point précise des données a paru indispensable ; elle permettra une meilleure compréhension des choix ultérieurs quant aux techniques de traitement, qu'il s'agisse de l'enrichissement mécanique des minerais ou de leur transformation chimique ou thermique.

III GEOLOGIE DES GISEMENTS DE PHOSPHATE.

Sans développer complètement ce sujet, une brève présentation de ses trois aspects principaux : géologie, prospection, reconnaissance, est utile à la compréhension des faits⁽¹⁾.

III.1. Géologie

La distinction est très nette entre :

- Les phosphates magmatiques qui sont logés dans des roches basiques intrusives, de type carbonatite, syénite à néphélines etc... ; morphologiquement, ils se présentent comme des structures annulaires ou des filons tels par exemple KOLA en URSS ou PHALABORWA en RSA. Les minéraux contenus sont l'apatite, le rutile, le pyrochlore, le sphène, la calcite, la néphéline.
- Les phosphates sédimentaires qui résultent de précipitation directe en contexte lagunaire tels par exemple KHOURIBGA au MAROC, METLAOUI en TUNISIE, TAÏBA au SENEGAL et le gisement Togolais. L'apatite, présente sous forme de phosphorites pseudo-oolithiques, s'y trouve accompagnée de calcite, dolomite, pyrite, opale, matières organiques.

Remarque : seule l'apatite fait l'objet d'exploitation pour engrais ; les phosphates de lithium (amblygonite) sont exploités pour lithium, les phosphates de terres rares (monazite) sont exploités pour les terres rares ; les phosphates de fer, manganèse, aluminium ne sont pas exploités,

(1) Ce chapitre, comme le suivant, est essentiellement alimenté par les contributions des cadres de SYRES, Syndicat d'Etude de l'Université de LIEGE associant les Laboratoires de Géologie Appliquée (Prof. DIMANCHE) et de Métallurgie Extractive (Prof. EK) dans une action consacrée à la mise en valeur des ressources minérales naturelles, dont les phosphates et notamment les minerais pauvres.

toutefois certains phosphates alumineux peuvent correspondre à une dégradation latéritique d'une apatite primaire ; des essais récents (GABON, BURUNDI) tentent la valorisation ; le phosphate alumineux de THIES, après calcination modérée est vendu comme engrais sous le nom de PHOSPAL (Voir Chap. V).

III.2. Prospection

Aux trois stades de la recherche, on fera encore la distinction entre :

- Les gisements magmatiques

- Recherche en grand par télédétection des linéaments de type rift, ou des structures annulaires superposées aux stratifications, failles et relief.
- Recherche stratégique par cartographie des termes pétrologiques associés (syénites à néphélines, granites à ilménites etc...).
- Recherche régionale par cartographie des anomalies géochimiques en terres rares, titane, uranium / thorium.

- Les gisements sédimentaires

- Recherche en grand par cartographie des courants marins froids et de leurs accidents localisés de remontées au-dessus des masses chaudes (ce sont les "up-welling").
- Recherche stratégique par cartographie des paléo-rivages.
- Recherche régionale par cartographie des anomalies géochimiques en uranium.
- Recherche locale par sédimentologie fine des différents termes lagunaires.

III.3. Reconnaissance

Celle-ci comporte essentiellement

- Les sondages maillés (kilométrique, hectométrique, décamétrique) avec carottage continu ou mieux diagraphie instantanée ; les données sont traitées géostatistiquement par les transformées de FOURIER pour déboucher sur une cartographie régionale des anomalies vraies.

- L'échantillonnage effectué par puits, tranchées ou saignées suivant les indications du sondage. Seule une application stricte des règles scientifiques régissant les opérations ci-dessus permet d'obtenir un échantillon représentatif du gisement, qui justifie les opérations auxquelles on va le soumettre en vue de sa
 - qualification
 - par analyses chimiques : P_2O_5
CaO / MgO
Silice
Alumine
Perte au feu
Oxydes de fer et de titane
Soufre.

 - par analyses minéralogiques
 - * méthodes microscopiques et/ou diffraction des rayons X
pour mise en évidence du type de phosphates, du type de carbonates, de l'abondance de silice, de matière organique, de pyrite ainsi que de leur type d'association

 - * si nécessaire, analyse ultime à la micro-sonde électronique pour mettre en évidence les causes d'un éventuel zonage des prisolithes phosphoritiques.

III.4. Réflexions sur les rôles de l'étude géologique.

Avant l'étude de l'enrichissement du minerai, son rôle est essentiel pour être sûr que le gisement est défini en quantité et représenté qualitativement par l'échantillon prélevé.

Toute erreur ou omission dans le processus risque de conduire à des travaux inutiles voire à des conclusions erronées, génératrices de pertes monétaires énormes quel que soit le sens de l'erreur.

Pendant l'étude de l'enrichissement, la qualification des produits enrichis et des rejets par les méthodes exposées ci-dessus est indispensable pour orienter la préparation du minerai vers les techniques les plus appropriées à chaque étape du processus. Cette synergie entre les deux disciplines est la raison même de la création de SYRES.

(voir annexes 1 à 6).

IV ENRICHISSEMENT DES PHOSPHATES PAUVRES. (1)

IV.1. La préparation des minerais.

IV.1.1 - Définitions

Pour définir les termes de préparation des minerais, il convient de préciser préalablement certaines appellations dans le sens où elles sont utilisées dans cette branche industrielle. Ces appellations ne correspondent pas nécessairement aux définitions admises dans d'autres secteurs scientifiques ou économiques.

Un minéral est un composé chimique solide à la température ambiante et de structure cristalline définie. La composition chimique d'un tel composé n'est pas toujours constante.

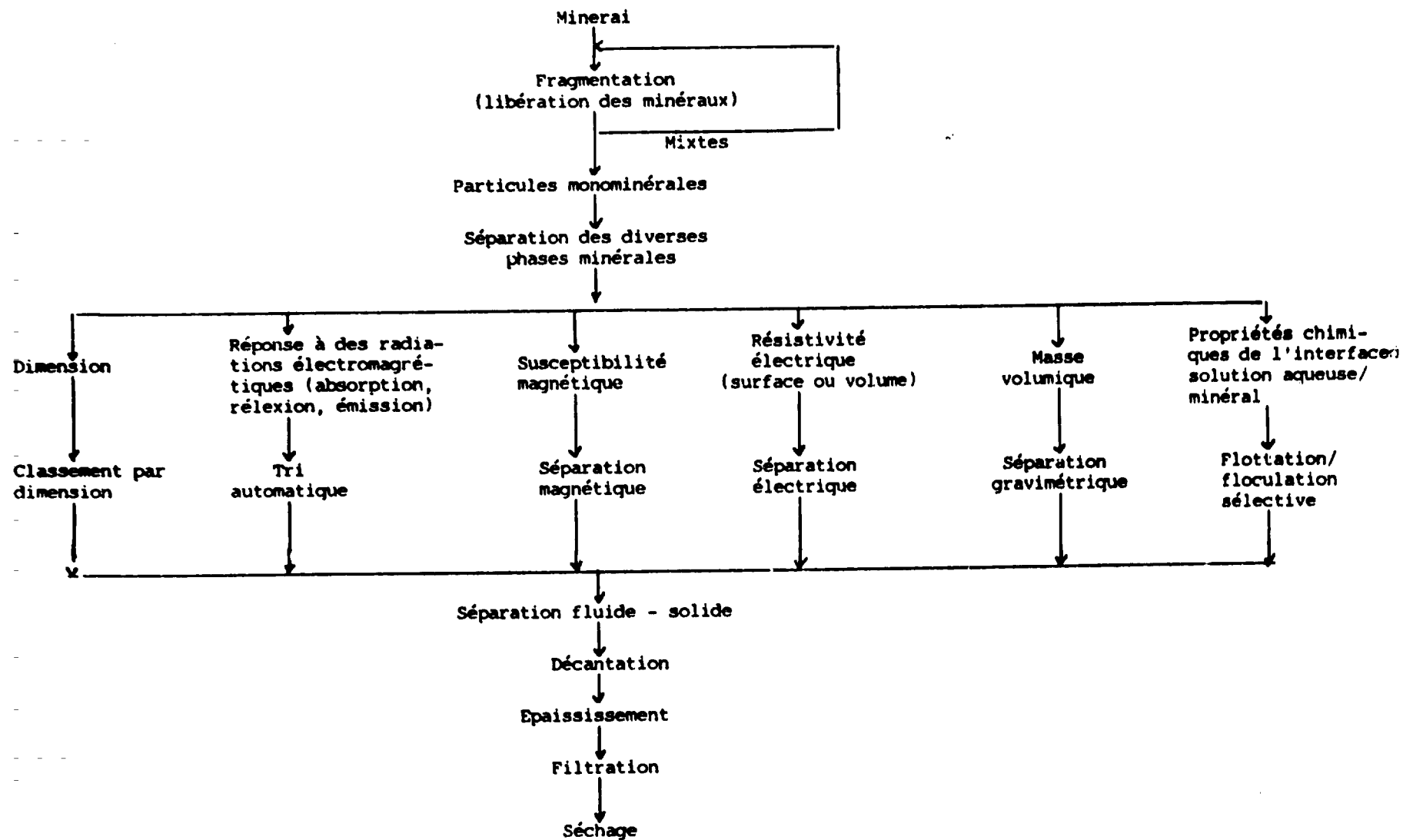
Une matière minérale est un ensemble de minéraux, mêlés les uns aux autres, tel qu'il se présente dans l'écorce terrestre. Par extension de sens, le pétrole et le gaz naturel sont également considérés comme des matières minérales.

Un minerai est une matière minérale qui peut être valorisée grâce à la présence d'un ou de plusieurs minéraux particuliers, appelés utiles, dans ses éléments constitutifs. C'est donc un concept économique qui définit un minerai : la matière minérale ne devient un minerai que si la valeur marchande des minéraux utiles qu'elle renferme, dépasse le coût nécessaire à leur extraction. Les autres minéraux accompagnateurs non valorisables s'appellent stériles ou gangue. Ces notions ne sont évidemment permanentes ni dans le temps, ni dans l'espace. On notera, par exemple, que l'appauvrissement constant des gisements et l'amélioration des techniques font que de nombreux stériles d'hier sont devenus à présent ou deviendront demain des minerais.

(1) Tout comme le chapitre précédent, celui-ci est inspiré largement par les informations fournies par SYRES, Syndicat d'Etude des Ressources Naturelles, Association d'Etude et de Recherche de l'Université de LIEGE.

La préparation des minerais englobe tous les traitements opérés sur la matière entre l'extraction minière du minerai et l'extraction finale du produit marchand.

Elle comporte donc tous les procédés d'ajustement de la granularité : classement - fragmentation - agglomération, et tous les procédés de concentration des minéraux utiles, par voie sèche ou par voie humide, sans modification chimique des matières (figure 3 ci-après).



IV.1.2 - Objectifs

Il est exceptionnel que les matières minérales, telles qu'elles sont extraites du sol ou du sous-sol, soient utilisables sans préparation. Même pour des minerais riches comme certains minerais de fer ou de manganèse, par exemple, une mise à dimension des blocs et morceaux extraits de la mine reste indispensable. Mais le plus fréquemment, les minéraux utiles sont accompagnés de matière stérile sans valeur, la gangue, dans laquelle ils sont même souvent disséminés en grains plus ou moins fins. Pour des raisons techniques et économiques, il est indispensable de séparer les minéraux utiles de la plus grosse partie de leur gangue avant de procéder aux opérations propres de la métallurgie ou de la chimie industrielle.

Traiter des minerais bruts par pyrométallurgie conduirait à porter à haute température des masses énormes de matière stérile qui, fondue en scorie, emporterait une forte proportion des métaux à valoriser. Les traitements hydrométallurgiques conduiraient également à des pertes considérables en métaux et en réactifs dans les solutions entraînées par la masse considérable de gangue.

Des considérations analogues sont tout autant valables pour les produits de la chimie industrielle.

Le coût du transport des matières joue également un rôle important car il est fréquent que les centres métallurgiques ou chimiques soient, contrairement aux usines d'enrichissement, éloignés des mines.

IV.1.3 - Procédés de Préparation des Minerais

Les procédés de préparation des minerais appartiennent à deux types principaux :

- 1) ceux qui réalisent une préparation de la granularité,
- 2) ceux qui réalisent une séparation de la gangue et éventuellement des divers minéraux utiles entre eux.

A ces procédés principaux, il faut encore adjoindre les opérations annexes telles que l'évacuation des stériles, la séparation et souvent la récupération de l'eau des pulpes, etc...

La préparation de la granularité comporte le classement dimensionnel des morceaux, grains ou particules, la réduction volumétrique par fragmentation ou à l'inverse l'agglomération des fines.

La séparation globale ou sélective des minéraux utiles n'est évidemment possible, par les procédés de préparation des minerais, que s'il existe une propriété physique différente entre eux.

Cette propriété physique peut être l'aspect, la couleur, l'éclat, le volume des grains, mais le plus souvent c'est leur poids spécifique, leur susceptibilité magnétique, leur conductibilité électrique ou leur aptitude à adhérer à des bulles d'air stabilisées dans une mousse.

Les séparations réalisées en préparation des minerais comportent toujours l'enlèvement d'une partie importante de la gangue.

IV.1.4 - Intérêt de la Préparation des Minerais

Les procédés de préparation des minerais ne permettant pas d'obtenir une séparation parfaite, même après de nombreuses opérations de recyclage, et il faut admettre que l'on récupère un concentré impur quand on perd peu de minéral utile, ou que l'on perde du métal dans les rejets lorsque le concentré doit être pur.

De plus, les minerais deviennent de plus en plus pauvres et complexes ; la libération des différentes espèces minérales,

en les isolant dans des grains qui ne contiennent qu'un seul minéral (condition indispensable pour les séparer correctement les uns des autres), exige une fragmentation poussée conduisant à des grains dont les dimensions ne se prêtent plus aux opérations simples de concentration mécanique.

Par contre, quand elle est applicable, la concentration mécanique des minerais par voie strictement physique, dans des opérations exécutées à la température ordinaire, est beaucoup plus économique que tout autre système comportant une transformation d'état physique (fusion ou volatilisation) ou d'état chimique (mise en solution, calcination, oxydoréduction, etc...).

IV.2. Nécessité d'un enrichissement physique pour les minerais pauvres.

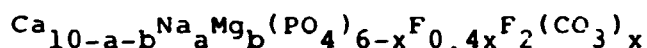
La source première de phosphore est la fluorapatite $\text{Ca}_{10}\text{F}_2(\text{PO}_4)_6$ dont la teneur en P_2O_5 est de 42,2 %.

Plus un phosphate est pauvre, plus cette fluorapatite est diluée par d'autres substances qui peuvent se trouver dans le minerai de trois façons différentes, à savoir⁽¹⁾ :

IV.2.1 - Dans la molécule d'apatite elle-même

Les substitutions y sont fréquentes : Mg, Sr, Na, Mn, Fe, Ba pour Ca ; Oh, Cl et CO_3 pour F ; As, V pour P ; $\text{CO}_3 + \text{F}$ pour PO_4 .

Dans les phosphates sédimentaires, on trouve généralement des apatites carbonatées ou francolites :



La valeur de x peut varier de 0 à 1,2 ; plus elle augmente, plus la réactivité du phosphate augmente. Dans les phosphates ignés, le facteur x est généralement proche de 0, ce qui explique leur faible réactivité.

IV.2.2 - Dans l'endogangue

Lors de la formation des éléments phosphatés d'origine sédimentaire, il s'y incorpore des impuretés sous la forme d'endogangue non incorporée à la structure apatitique. Elle peut être constituée de divers éléments tels que le quartz, formes amorphes de la silice telles que calcédoine, différentes variétés de carbonates : calcite, dolomite, ankérite, des sulfures (surtout la pyrite), des oxydes de fer et d'aluminium sous différentes formes ainsi que de la matière organique. Ces diluants peuvent se présenter sous forme de réelles inclusions ou de matière présente dans les fissures des particules d'apatite.

(1) Cette information est inspirée d'une conférence de B. GAUCHERAND, Directeur à CERMI - ALSTHOM, FRANCE.

* Le paragraphe IV.2 est illustré par les annexes 1 à 6.

IV.2.3 - Dans l'exogangue

L'exogangue est constituée de toute espèce minérale sous forme de particules ou de cristaux clairement séparés du matériau phosphaté ainsi que du ciment qui les entoure s'il n'y a pas eu de lixiviation in situ. Selon ses caractéristiques, on distingue les minerais à gangue principalement siliceuse, carbonatée ou alumino-ferrique.

En présence de tous ces diluants possibles, il est évident que, dans le cas de phosphates pauvres, c'est-à-dire de teneur en P_2O_5 inférieure à 20/25 %, on a tout intérêt à les enrichir d'abord par des traitements physiques (mécanique, hydraulique, aéraulique, magnétique) avant de les soumettre à des traitements chimiques, dont les réactions peuvent être difficiles à orienter et à contrôler si la nature et l'importance des diluants s'y opposent.

IV.3. Caractérisation des minerais phosphatés.

IV.3.1 - Les minerais phosphatés peuvent être classés suivant l'âge des formations dont ils font partie. -----

Ages of the major phosphate deposits

	<u>Age</u>	<u>Major deposits</u>
Miocene	10-20 m.y.	Florida, North Carolina, Baja California
Upper cretaceous, Eocene, Upper Jurassic	60-100 m.y.	Syria, Jordan, Israel, Egypt, Iraq, Algeria, Tunisia, Morocco, Senegal, Togo
Lower cretaceous	115-150 m.y.	Russian platform
Permian	230-270 m.y.	Western U.S.A.
Ordovician	440-480 m.y.	Tennessee, Estonia
Cambrian	530-570 m.y.	U.S.S.R. (Karatau) Mongolian People's Republic (Hubsugai), South China (Yunan)
Proterozoic	570 m.y.	India (Udaipur).

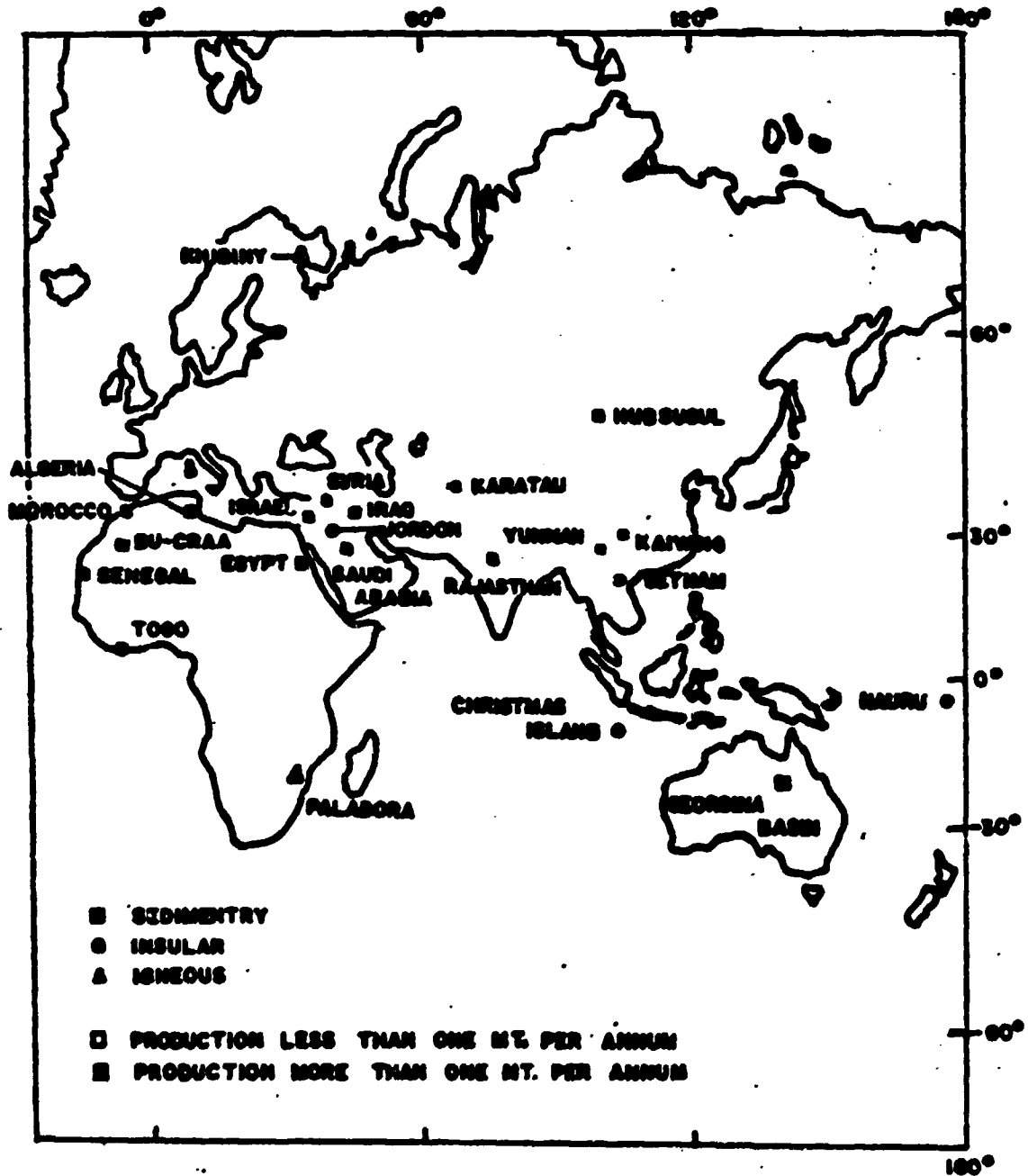
IV.3.2 - On distingue habituellement

- d'une part les minerais d'origine ignée

Ils sont généralement associés à des roches alcalines ou ultra-basiques et le constituant principal est l'hydroxy-fluorapatite bien cristallisée. Bien qu'ils soient souvent très pauvres en P_2O_5 (4 % en moyenne), leur cristallinité, leur faible taux de substitution et l'absence quasi complète d'inclusions permettent l'obtention des concentrés les plus riches (35 à 39,5 % P_2O_5).

- d'autre part les minerais d'origine sédimentaire

D'origine marine, ils ont pour principal constituant phosphaté la francolite ; leur teneur en phosphate varie largement suivant le degré de substitution et les teneurs en autres composants. Les plus rentables sont ceux où l'action des éléments atmosphériques et la lixiviation naturelle ont éliminé un maximum d'éléments étrangers.



DISTRIBUTION OF MAJOR PHOSPHATE DEPOSITS IN
AFRICA - ASIA & AUSTRALIA

(Modified after COOK)

IV.4. Procédés d'enrichissement exploités industriellement.

IV.4.1 - Phosphates d'origine ignée.

IV.4.1 - 1. - A gangue siliceuse.

On peut citer les exploitations

- de KOLA en U.R.S.S. - 20 millions de T/an à 39 % P₂O₅
- de PHALABORWA en RSA - 2,75 millions de T/an à 36,5 % P₂O₅
- de SILIJÄRVI en FINLANDE - 0,6 millions de T/an à 31,5 % P₂O₅

Ce dernier concentré est obtenu au départ d'un des plus pauvres minerais de phosphate connu au monde (3,5 % de P₂O₅) qui est enrichi par un facteur voisin de 10.

Fraction µm	Flotation feed			Apatis concentrate				Tailings		
	Weight %	Assay % P ₂ O ₅	Distrib. %	Weight %	Assay % P ₂ O ₅	Distrib. %	Recovery %	Weight %	Assay % P ₂ O ₅	Distrib. %
+315	9.4	0.5	1.4					10.3	0.3	6.1
315-200	10.1	2.0	5.8	5.4	37.7	6.0	85.7	9.8	0.3	5.7
200-125	13.0	3.3	12.3	11.5	37.1	12.6	91.7	13.7	0.3	8.1
125-90	12.5	3.9	14.0	12.1	34.9	12.5	93.1	11.8	0.3	6.9
90-75	7.1	4.8	9.8	7.0	38.9	8.0	94.5	5.8	0.3	3.4
75-40	12.4	4.5	16.1	15.1	37.1	16.5	94.1	14.0	0.3	8.3
40-0	35.5	4.0	40.8	48.9	30.8	44.4	79.8	34.6	0.9	61.5
Total	100.0	3.5	100.0	100.0	33.9	100.0	87.0	100.0	0.5	100.0

La composition de ce phosphate est explicitée aux Fig. 1 et tableau 1 ci-dessous.

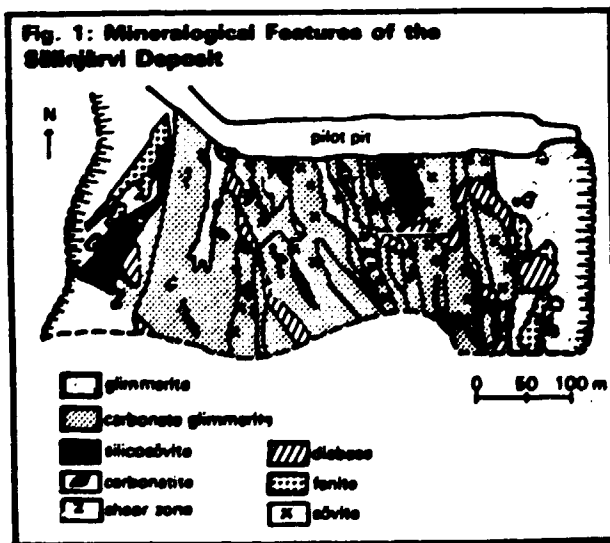


Table 1
Compositions of the Main Minerals in
the Silijärvi Deposit
(wt-%)

Component	Apatis, Ca, F (PO ₄)	Carbonate, CaCO ₃	Dolomite, (Ca, Mg)CO ₃	Phlogopite, (Mg, Na, Al)Fe silicates
CaO	55.8	53.0	30.1	0.1
SiO ₂	1.2	0.8	0.3	—
BaO	—	(0.03)	0.1	—
P ₂ O ₅	41.5	—	—	(0.04)
F	2.7	—	—	1.1
CO ₂	0.3	43.9	46.4	—
Na ₂ O	0.4	—	—	0.1
K ₂ O	(0.02)	—	—	10.2
Al ₂ O ₃	0.1	—	—	9.8
Fe ₂ O ₃	(0.03)	—	—	4.7
FeO	—	0.4	2.8	5.5
MgO	0.1	1.6	19.4	24.3
SiO ₂	0.1	—	—	40.5

Les flow sheet des ateliers d'enrichissement de SILIJÄRVI et KOLA sont reproduits ci-dessous.

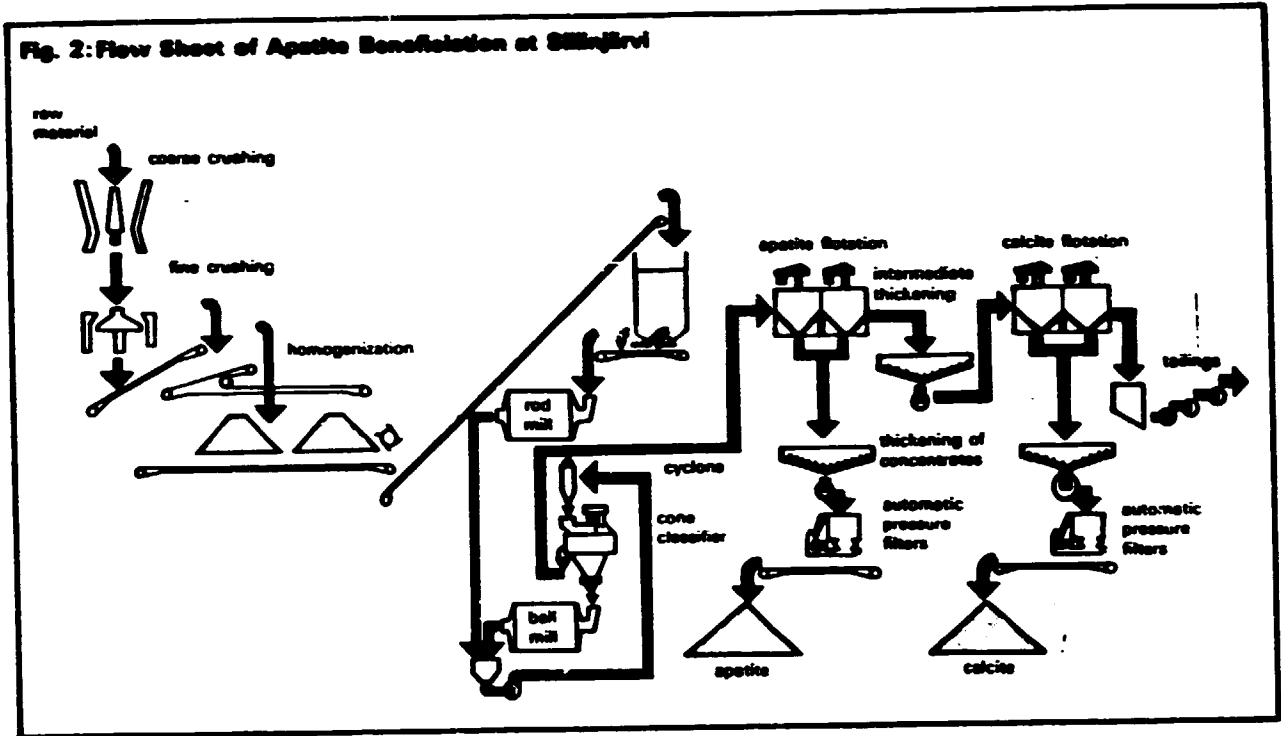
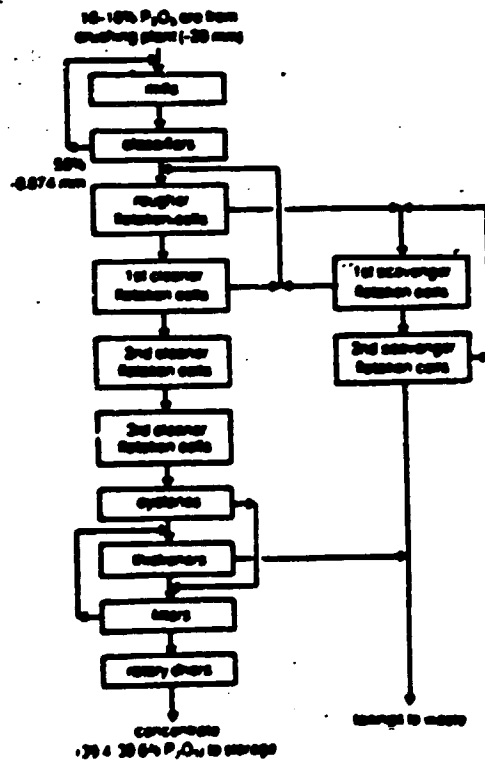
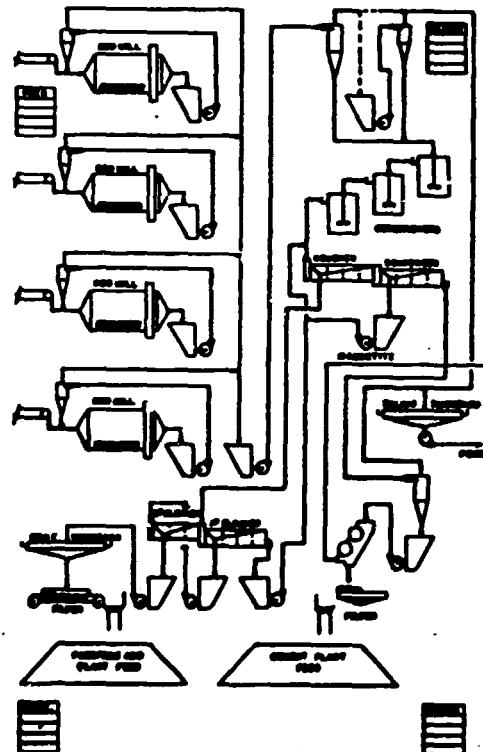


Figure 2: General scheme of treatment for phosphates from an igneous ore body, taken from the Kola complex, USSR.



IV.4.1 - 2. - A gangue carbonatée.

Leur enrichissement est beaucoup plus récent ; il a commencé en 1970 au BRESIL où il existe au moins trois unités industrielles - JACUPIRANGA, ARAXA et CATALAO - traitant des phosphates à gangue calcaire contenant d'autres minéraux tels magnétite, barytine etc... Ces minerais se trouvent dans des "cheminées alcalines" où l'apatite peut se trouver dans une ou plusieurs des roches alcalines constituant le milieu. JACUPIRANGA qui extrait l'apatite d'une carbonatite non altérée contenant 80 % de calcite et seulement 10 % d'apatite n'a d'équivalent en complexité que SILIINJARVI cité ci-dessus. Le flow sheet comporte : broyage, débouillage, flottation, séparation magnétique, seconde flottation, décantation, filtration.



JACUPIRANGA PLANT - CONCENTRATION PROCESS FLOWSHEET

Dans ces conditions, on ne s'étonnera pas du fait que l'enrichissement coûte beaucoup plus cher que la mine elle-même ; celle-ci est d'ailleurs plutôt assimilable à une carrière. Le tableau ci-dessous donne la répartition des coûts d'investissements pour les 5 unités brésiliennes (coût total de l'ordre de 500 millions de dollars pour une capacité de production cumulée de + 3.500.000 tonnes par an.

Table IV
Investment Costs
(1982 basis)

Specification	%
Mine	6.3
Crushing + storage	10.3
Concentration + reagents	18.2
Slurry pipeline	5.9
Water + tailings	4.9
Filtering + drying	7.3
Maintenance and utilities facilities	4.5
Infrastructure	7.0
Total for equipment and installation	64.4
Engineering and projects	12.6
Pre-operational expenses	13.7
Financing expenses	9.3
Total investment	100.0

Malgré quoi, les prix de revient, tout en étant assez élevés, restent acceptables, à savoir 24 dollars par tonne en coût direct, auquel il faut ajouter un amortissement de 11 dollars. (Voir détails ci-dessous)

Table VI
Specific Operating Costs
(US\$/tonne concentrate)

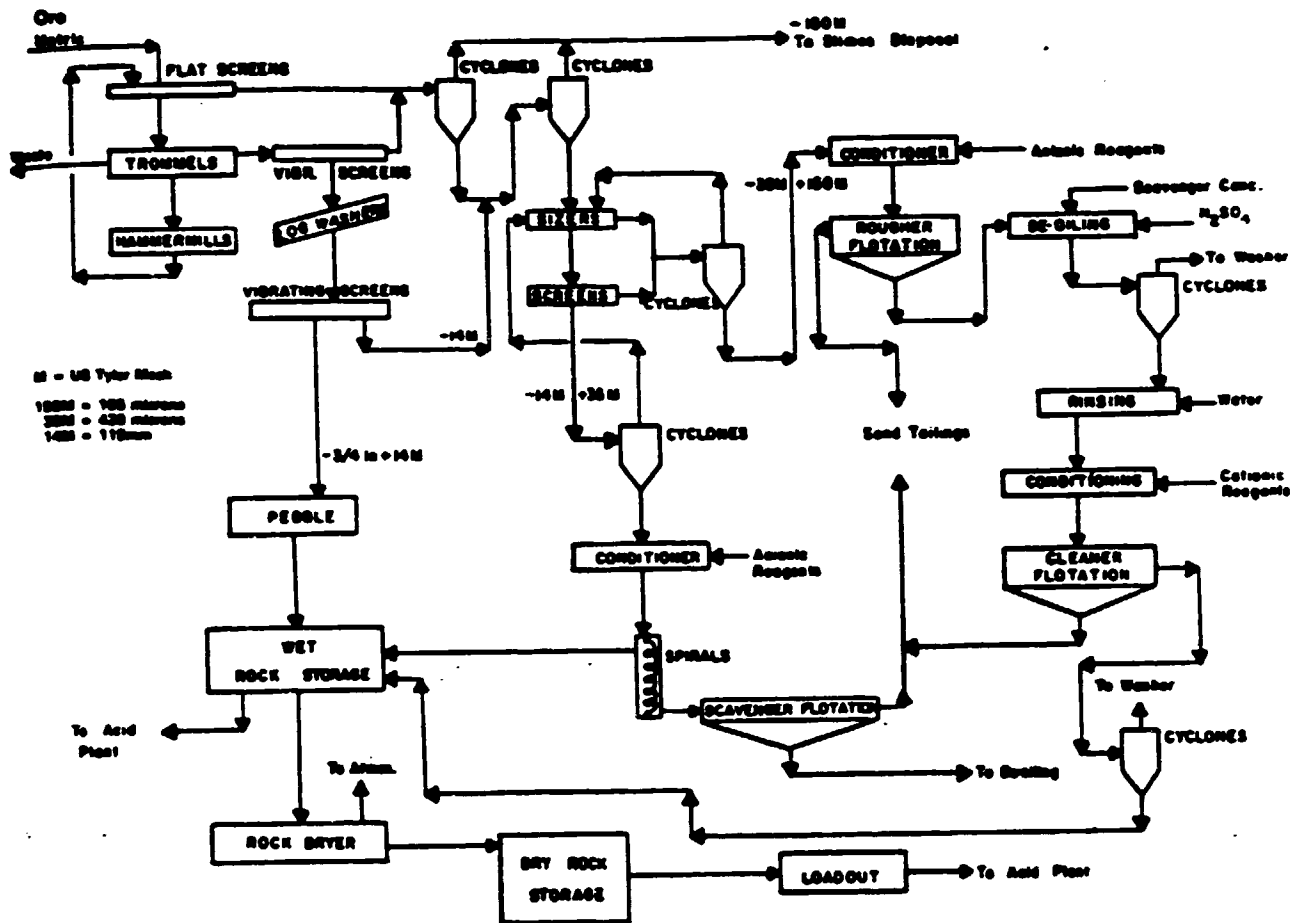
Variable costs		15.61
Ore	10.53	
Consumption Materials	1.72	
Electric Energy	2.97	
Royalties	0.39	
Fixed costs		9.99
Operating labour	1.42	
Maintenance labour	1.60	
Maintenance materials	2.23	
Indirect costs	4.34	
By-product credit		(1.41)
Total for moist concentrate		23.79
Oil fuel for drying		1.35
Total for dried concentrate		25.14
Depreciation		9.38
Overall production cost		34.52

IV.4.2 - Les phosphates sédimentaires.

IV.4.2 - 1. - A gangue principalement siliceuse.

Après les opérations classiques de broyage, classification, débourbage, l'enrichissement se fait par une opération de flottation classique et bien au point car elle a été, entre autres, développée pour les gisements de FLORIDE.

Figure 2: Flowchart of a typical Florida beneficiation plant, using hydrocyclone desliming and silica separation by flotation.



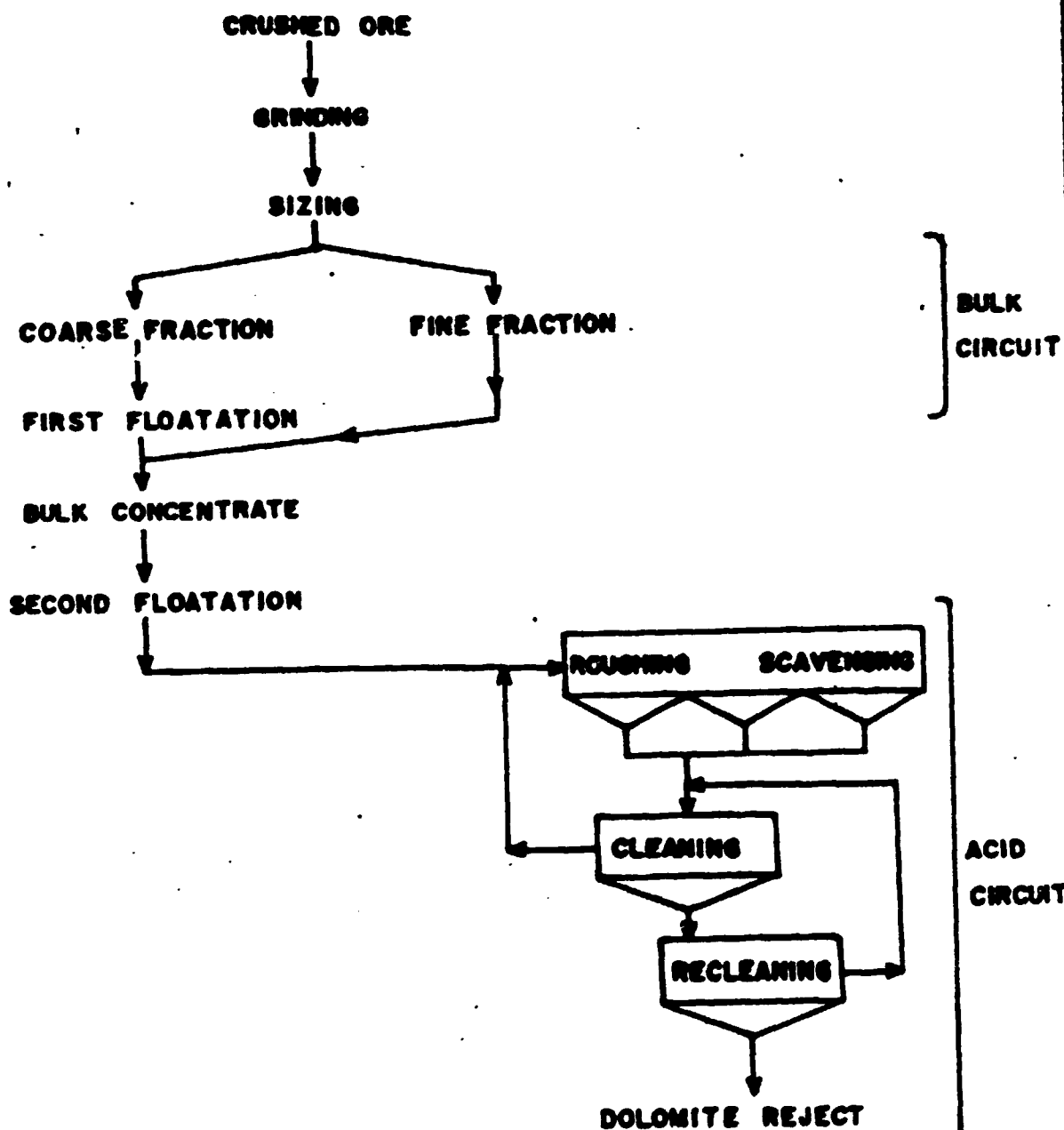
IV.4.2 - 2. - A gangue principalement carbonatée.

L'enrichissement de ces minerais était autrefois limité aux cas où la gangue permettait l'enrichissement par attrition et lavage. Les développements récents ont retenu deux voies différentes :

- La flottation qui n'est pas encore complètement maîtrisée à l'échelle commerciale ; on peut l'illustrer par l'étude du minerai indien de JAMARKHOTRA⁽¹⁾. Les essais ont montré que la voie la plus prometteuse consistait en un broyage fin (moins de 70 microns) suivi par une flottation en 2 étapes,

La première pour enlever la silice, la seconde pour éliminer la magnésie. Voir schéma ci-dessous.

FIGURE-5



(1) Informations extraites d'une Conférence donnée fin 1985 par Monsieur R. CHOUDHURI, Project Coordinator au RAJASTHAN STATE MINES & MINERALS.

Ce circuit fut confirmé sur un lot de 60 tonnes traité en micro-pilote.

9.3 The important steps involved in this process were - (a) grinding the LGO to the fineness required for liberation of the main mineral constituents. (b) conditioning of the ground product with a fat acid salt as collector and reduction in the silica content by subjecting the ground product to flotation (silica depression) after it has been dislimed (the fine fraction of the ground product is not subject to flotation at this stage). (c) selective desorption of collector on phosphatic grains in the floated product and the fine fraction by action of phosphoric acid with sulphuric acid and removal of dolomite in froths. The non-floated product is the phosphate concentrate.

Toutefois, en raison du caractère inédit du procédé, on décida de ne pas passer directement à l'échelle industrielle, mais bien à un pilote capable de traiter 200 tonnes par jour, qui a donné les résultats suivants :

From Blocks	ORE TYPES TESTED		
	D	C	B
<u>Feed (Average)</u>			
P ₂ O ₅	16 - 17	18 - 20	11 - 13
SiO ₂	2 - 4	2 - 4	2 - 4
MgO	12 - 13	8 - 10	13 - 15
<u>Concentrate</u>			
P ₂ O ₅	34 - 36	34 - 36	34 - 36
SiO ₂	4 - 6	4 - 6	4 - 5
MgO	1.4	1.4	1.8-1.9

- La calcination

Lorsqu'on dispose d'énergie à bon marché, la décarbonatation par calcination suivie du lavage des oxydes est appréciée ; elle est généralement réalisée en four tournant (kiln) à une température de

Cette opération a été retenue notamment pour la mise en valeur des gisements de DJEBEL - ONK en ALGERIE (calcinateur à lit fluidisé) et d'AKASHAT en IRAK (kiln).

A AKASHAT, le flow sheet comporte : homogénéisation, concassage, tamisage, calcination (2 fours tournants de 6,0 x 6,6 x 145 m), extinction et lavage. Cette installation traite 3.400.000 T/an de brut à 21 % P_2O_5 pour produire 1.600.000 T/an de concentré à 31 % P_2O_5 .

Quand il s'agit seulement de détruire les matières organiques, le four à lit fluidisé convient bien (YOUSOUFIA, au MAROC) et la consommation de combustible est d'autant plus limitée que les matières organiques sont abondantes.

V ENGRAIS NON CONVENTIONNELS AU DEPART DE PHOSPHATES PAUVRES.

Les matières phosphatées non conventionnelles utilisables à des fins de fertilisation peuvent être classées en trois catégories :

V-A - Matières pour application directe (sans traitement chimique)

- 1- Phosphates finement moulus
- 2- Phosphates ayant subi un traitement thermique
 - 2.1- Phosphates alumino-ferriques calcinés à basse température.
 - 2.2- Phosphates calcinés à haute température.

V-B - Matières ayant subi une transformation chimique simple.

- 3- Superphosphate simple
- 4- Dérivés sous-acidulés
 - 4.1- Super simple + phosphate naturel ou superphosphate KOTKA
 - 4.2- Phosphate partiellement acidulé
- 5- Humifert

V-C - Matières ayant subi une transformation biochimique.

- 6- Compostage
- 7- BIOSUPER.

V.1. Les phosphates finement moulus.

Dans la mesure où un phosphate moulu est efficace dans la fonction de fournir du phosphore aux végétaux, il est - de toute évidence - le moins cher des engrais phosphatés puisqu'il n'implique comme traitement que le broyage du minerai.

Mais comme il n'y a pas de transformation de ce dernier, ses propriétés naturelles vont influencer fondamentalement sa capacité fertilisante.

La réactivité du phosphate contenu dans le minerai peut être appréciée à l'aide de réactifs tels que l'acide citrique, l'acide formique, les citrates d'ammonium neutre et alcalin.

On notera à ce sujet

- Que les citrates d'ammonium ont été imaginés pour distinguer les formes solubles du P_2O_5 des superphosphates et autres engrais de la forme apatitique du P_2O_5 tel qu'il se présente dans le minerai.
- Que la solubilité citrique fut choisie pour identifier le P_2O_5 soluble de la scorie basique.
- Que la solubilité formique fut développée spécifiquement pour apprécier la réactivité du P_2O_5 des minerais phosphatés.

Pour se faire une opinion de la corrélation entre ces différentes solubilités et l'efficacité agronomique des produits, on peut se reporter au tableau 1 ci-dessous consacré à des phosphates américains (1).

TABLE 1. SOLUBILITY OF PHOSPHATE ROCKS IN VARIOUS EXTRACTANTS COMPARED WITH AGRONOMIC EFFICIENCY^a

	Rock Source					
	North Carolina	North Florida	Central Florida	Tennessee	Idaho	Missouri
Total P_2O_5	30.5	32.4	32.7	30.7	32.5	34.7
	% of Total P_2O_5 Extracted					
Ammonium citrate, pH 7 ^{b,c}	26.1	20.4	16.2	14.9	11.5	1.4
Citric acid, 2%	49.6	29.7	25.7	25.3	23.8	6.0
Formic acid, 2%	85.8	30.3	28.0	21.3	33.1	5.0
Ammonium citrate, pH 3 ^b	81.1	48.4	42.3	31.5	27.9	5.3
	Relative Agronomic Efficiency, TSP = 100 ^d					
Rice ^e	84	46	37	6	24	0
Corn ^f	77	41	34	10	33	1

a. From unpublished cooperative studies by IFDC and TVA.

b. Ammonium citrate solution concentration was equivalent to 185 g of citric acid per liter.

c. Extracted 30 minutes at 65°C (AOAC method). All others extracted 1 hour at room temperature.

d. Yield response expressed as percent of response to TSP.

e. Greenhouse experiment: Engelstad, O.P., A. Jugujinda, and S. K. De Datta. 1974. Soil Science Society of America Proceedings, 38:524-529.

f. Greenhouse experiment: Khasavneh, F. D., TVA unpublished information.

(1) Les tableaux ci-dessous sont empruntés au "FERTILIZER MANUAL" publié par l'ONU en 1980 et dont la préparation fut dirigée par Travis P. HIGNETT, alors Special Consultant auprès de I.F.D.C.

Les tableaux 2 et 3 ci-après incorporent en plus des phosphates d'autres pays, dont le plus connu pour cet usage est le phosphate tunisien GAFSA.

TABLE 2. REACTIVITY SCALES OF THE PHOSPHATE ROCKS AS MEASURED BY VARIOUS METHODS

Rock Source	Total P ₂ O ₅ in Rock, %	Soluble P ₂ O ₅ , % of Rock					Absolute Citrate Solubility, %
		Neutral Ammonium Citrate		2% Citric Acid	2% Formic Acid	pH 3 Ammonium Citrate	
		1st	2nd				
Huila, Colombia	20.9	0.8	3.4	5.2	6.2	10.5	12.2
Pesca, Colombia	19.8	1.9	1.9	7.0	5.3	8.5	9.7
Sechura, Peru	30.0	5.3	5.4	15.2	21.8	24.1	14.9
Gafsa, Tunisia	30.0	4.9	5.6	14.1	22.4	21.1	18.5
North Carolina	29.9	7.2	6.7	15.9	25.7	24.8	19.8
Central Florida	32.7	3.0	3.2	8.4	8.2	14.0	10.1
Tennessee	30.1	2.6	2.7	8.8	6.9	9.8	5.1

a. Solubility of P₂O₅ in neutral ammonium citrate as determined by a method described in reference (6).

TABLE 3. RELATIVE DRY MATTER YIELD OF CROP RESPONSE TO SEVEN PHOSPHATE ROCKS

Rock Sample	Relative Dry Matter Yield, %		
	Guinea Grass ^a	Beans ^b	Cassava ^b
Huila	44	82	90
Pesca	30	60	88
Sechura	100	92	-
Gafsa	85	90	100
North Carolina	88	100	98
Central Florida	57	78	92
Tennessee	38	67	86
No P (check)	0	43	41

a. Greenhouse experiment.

b. Field experiment.

On en déduit les coefficients de corrélation entre réactivité et fertilisation du tableau 4 ci-dessous.

TABLE 4. CORRELATION OF VARIOUS REACTIVITY SCALES OF THE PHOSPHATE ROCKS AND THE DRY MATTER YIELDS OF GUINEA GRASS AND BEANS

Method of Evaluation	Correlation Coefficient, r	
	Guinea Grass	Beans
Neutral ammonium citrate ^a	0.867	0.778
Neutral ammonium citrate ^b	0.927	0.961
2% citric acid	0.921	0.774
2% formic acid	0.944	0.879
Ammonium citrate, pH 3	0.984	0.910
Absolute citrate solubility	0.811	0.874

a. First extraction.

b. Second extraction.

Et, en plus, dans ce cas, l'essai en champ sur haricot fut prolongé sur trois récoltes couvrant une période de 18 mois. Les résultats ont montré que l'efficacité agronomique relative (R.A.E.) des phosphates moulus rapportée à celle du superphosphate triple augmente avec le temps.

	RAE of Phosphate Rocks		
	High Reactivity	Medium Reactivity	Low Reactivity
1st crop	90	71	29
2nd crop	105	65	40
3rd crop	115	95	85
Total, 3 crops	105	77	51

Comme indiqué au § 1.9 ci-avant, la valeur agronomique d'un engrais dépend non seulement de sa réactivité propre, mais aussi de la nature du sol : pH, % de matière organique, type de sol et du type de culture, développant une agressivité spécifique pour le phosphat

Le principal avantage du phosphate broyé, utilisé en application directe est son faible coût (il peut être inférieur à 50 % du coût du TSP importé), l'investissement réduit, le peu de technicité requise et l'absence de réactifs chimiques.

Un handicap signalé est l'aspect poussiéreux du produit, lequel peut être limité au prix d'une opération supplémentaire : la granulation ou, de préférence, la mini-granulation.

V.2. Phosphates ayant subi un traitement thermique.

A mi-chemin entre la technologie rustique des phosphates moulus et celle, plus sophistiquée, des engrais chimiques conventionnels, les traitements thermiques peuvent satisfaire à certains besoins de fertilisation locaux si l'on trouve sur place un minerai approprié et de l'énergie à bon prix.

V.2.1 - Phosphates alumino-ferriques calcinés à basse température.
Comme les phosphates alumino-ferriques se présentent habituellement sous forme hydratée, leur calcination en four tournant (kiln), à basse température (500 / 600 °C.) détruit déjà la molécule de base. Le cas le plus connu est le minerai de THIES au SENEGAL, qui est calciné industriellement pour donner un engrais appelé PHOSPAL. On trouvera ci-dessous quelques explications tirées des documentations du producteur.

V.2.1 - 1. - Matière première

 - matière première

Le Phospal provient d'un minerai extrait près de Thiès, au Sénégal, où ont été reconnues des réserves abondantes d'une matière première à teneur constante en acide phosphorique : plus de 100 millions de tonnes sur une concession de 30 000 ha.

Ce minerai est un phosphate double de chaux et d'alumine. Sa formation s'explique par l'action des eaux dans le sol, sur des phosphates de chaux déposés, au début de l'ère tertiaire, parmi des sédiments argileux.

Les minéralogistes y ont distingué des phases cristallines complexes telles que la pailite et la pseudowavellite ($\text{CaAl}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$).

On trouvera ci-après la composition chimique élémentaire du minerai.

COMPOSITION DU MINERAL

	%		%
Acide phosphorique (P_2O_5)	29,5	Silice totale (SiO_2)	2,5
Alumine (Al_2O_3)	30,5	Titane (TiO_2)	1,5
Chaux (CaO)	9	Fluor (F_2)	0,8
Oxyde de fer (Fe_2O_3)	10	Eau de constitution	15,5
		Divers	0,7

Dosages effectués sur le minerai séché à 110 °C.

V.2.1 - 2. - Fabrication du phospal.

2 - fabrication du phospal

I - Le mineral concassé est calciné au four tournant. Ce traitement a pour conséquences des changements fondamentaux de la structure du phosphate initial :

- transformations physiques : dissociation des cristaux complexes et denses du mineral et apparition d'une nouvelle structure à molécules plus simples dont l'aptitude à entrer en réaction avec les solutions du sol est ainsi améliorée.
- transformations chimiques : le fer est éliminé de la combinaison phosphatée sous forme d'oxyde ferrique libre, ce qui donne au Phospal sa couleur ocre rouge. Par ailleurs le départ de l'eau de constitution, initialement de 15,5%, a pour résultat d'augmenter la concentration en acide phosphorique.

Ces transformations ont deux répercussions :

- l'une chimique : l'acide phosphorique est rendu soluble, pour sa majeure partie, dans le citrate d'ammoniaque,
- l'autre agronomique : apparition de la valeur fertilisante.

Les résultats suivants démontrent l'effet du traitement du mineral (expérience sur avoine, en sol de limon argilo-calcaire) :

		Récolte par vase (matière sèche)
témoin sans acide phosphorique		4 g
même finesse	{ mineral 300 kg/ha	5 g
	{ Phospal 300 kg/ha	24 g

II - Un broyage du mineral calciné termine la fabrication (tamis 100).

V.2.1 - 3. - Caractéristiques du phospal.

3 - caractéristiques du phospal

COMPOSITION (*)

I - Eléments principaux et secondaires

P ₂ O ₅ (minimum)	34 %	(dont 28 soluble dans le citrate d'ammoniaque de Joutie)
Al ₂ O ₃	35	
CaO	10,4	
Fe ₂ O ₃	11,5	
SiO ₂	2,9	
TiO ₂	1,7	
MgO	0,3	
Perte au feu et divers	4,2	

II - Oligo-éléments

- a) Eléments mineurs reconnus comme utiles : zinc, cuivre, manganèse, molybdène, cobalt, bore,
- b) autres oligo-éléments : vanadium, chrome, nickel, plomb, étain.

Seul l'acide phosphorique donne lieu à une garantie, les tenours des autres constituants, qui peuvent légèrement varier, ne sont données qu'à titre indicatif.

(*) Les indications ci-dessus concernent le PHOSPAL 34. Pour les différentes présentations, voir page 7

V.2.2 - Phosphates calcinés à haute température.

Plusieurs types d'engrais phosphatés peuvent être préparés au départ de minerais pauvres par des réactions qui ont lieu à température élevée et qui, détruisant les structures apatitiques, permettent la recombinaison du phosphate en composés plus réactifs et de solubilité supérieure. Plusieurs de ces substances furent longtemps utilisées en agriculture, mais furent récemment déplacées par la vogue des engrais à haut titre et à phosphate soluble dans l'eau.

Les produits de ce type les plus connus sont le phosphate naturel défluoré, la scorie basique, le phosphate calcaro-magnésien fondu, le phosphate RHENANIA. La plupart sont préparés au départ de phosphates naturels, seuls ou additionnés de divers réactifs inorganiques et la plupart des réactions de décomposition de l'apatite s'accompagnent d'un dégagement de fluor.

Il ne faut pas confondre ces composés obtenus à haute température avec les phosphates calcinés obtenus au départ de minerais riches ; ceux-ci subissent alors un traitement plus doux à des températures comprises entre 650 ° C. et 1000 ° C., qui ne détruisent pas la structure apatitique ; ils favorisent essentiellement une transition de phase de la forme francolite vers la forme fluorapatite, plus stable et donc moins réactive.

Si les phosphates riches ne contiennent pas assez de minéraux accessoires pour promouvoir une décomposition significative de l'apatite pendant la calcination, par contre les phosphates pauvres, qui peuvent contenir jusqu'à 30 à 40 % de minéraux accessoires donnent généralement des produits plus réactifs que le minerai de départ et ce grâce à la présence de compositions phosphatées formées lors de la calcination.

Des thermophosphates commerciaux sont préparés au départ de mélanges de phosphates bruts ou concentrés et de réactifs sélectionnés, employés en quantités stoechiométriques pour fournir des produits spécifiques de nature vitreuse ou cristalline.

Le petit groupe des additifs possibles est repris au tableau ci-dessous.

Table 6. Reactants Used to Decompose Apatites

<u>Silica and Silicates</u>	<u>Phosphates</u>	<u>Halides</u>	<u>Alkali Metals</u>	<u>Alkaline Earths</u>
Quartz, opal ^a	H ₃ PO ₄	Chlorides (Na, Ca, K, Mg) ^a	Carbonates (Na, K)	CaCO ₃ , CaMg(CO ₃) ₂ ^a
feldspar	Alkali phosphates	KMgCl ₃ ·6H ₂ O (carnallite) ^a	Sulfates (Na, K, NH ₄)	CaSO ₄ ·2H ₂ O (gypsum) ^a
Olivine, serpentine ^a (Mg silicate)	AlPO ₄ ·nH ₂ O ^a		Silicates (Na, K type) ^a	Mg(Na, K) ₂ (SO ₄) ₂ ·4H ₂ O ^a
			Hydroxides (Na, K)	

a. Denotes reactants that may occur in natural association with apatite in phosphate rocks.

On y retrouve pas mal de diluants traditionnels des phosphates pauvres ; on en déduit donc que certains phosphates pauvres ne requièrent que de faibles ajustements pour préparer certains types particuliers de thermophosphates, alors qu'ils peuvent être parfaitement inutilisables, soit pour l'application directe, soit pour la fabrication d'engrais par voie chimique.

Les thermophosphates peuvent être groupés dans le tableau ci-dessous sur base de leur type de structure et de leur composition chimique.

Table 5. Types of Thermal Phosphate Products

<u>Idealized Composition</u>	<u>Structural Type</u>	<u>Reagents^a</u>
$(Ca, Mg)_3(PO_4)_2$ $Ca_4C(PO_4)_2$ $CaNaPO_4$ $CaKF_2$	α, β -TCP; whitlockite; glasses Hilgenstockite; basic slags Crystalline "Rhenania" compounds	None Alkaline earths Alkalies
$Ca_7F_2Si_2O_{16}$ $(Ca, Mg)-P_2Si_2O_{16}$ $Ca_3Na_2(P, Si)_4O_{16}$	Nagelschmitte series of solid solutions	Silica, Mg silicates
$Ca_3P_2Si_2O_{12}$	Silicocarnotite series of solid solutions	Silica, silicates
$Ca_{n, 2+}(P=O_{3, 2+1})$ where n \geq 2	Polyphosphates	Phosphates
Ca_2ClPO_4	Chlorospodiosite	Halides

a. Accessory mineral components in phosphate rock may supply part or all of the necessary reactants.

V.2.2 - 1. - Phosphates défluorés.

Le JAPON en produit des quantités substantielles (de l'ordre de 100.000 Tonnes/an).

Le phosphate riche est broyé et mélangé à de petites quantités de carbonate ou sulfate de calcium et à de l'acide phosphorique. Ce mélange est ensuite calciné dans un four tournant (Diam. : 2,7m ; Long. 45m) et donne un produit contenant 38 à 42 % de P_2O_5 dont plus de 90 % sont solubles dans l'acide citrique à 2 % et 85/90 % sont solubles dans le citrate d'ammonium neutre. Presque tout le fluor est dégagé et récupéré sous forme de fluorure acide de sodium ($Na H F_2$).

Le principal composant de ce produit est le phosphate tricalcique. Les consommations de matières suivantes sont citées (par Tonne de produit à 41/42 % de P_2O_5 total)

Minéral de phosphate (37 % P_2O_5)	: 900 Kg
Acide phosphorique de voie humide	: 95 Kg de P_2O_5
Carbonate de sodium	: 120 Kg

Fuel extra-lourd (combustible) : 200 Kg.

N.B. Aux U.S.A., ce type de produit est surtout utilisé comme aliment du bétail.

V.2.2 - 2. - Scorie basique.

C'est un sous-produit de l'aciérie ; la fonte fabriquée au départ d'un minerai de fer à haute teneur en phosphore est convertie en acier dans un convertisseur THOMAS, par oxydation au contact d'une scorie basique, c'est-à-dire à haute teneur en chaux. C'est surtout en EUROPE OCCIDENTALE que cette production existe ; elle donne des produits contenant :

P_2O_5	:	15 - 20 %
SiO_2	:	4 - 6 %
CaO	:	42 - 50 %
MnO	:	3 - 6 %
Al_2O_3	:	0,5 - 2,5 %
MgO	:	2 - 4 %
Fe	:	9 - 13 %

85 à 90 % du P_2O_5 est soluble dans l'acide citrique à 2 % ;

ce P_2O_5 se présente sous les formes suivantes :

Silicophosphate de calcium - silicocarnotite ($5 CaO-P_2O_5-SiO_2$)
et nagelschmittite ($7 CaO-P_2O_5-2 SiO_2$)

La consommation de scorie basique à usage d'engrais fournissait encore en 1973 environ 1.200.000 Tonnes de P_2O_5 par an ; suite au traitement de minerais moins phosphoreux et aux changements de procédés en sidérurgie, cette quantité a brutalement diminué pour atteindre moins de 600.000 Tonnes par an en 1977 et quasi rien actuellement.

Ceci démontre que la scorie est considérée comme un bon engrais sur les sols acides ; de plus, elle est encore valorisée par son effet chaulant et ses oligo-éléments.

On l'applique à l'état pulvérulent ou granulée en mélange avec la potasse.

V.2.2 -3. - Phosphate calcaro-magnésien fondu (C.M.P.).

TVA a développé un procédé où un mélange de phosphate et d'olivine ou serpentine (silicate de magnésium) est fondu dans un four électrique (850 KWh / Tonne). Le bain fondu est trempé à l'eau (10 T. d'eau - recyclable - par Tonne) et utilisé comme engrais à l'état finement divisé. Il s'agit d'un verre de phosphate calcaro-magnésien contenant 20 % de P_2O_5 et 15 % de MgO dont plus de 90 % est soluble dans l'acide citrique après broyage (70 % plus petit que 150 microns).

Les principales compositions des additifs utilisés sont :

Olivine	$(Mg,Fe)_2 SiO_4$
Serpentine	$Mg_3 H_4 Si_2 O_9$
Garniérite	$(Mg,Ni) H_2 SiO_4$
Magnésite	$Mg CO_3$

Les tests en serre du U.S.Department of Agriculture ont montré que le produit est, en moyenne, plus efficace que le superphosphate sur sols acides. De plus, il a un équivalent carbonate de chaux de 0,5 à 0,7 et l'oxyde de magnésium contenu se trouve sous une forme accessible aux plantes ; dans certains cas, la présence de silice soluble dans le sol peut être un avantage.

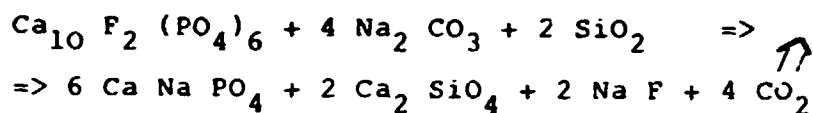
Le C.M.P. est produit par plusieurs usines japonaises, à raison de 500.000 Tonnes /an au total ; il est aussi produit en COREE, TAIWAN, CHINE, BRESIL et AFRIQUE DU SUD.

V.2.2 - 4. - Le phosphate RHENANIA.

Il est obtenu en calcinant un mélange de minerai de phosphate, carbonate de soude et silice en four tournant, à 1250 ° C. On ajoute assez de sodium pour former Ca Na PO_4 et assez de silice pour former $\text{Ca}_2 \text{SiO}_4$, avec l'excès de calcium restant. Les proportions types sont : 1 part de carbonate de soude pour 3 parts de phosphate plus assez de silice pour augmenter la teneur en silice dans le produit à environ 10 %.

Le produit contient 28 - 30 % de P_2O_5 qui est presque complètement soluble dans le citrate ammonique neutre ou alcalin, en dépit du fait que presque tout le fluor reste dans le produit.

Il est utilisé sous forme broyée ou granulée avec de la potasse. La réaction de base serait :



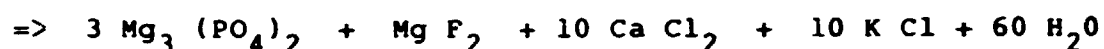
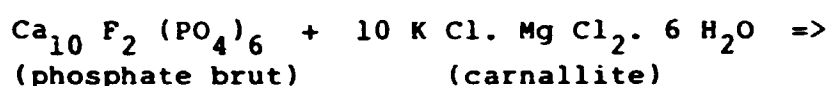
Les consommations de matières par Tonne de produit titrant 0 - 29 - 0 sont :

Phosphate à 38,7 % de P_2O_5	: 749 Kg
carbonate de soude	: 289 Kg
sable à 97 % de SiO_2	: 77 Kg
électricité	: 36 KWh
vapeur	: 10 Kg
Fuel oil	: 66 Kg.

On a constaté que le produit était nettement plus efficace que le superphosphate sur plusieurs sols acides tropicaux à COSTA-RICA, au LIBERIA, au CONGO, au ZAIRE et au MALAWI. Cette supériorité est probablement due à l'alcalinité du produit et à sa capacité de résister à la fixation par le sol ; le sodium et la silice soluble peuvent aussi être bénéfiques.

V.2.2 - 5. - Autres produits cités.

- Le métaphosphate de calcium développé par T.V.A., qui en a produit environ 1.000.000 Tonnes. L'utilisation de P₄ élémentaire en a rendu le coût prohibitif.
- La chlorospodiosite, Ca₂ Cl PO₄ (33,7 % P₂O₅) qui a donné lieu à des recherches de T.V.A. et I.F.D.C., car son point de fusion est bas : 600 ° C. contre 1100 à 1400 ° C. pour les autres sels. Mais ce produit n'a pas (encore ?) atteint un stade commercial.
- Les phosphates de magnésium où un procédé pilote a été développé par I.M.I. (ISRAEL MINING INDUSTRIES)



La réaction a lieu à 400 ° C. et le produit final est lavé à l'eau pour dissoudre les chlorures de calcium et de potassium tandis que le solide restant, constitué essentiellement de phosphate trimagnésique est séché.

Le produit obtenu est un engrais de luxe, bien trop sophistiqué pour nous intéresser dans la mise en valeur des phosphates pauvres.

Beaucoup d'informations utiles à la confection de ce chapitre ont été tirées du "FERTILIZER MANUAL" déjà cité, et du texte d'une Conférence de MM. ROY et MC CLELLAN de I.F.D.C., dont l'origine n'a pu être retrouvée, mais qui date de moins de 5 ans.

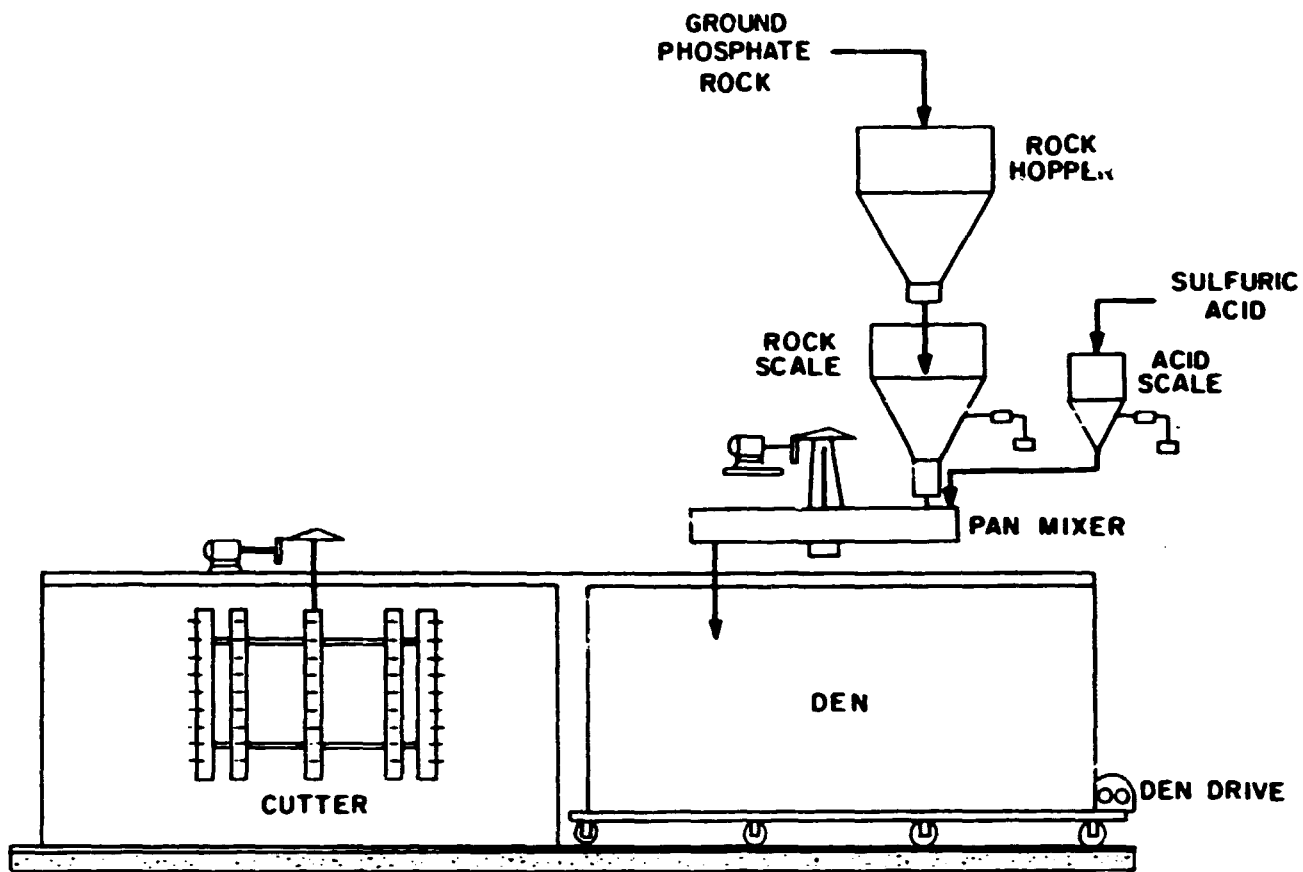


Figure 1. Batch Manufacture of Single Superphosphate.

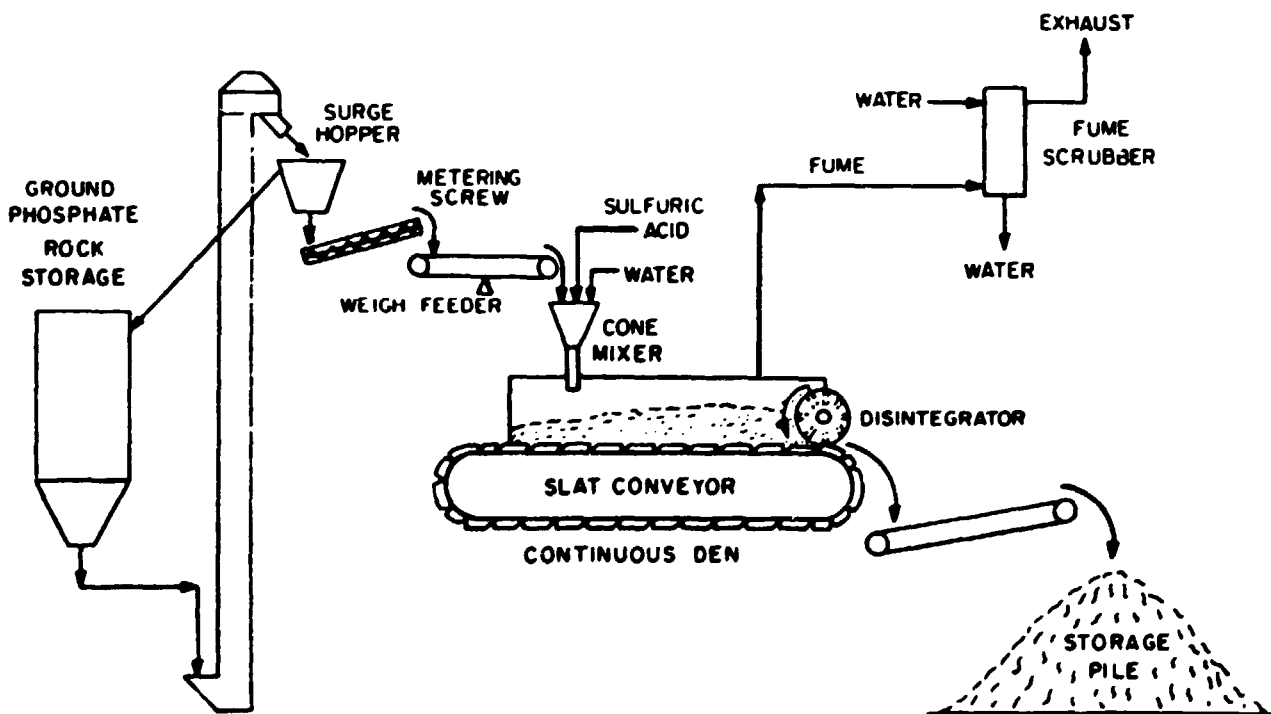


Figure 2. Continuous Manufacture of Single Superphosphate.

Les consommations par tonne de produit fini sont, par exemple de

- 626 Kg de minerai phosphaté
- 390 Kg d'acide sulfurique
- 100 Kg d'eau
- 3 KWh d'électricité (+ broyage du phosphate à raison de 7 à 25 KWh par tonne de minerai).
- 0,15 Heure - Homme de main d'oeuvre
- 0,015 Heure - Homme de supervision.

V.4. Dérivés sous-acidulés.

V.4.1 - SSP + phosphate naturel ou superphosphate KOTKA.

Ce nom est celui de la ville de FINLANDE où ce produit fut fabriqué en premier lieu.

Avantages : peu de mûrissage nécessaire

la teneur en acidité libre est faible.

L'efficacité de ce produit est égale à celle du SSP contenu + celle du phosphate s'ils étaient appliqués séparément.

Une composition exemplative, comparée à celles de superphosphates est donnée au tableau 1 ci-dessous.

TABLE 1. COMPOSITION OF SINGLE SUPERPHOSPHATES

Source of Rock	Composition, % by Weight								
	P ₂ O ₅		Water Soluble	Free Acid	H ₂ O	CaO	SO ₃	R ₂ O ₃	F
	Total	Available							
Florida	19.9	19.6	17.5	2.4	5.9	27.1	28.4	1.3	-
Florida (granular)	21.5	20.7	17.4	0.6	1.1	30.5	30.7	2.3	1.6
Morocco	19.8	-	18.8	2.0	8.4	-	-	-	-
Morocco	21.4	20.2	-	1.7	9.8	-	-	-	-
Ocean Island	22.8	-	20.8	4.6	10.6	-	-	-	-
Morocco and Kola (Kotka) ^a	22.8	14.6 ^b	14.5	1.3	8.9	-	-	-	-

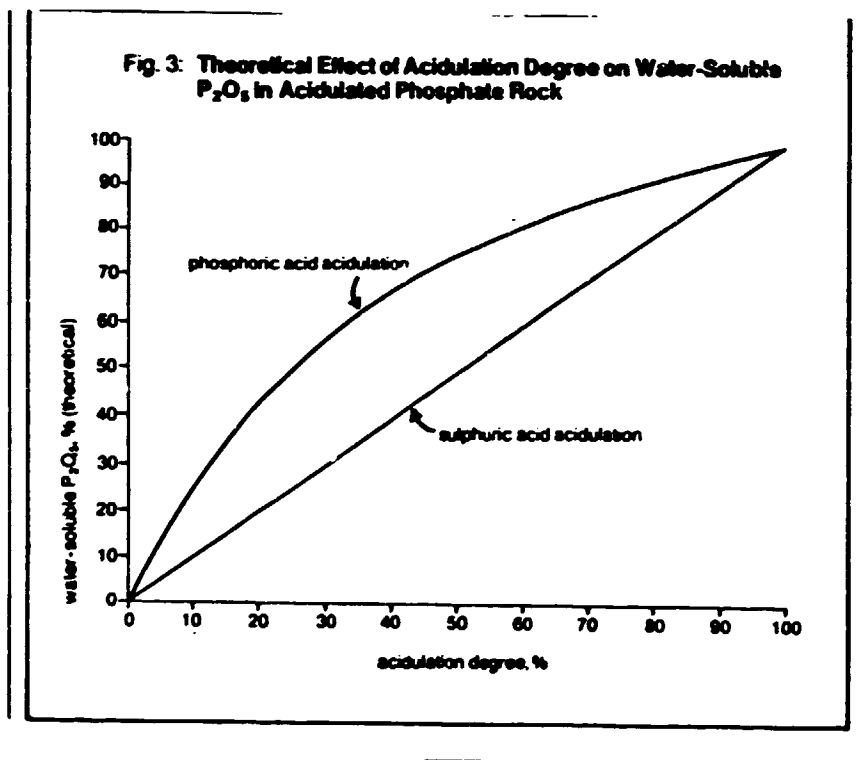
a. Superphosphate plus additional phosphate rock.

b. Alkaline citrate soluble.

V.4.2 - Phosphate partiellement acidulé (PAPR).

Développé depuis une douzaine d'années par I.F.D.C., cet engrais a connu un certain succès dans plusieurs pays tropicaux.

En effet, dans le cas où un minerai de phosphate n'est pas utilisable en application directe à cause d'une réactivité insuffisante, l'acidulation partielle, c'est-à-dire le traitement par une fraction (exprimée en pourcentage) de la quantité stoechiométrique d'acide améliorera la solubilité dans une mesure qui est fonction du taux d'acidulation.



Le choix économique qui s'impose est l'acidulation par l'acide sulfurique et on rencontre deux filières possibles

- la production en produit pulvérulent ou RUN - OF - PILE (ROP) avec ou sans granulation subséquente (voir fig 4 page suivante).
- la production en une seule étape de produit granulé par une ligne d'acidulation - granulation combinées (voir fig 5 page suivante).

Variables de procédés

Le comportement des phosphates durant l'acidulation n'étant guère prévisible à cause de la complexité des réactions et de l'influence des composés associés, des tests préalables sont nécessaires pour sélectionner les meilleures conditions de traitement de chaque phosphate.

On remarquera que certains phosphates inaptes à la fabrication de SSP, peuvent très bien convenir pour l'acidulation partielle. Celle-ci, en effet, tolère les minerais pauvres.

C'est le cas notamment, selon I.F.D.C., du phosphate KODJARI du BURKINA FASO ; roche sédimentaire à hautes teneurs en silice, fer et aluminium, le KODJARI est très peu réactif et tout à fait impropre à la fabrication de SSP. En effet, on obtient un produit collant lorsque le taux d'acidulation dépasse 50 % et de plus, la présence de fer et d'aluminium donne des produits de réaction qui diminuent la disponibilité du phosphore (voir tables II et III page suivante).

Plus faible est la réactivité du phosphate, plus dilué doit être l'acide utilisé (par ex. 60-75 % contre 75 à 90 % pour des phosphates tendres) et plus limitée est l'acidulation permise avant que l'acidité libre fasse coller le produit ; on notera encore que le produit pulvérulent, qui dispose d'un temps de mûrissage accepte de plus fortes acidulations que le procédé en un temps. De plus, la rétrogradation de l'assimilabilité du P_2O_5 se produit après plusieurs semaines ou lorsqu'on utilise de trop fortes températures au séchage (Plus de 120 °C). Ces propriétés sont illustrées par les tableaux II et III ci-après.

Fig. 4: Run-of-Pile (ROP) Production Process for PAPP

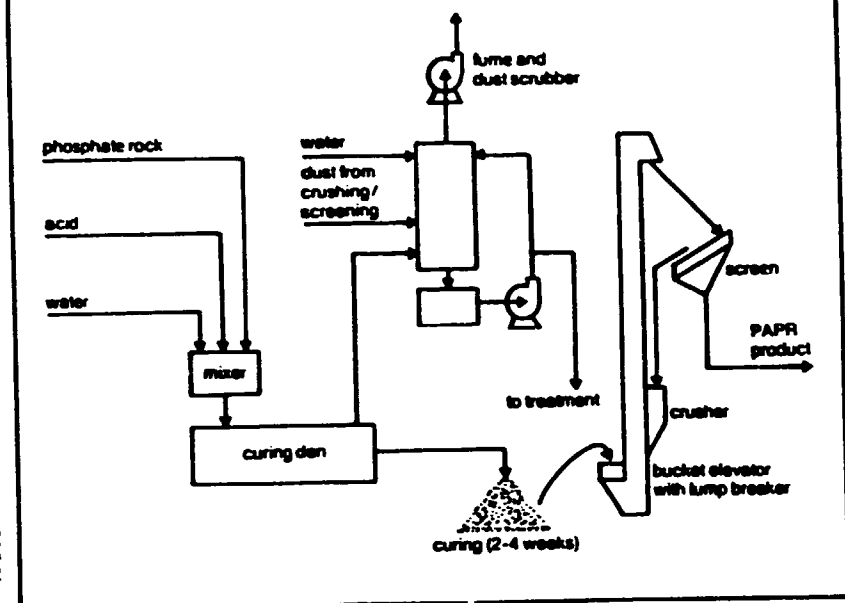


Fig. 5: Single-Step Acidulation/Granulation (SSAG) Process for PAPP

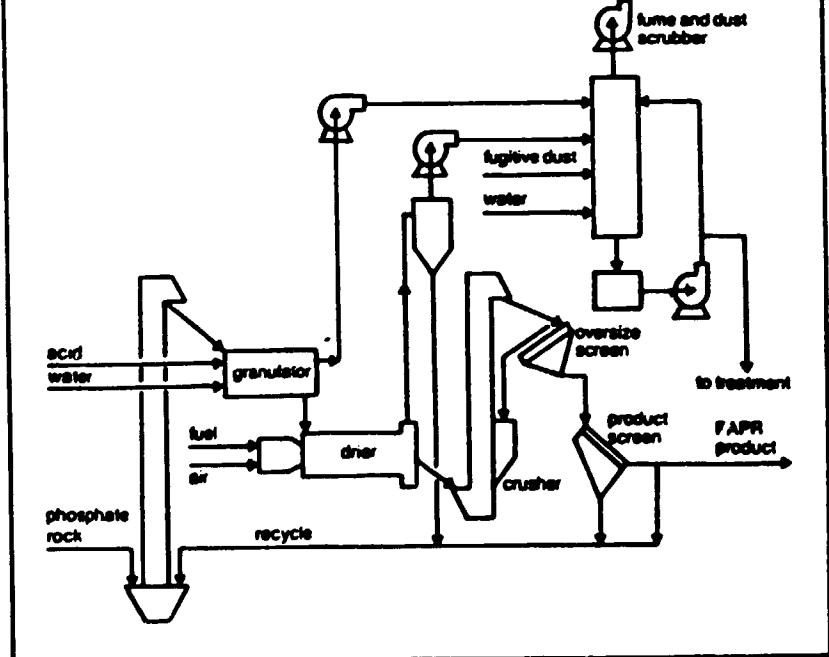


Tableau II

Table II
Maximum Acidulation Degree Predicted for Various Phosphate Rocks According to PAPER Process

Source rock	Reactivity*	Predicted acidulation degree (%)	
		run-of-pile	single step granular
Huila, Colombia	Medium	100	30
Kodjari, Burkina Faso	Low	60	40
Media Luna, Colombia	Low	100	70
Parc W, Niger	Low	100	60
Pesca, Colombia	Medium	100	30
Tahoua Niger	Medium	60	40
Tilemsi Valley, Mali	Medium	70	50

* Low = Neutral ammonium citrate-soluble P₂O₅ 0-3%
Medium = Neutral ammonium citrate-soluble P₂O₅ 3-6%

Tableau III

Table III
Influence of Curing (Aging) on P₂O₅ Solubility in Granular PAPER Products

Product	Degree of acidulation (%)	Total	P ₂ O ₅ Solubility		Available	Free acid (as P ₂ O ₅)	Free water	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
			water-soluble	NAC-soluble†					
Kodjari (Burkina Faso)								3.1	4.0
Fresh*	50	18.0	6.5	3.0	9.5	na	na		
Aged**	50	18.3	3.3	5.4	8.7	<0.1	2.0		
Tilemsi Valley (Mali)								6.3	2.5
Fresh*	30	22.7	6.6	4.8	11.4	2.1	3.8		
Aged**	30	23.1	2.6	5.7	8.3	<0.1	2.2		
Tahoua (Niger)								10.3	2.1
Aged 1 day	50	22.6	6.5	2.9	9.4	1.1	1.3		
Aged 1 week	50	22.4	6.6	3.3	9.9	0.9	1.8		
Aged 1 month	50	22.8	5.9	3.7	9.6	0.3	1.9		
Aged 3 months	50	22.4	4.7	4.0	8.7	0.1	na		
Aged 6 months	50	22.3	4.5	5.1	9.6	<0.1	1.6		

† Excludes water-soluble P₂O₅ fraction
* Analyzed day of production
** Analyzed 3 weeks-12 months after production
na Not available

V.5. HUMIFERT.

Lors de la réunion préparatoire tenue à LOME (TOGO) en février 1986 on a présenté le procédé HUMIFERT⁽¹⁾, fabrication simplifiée d'engrais binaire NP à l'humus. Ce procédé nouveau ne manque pas d'attraits et s'il réussit à franchir avec succès le cap de l'industrialisation, il pourrait se révéler une solution intéressante dans plus d'un cas de pays enclavés.

(1) Présentation faite par Monsieur BESNARD, de SOFRECHIM.

V.5.1 - Quelle est la voie proposée ?

Constatant d'une part, que la solubilisation des phosphates ne peut être obtenue de manière économique que par une attaque acide, d'autre part que de nombreux pays disposent de phosphates mais n'ont à leur disposition ni soufre, ni pyrites, SOFRECHIM a recherché la voie la moins onéreuse en investissements et en réactifs. Il s'avère que c'est une "voie nitrique" simplifiée.

On sait qu'il faut en effet pour l'attaque nitrique un poids d'ammoniac sensiblement égal au poids de soufre qui serait nécessaire pour solubiliser un poids donné de phosphates ; en simplifiant radicalement les méthodes opératoires utilisées pour produire par cette voie des engrais riches, il est possible de concevoir des mini-usines exploitables dans des pays en voie de développement.

Cette simplification porte sur deux points essentiels :

- 1) Fabrication "in situ" de l'acide nitrique nécessaire et suppression, par là-même, des colonnes d'absorption des ateliers d'acide nitrique classiques.
- 2) Addition dans le produit réactionnel d'un élément absorbant d'origine organique qui a pour effet, d'une part d'accélérer l'absorption des oxydes d'azote, d'autre part de fixer la bouillie résultant de l'attaque nitrique des phosphates en lui donnant l'aspect d'un compost humide.

On pourra utiliser comme support organique des déchets agricoles, tels que les cimes d'arbres, la bagasse, les pailles (riz, coton...), de la tourbe, ou même du lignite. Le produit obtenu aura un rapport N/P qui sera en fonction de la richesse du phosphate de départ et du rapport $\text{Ca O} / \text{P}_2\text{O}_5$ dans celui-ci.

La composition moyenne en partant d'un phosphate à 26 % de P_2O_5 s'établira autour de 5 % d'azote et de 14 % de P_2O_5 soluble, citrate et eau, soit au total 19 % d'éléments fertilisants (sur produit sec).

Cette teneur est à comparer avec celle des "superphosphates" fabriqués à partir de phosphates naturels de richesse identique qui contiennent environ 18 % de P_2O_5 , alors que dans l'engrais résultant de la solubilisation nitrique existe, à côté du P_2O_5 en quantité notable, de l'azote nitrique immédiatement assimilable.

V.5.2 - Valeur agronomique de l'engrais HUMIFERT.

De nombreux essais comparatifs ont montré l'intérêt agronomique de l'engrais HUMIFERT.

Les essais, effectués par divers Instituts Agronomiques, généralement par la méthode de STANFORD et de KENT, ont consisté à comparer les résultats obtenus avec l'engrais HUMIFERT et les résultats obtenus avec les engrais fabriqués par des voies classiques à partir de divers minerais phosphatés.

Ainsi, par exemple, on a obtenu avec deux minerais très différents :

	Cas 1	Cas 2
Minerai :	Ancien	Récent
Teneur en P_2O_5	27	31
Ca O	34	46
SiO_2	25	9
$Fe_2O_3 + Al_2O_3$	3	9,5
Proportion relative des poids de matière végétale sèche produite dans des conditions identiques avec :		
Engrais HUMIFERT	197	186
Engrais d'attaque nitrique	185	173
Engrais d'attaque sulfurique partielle	173	171
Témoin sans engrais	100	100

Cet engrais présente l'avantage d'apporter au sol des matières organiques qui améliorent la structure du sol et qui favorisent l'absorption des substances minérales par les plantes en bloquant les métaux (Fe, Al) à l'état de chélates, ce qui empêche la rétrogradation du phosphate à l'état insoluble. Ces matières organiques recyclent également une partie du potassium enlevé par les cultures, élément qui autrement serait perdu.

V.6. Compostage.

Le principe de base consiste à faire fermenter des résidus agricoles (manioc, balles de riz etc...) pour produire des acides organiques (citrique, lactique, oxalique, humique etc...) qui peuvent être mélangés et compostés avec du phosphate et fournissent un produit dont le phosphate est plus assimilable. Cette technologie serait accessible au fermier seul ou à de petites coopératives ; il offrirait l'avantage d'augmenter la disponibilité du phosphate des roches indigènes sans importation de réactifs coûteux.

V.7. BIOSUPER.

Des recherches conduites au cours de cette décennie ont montré que des mélanges phosphate - soufre, phosphate - pyrite, phosphate - urée ont donné des résultats prometteurs dans certaines conditions agro-climatiques. De plus, une augmentation de la disponibilité du phosphate pour les plantes est constatée quand le mélange phosphate - soufre est inoculé avec la bactérie qui réalise l'oxydation du soufre, THIOBACILLUS THIOXYDANS.

Le produit obtenu, appelé "BIOSUPER" pourrait constituer un mode efficace d'utilisation des ressources phosphatées indigènes si les conditions économiques sont favorables.

VI CONCLUSIONS

VI.1. Si un pays africain disposant d'une façade maritime et doté d'importantes ressources phosphatières accessibles veut en entreprendre la transformation en vue d'élargir la gamme de ses produits sur les marchés internationaux, il doit créer un complexe chimique de classe mondiale pour être compétitif.

Cela signifie une unité d'acide phosphorique d'au moins 250.000 Tonnes de P_2O_5 par an, dont au moins une partie doit être transformée en engrais (DAP ou TSP) tandis que l'acide sulfurique nécessaire est fourni par une unité d'au moins 700.000 T. H_2SO_4 par an.

Dans les meilleures conditions d'infrastructures et d'environnement économique, cela représente un investissement d'au moins 250 millions de dollars qui doit prévoir le recours aux techniques les plus modernes pour être compétitif tant en qualité qu'en prix. Cela implique pour le personnel une "courbe d'apprentissage" qui peut durer de nombreuses années ; l'exemple ci-dessous le démontre.

Prenons le cas d'un jeune ingénieur africain récemment diplômé qui est engagé dans l'entreprise. Si on est dans un pays qui commence à s'industrialiser, il y a peu de chances pour qu'il y trouve des supérieurs et des adjoints expérimentés dans ce genre d'industrie. L'expérience montre que dans ce cas le jeune ingénieur pare au plus pressé en faisant en partie la besogne de ses adjoints, ce qui constitue une bonne façon de se forger une expérience et ainsi d'apprendre ce qu'il faut savoir pour commander à ses adjoints. Mais en l'absence de guidance suffisante de la part de ses supérieurs, cela risque d'être un mauvais apprentissage qui conduit à l'échec personnel. Si le cas se reproduit à trop de postes des divers niveaux de la hiérarchie, il y a même risque d'échec de l'équipe et de l'entreprise.

On sait que la formation d'un ingénieur normalement doué entrant en fonction dans un environnement expérimenté doit prendre environ cinq ans avant qu'il soit capable non seulement de bien comprendre ses processus mais de gérer optimalement ses usines et de garder son sang-froid en cas de dérive afin de prendre les bonnes décisions. Il importe donc de donner un encadrement similaire à son homologue africain et ce, d'autant plus qu'il doit apprendre son métier dans un environnement technique sophistiqué, sur des équipements coûteux et susceptibles de subir des dommages graves en cas de mauvaise opération.

Le transfert de technologie doit donc être spécialement adapté, et d'avance il doit prévoir :

- la formation théorique et pratique dans des industries similaires d'un nombre suffisant de cadres techniques et administratifs.
- l'assistance d'une équipe suffisante (en quantité, qualité et personnalité) de l'entrepreneur ou du bailleur de licence pour la réception physique, la mise en service et l'obtention des performances garanties.
- la guidance ultérieure de l'encadrement par des cadres
 - * recrutés à l'extérieur pour leurs connaissances, expérience et capacité d'enseigner par l'exemple et la parole.
 - * pour une mission de longue durée (plusieurs années si nécessaire).
 - * dont l'objectif clairement défini, en plus de leur mission technique propre est de former le ou les hommes appelés à le remplacer et à gérer ensuite l'activité.

Le coût de ces postes auxquels il faut encore ajouter la formation sur place, les cours de recyclage et le manque à gagner dû au ralentissement de la montée en puissance de l'usine suite au manque d'expérience du personnel constitue un montant qui peut varier entre 25 et 50 % de l'investissement si on traite bien le problème (si on le prend mal, ce sera beaucoup plus cher et il y a même beaucoup de chance de perdre la mise).

Bien qu'il ne constitue pas un investissement physique en équipements, ce montant doit être évalué à l'avance et son financement prévu au même titre que, par exemple, celui du fonds de roulement.

En raison de sa nature bien spéciale, on pourrait même imaginer qu'il fasse l'objet d'une formule de financement adaptée. Cela éviterait l'étonnement des bailleurs de fonds sollicités peu de temps après la mise en service de participer à un "plan de redressement" qui ne vise en fait qu'à couvrir des dépenses prévisibles mais non prévues.

VI.2. Les pays ou régions enclavés disposant de quelques ressources phosphatières ne peuvent bien entendu viser des investissements de cette ampleur. Ils devront viser des techniques de valorisation susceptibles de fournir les engrais adéquats à des coûts inférieurs à ceux des produits importés.

Mais, quelles que soient les conditions, le succès ne sera possible qu'en faisant preuve à tous les stades du projet d'un parfait professionnalisme

qu'il s'agisse de la détermination du gisement de phosphate tant en qualité qu'en quantité (voir chap. III)

ou de la mise à fruit de ce gisement

ou de la transformation du minerai en fertilisant phosphaté

* via un éventuel enrichissement du minerai

et/ou une opération visant à solubiliser le P.

Si le professionnalisme est essentiel, il n'est pas suffisant ; il faut aussi beaucoup d'intégrité dans l'appréciation des faits pour assurer la progression harmonieuse du projet et éviter son gauchissement par l'influence d'intérêts différents.

Cette intégrité exige une grande compétence pour pouvoir juger en toute indépendance la qualité des informations reçues et la pertinence des options suggérées. Aussi les promoteurs du projet auront intérêt à s'assurer les services d'un expert indépendant qu'il faudra associer étroitement au projet pour qu'il s'y investisse personnellement.

Idéalement, cet expert devrait être un senior avec une expérience probante de l'industrie considérée car cela le qualifierait à de multiples titres, à savoir

- la disponibilité puisque, ayant terminé son contrat d'emploi principal, il serait libre de toute allégeance.
- l'expérience acquise au cours d'une carrière complète qui confère non seulement le "savoir" et le "pouvoir" mais aussi le sang-froid qui permet l'appréciation correcte des faits et la prise de décisions judicieuses.
- l'activité exercée dans un milieu industriel moins sophistiqué que l'actuel ; il y a trente ou quarante ans, on exploitait encore de petites unités de technologie simple qui seraient beaucoup plus faciles à maîtriser par des populations qui découvrent l'industrialisation.
- un senior n'a pas de carrière en vue et est donc naturellement prêt à aider la génération montante.

En résumé, professionnalisme des consultants et intégrité des responsables et de leurs conseillers doivent être complétés par la prise en compte intégrale d'une organisation lucide du transfert de technologie comportant les trois étapes essentielles mentionnées ci-dessus, à savoir la formation, l'assistance, la guidance.

VI.3. Un exemple peut aider à la compréhension.

Soit un phosphate neuf qu'on a décidé de transformer en superphosphate simple ou en PAPR (phosphate partiellement acidifié).

Si l'on se trouve dans un milieu sans tradition industrielle, avec un marché limité et une main d'oeuvre abondante, il n'y a pas lieu de construire une usine sophistiquée, mais au contraire, on visera une unité de petite capacité, rustique dans ses équipements et dans son fonctionnement, d'entretien simple et limité ; elle sera par conséquent d'un coût acceptable, disons une dizaine de millions de dollars.

On recommandera par exemple :

- un processus de mélange en discontinu, qui permet la mesure volumétrique simple des proportions stoechiométriques de matières premières.
- le déversement des produits de réaction dans une ou des "caves" fixes réalisées en matériaux locaux - le bois résineux est un des meilleurs matériaux anti-acide !
- le décaillage par drag-line c'est-à-dire un équipement standard, de coût limité grâce à sa production en série, d'entretien courant et de plus disponible pour d'autres tâches quand l'usine ne fonctionne pas.

Une telle unité peut répondre compétitivement à des besoins locaux de l'engrais qu'elle produit car

- peu coûteuse, elle est susceptible de s'amortir sur une production limitée.
- de petite taille, elle satisfait néanmoins aux demandes locales par une marche saisonnière.
- de conception simple et d'exploitation facile, elle ne demande pas une "courbe d'apprentissage" de longue durée et peut ainsi être construite et rendue opérationnelle en un minimum de temps.

VI.4. Remarque 1

Certains ont vu une opposition entre la satisfaction des besoins locaux par des mini-usines locales et la distribution d'engrais classiques par de grosses usines à vocation régionale.

Ce débat ne paraît pas réaliste !

Là où les engrais classiques peuvent arriver à un coût compétitif⁽¹⁾, on n'ouvrira pas de mini-usine.

Là où ces engrais classiques ne peuvent être utilisés, des productions locales d'engrais moins riches, moins solubles (slow release), porteurs de plus d'éléments secondaires ou mineurs sont susceptibles d'amorcer une intensification de la production agricole qui finira par ne plus s'en satisfaire et, enrichie par son développement, pourra compléter son approvisionnement par un recours aux engrais classiques venant de grosses usines régionales ou mondiales.

VI.5. Remarque 2

Il n'y a pas lieu de mépriser l'usage d'engrais à basse teneur pour autant qu'ils apportent une solution économique aux problèmes de fertilisation locaux. L'usage intensif de scorie basique en EUROPE OCCIDENTALE jusqu'il y a 10 ans en est un exemple et lorsque son rôle a diminué car la source s'est tarie, on a vu apparaître des produits nouveaux, à faible solubilité et à bas prix, visant sans doute le même segment de marché.

(1) coût compétitif compte tenu des besoins à l'unité agricole produite, déduction faite d'éventuels aides ou subsides de toute nature.

VI.6. Remarque 3

Les perspectives ouvertes aux engrais non conventionnels en AFRIQUE vont dépendre de divers facteurs, en ce compris les conditions agro-climatiques, les types de culture, les qualité et disponibilité de minerais phosphatés et d'autres matières, les sources d'énergie et le transport des matières premières et produits finis.

Ce dernier point est fondamental puisqu'on est en présence de produits peu concentrés.

Un schéma de production décentralisé avec des usines petites et largement dispersées pourrait aider à maîtriser les coûts de transport.

Annexe 1. Microphotographie en surface polie du phosphate tunisien GAFSA (collection SYRES)

Cristaux de
dolomite

258-5A

320x

GAFSA

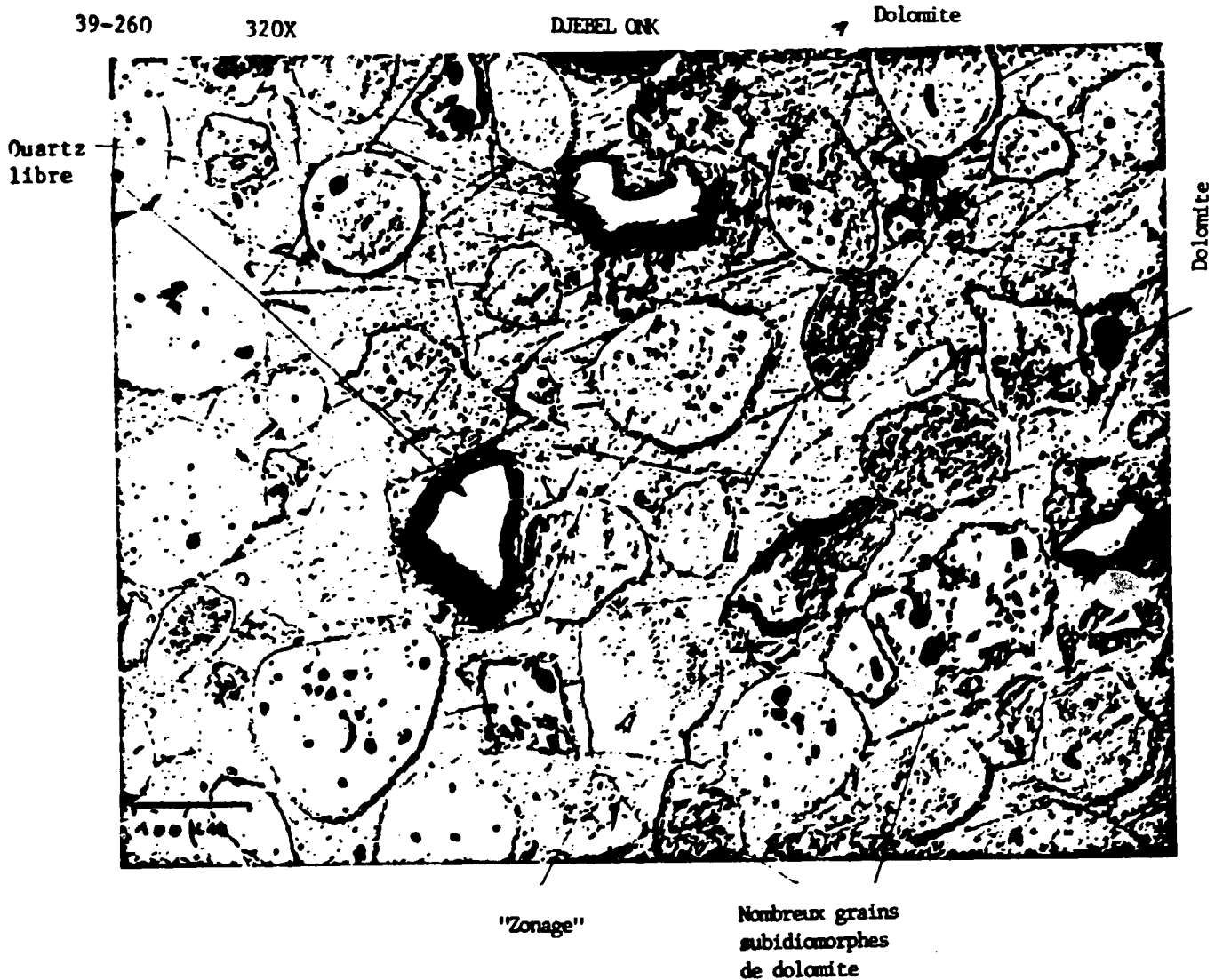


Nodules phosphatés + fossiles internes

Nodules phosphatés + matière organique

On notera qu'on se trouve en présence d'une précipitation de phosphate en nodules dans un milieu marin avec cristallisation postérieure de la dolomite par réaction d'autres éléments extérieurs au gisement.

Annexe 2. Microphotographie en surface polie du phosphate algérien DJEBEL ONK (collection SYRES)



On notera des différences importantes avec le GAFSA, qui provient cependant d'un gisement voisin.

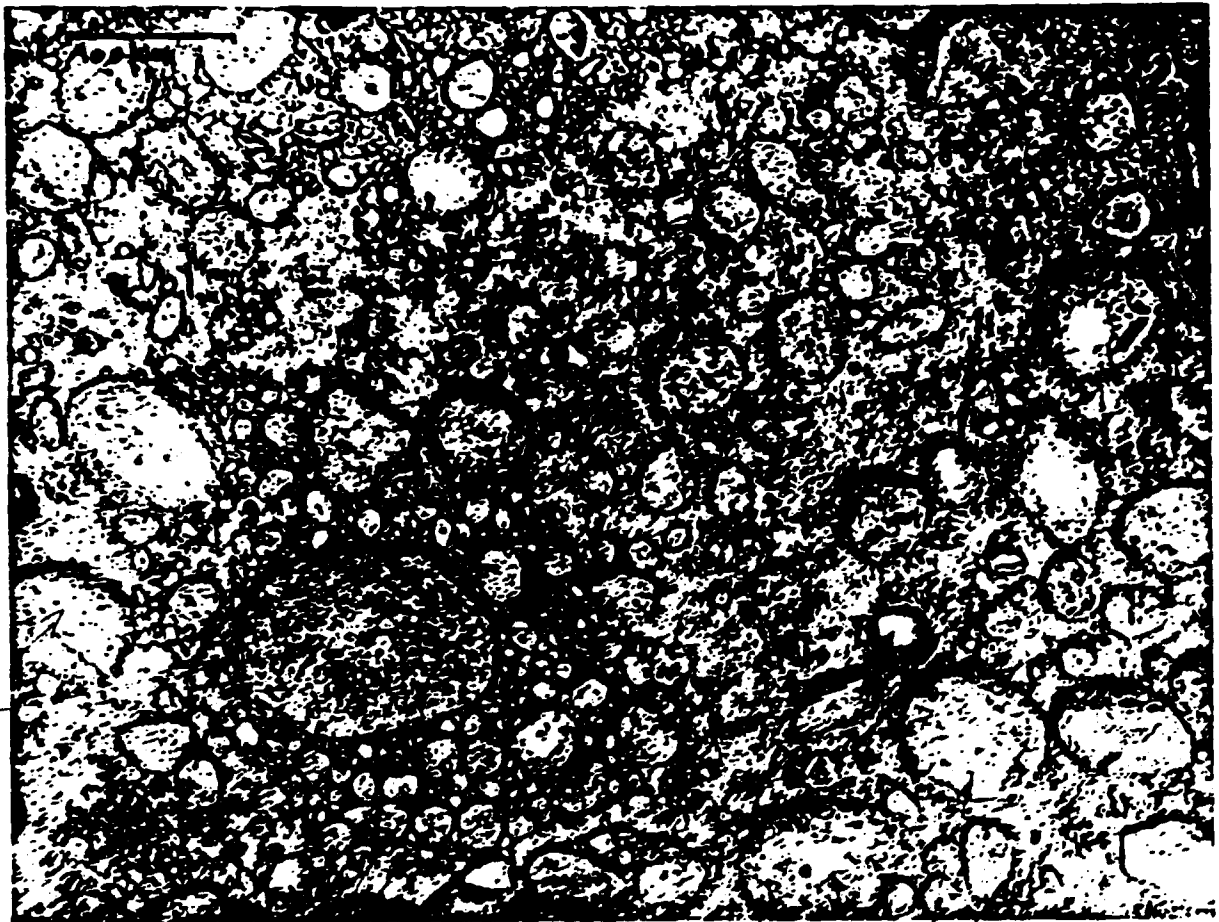
Les nombreuses rayures de polissage, la présence de grains de quartz non roulés et de nombreux grains subidiomorphes de dolomite font augurer d'une dureté plus grande que celle du GAFSA, ce qui se vérifie en pratique.

Annexe 3. Microphotographie en surface polie du phosphate marocain KHOURIBGA (collection SYRES)

259 - 14

320X

KHOURIBGA



"Zonage"

Grains de phosphate
très petits

Quartz libre

"Zonage"

On remarquera la présence d'un grand nombre de grains de phosphate très petits tandis que les grains plus gros sont en général très fortement zonés, ce qui implique des modifications radiales dans la composition minéralogique.

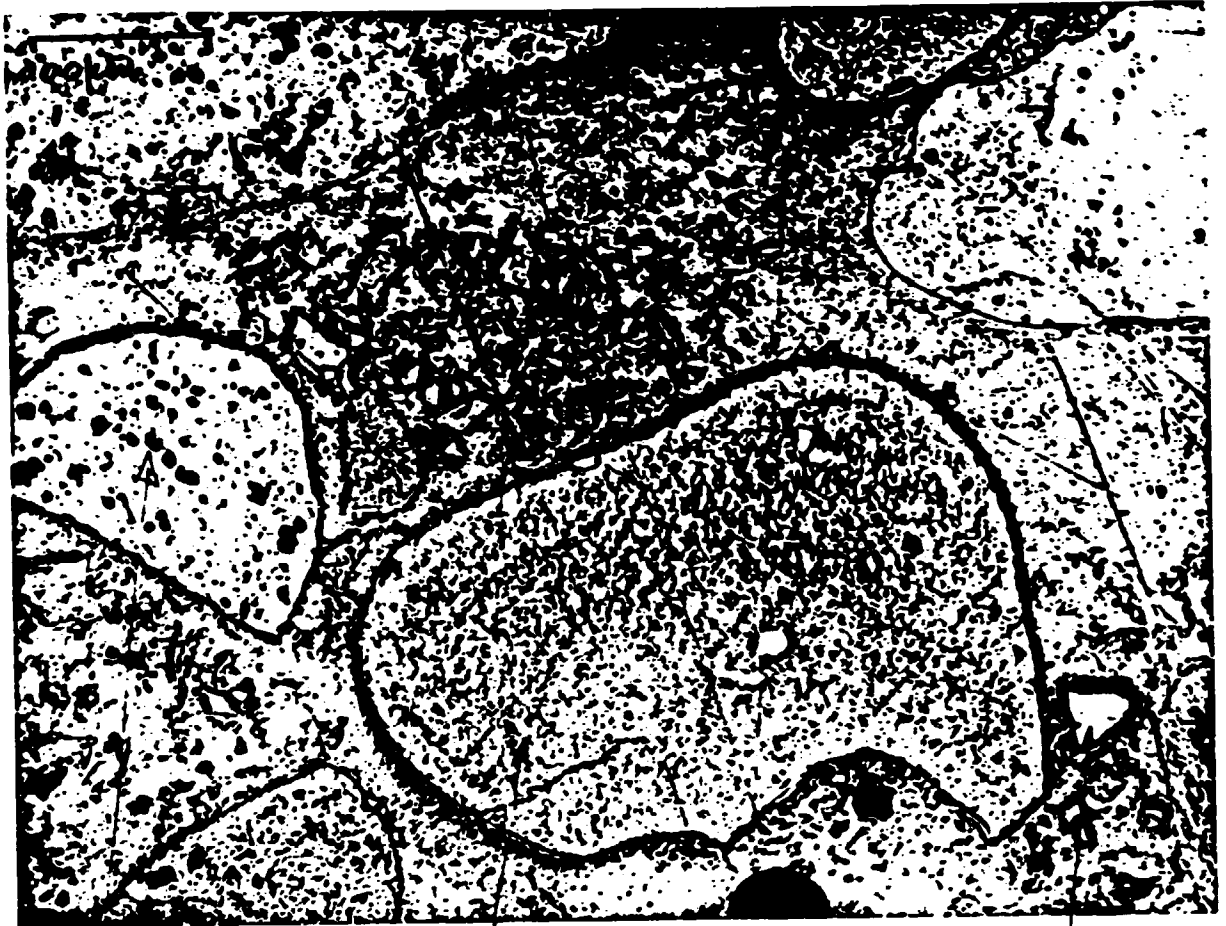
Présence de quartz libre.

Annexe 4. Microphotographie en surface polie de phosphate de
FLORIDE CENTRALE (collection SYRES)

259-20A

320x

C. FLORIDA



Surface poreuse

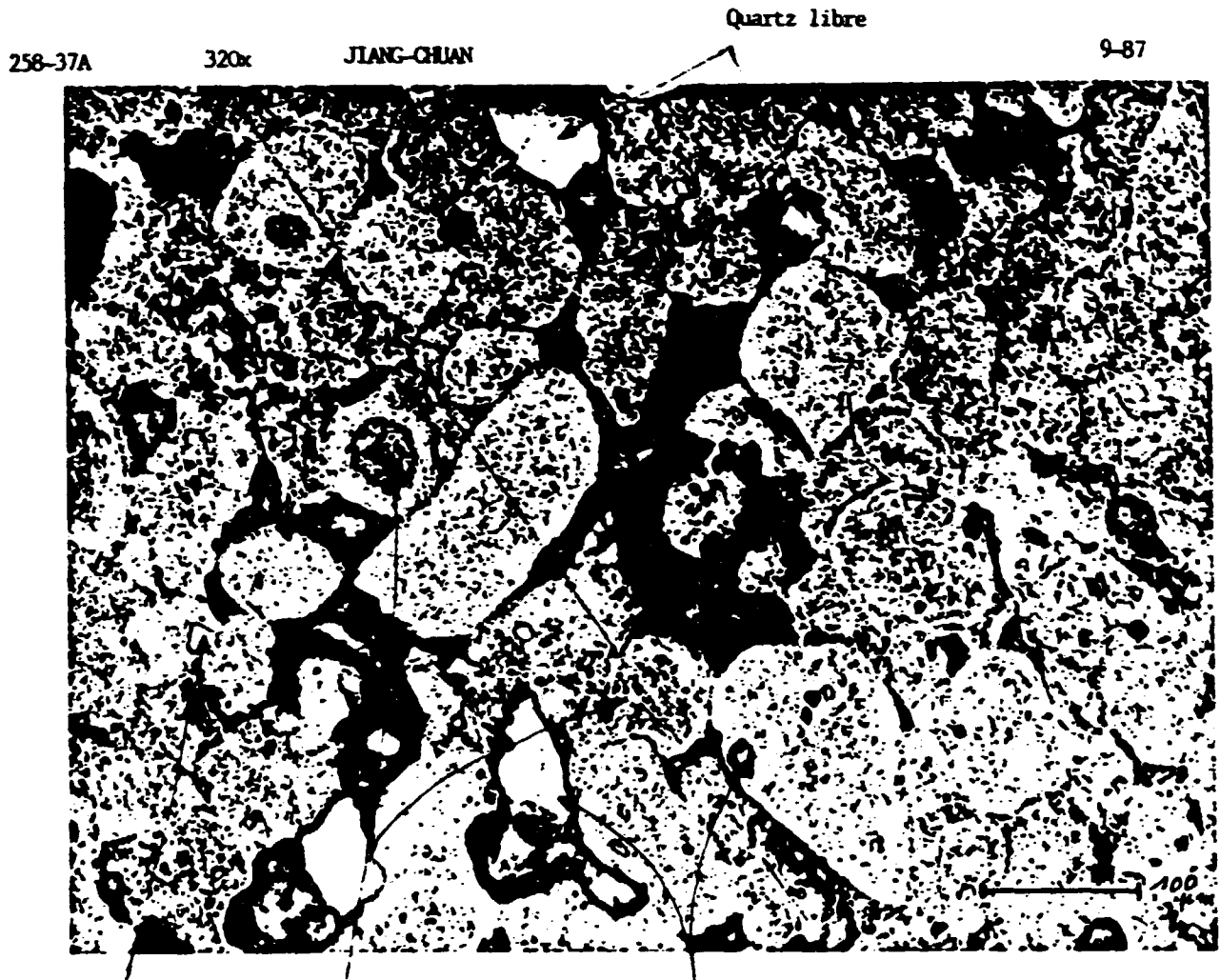
Grain de phosphate
pyritisé (points clairs
et brillants = pyrite)

Quartz libre

On remarquera que la taille des grains de phosphate est beaucoup plus grande que dans le KHOURIBGA ; cela justifie la dureté plus grande du phosphate de FLORIDE malgré une surface assez poreuse.

Présence de quartz libre et d'un remarquable grain de phosphate pyritisé

Annexe 5. Microphotographie en surface polie de phosphate
chinois JIANG - CHUAN (collection SYRES)



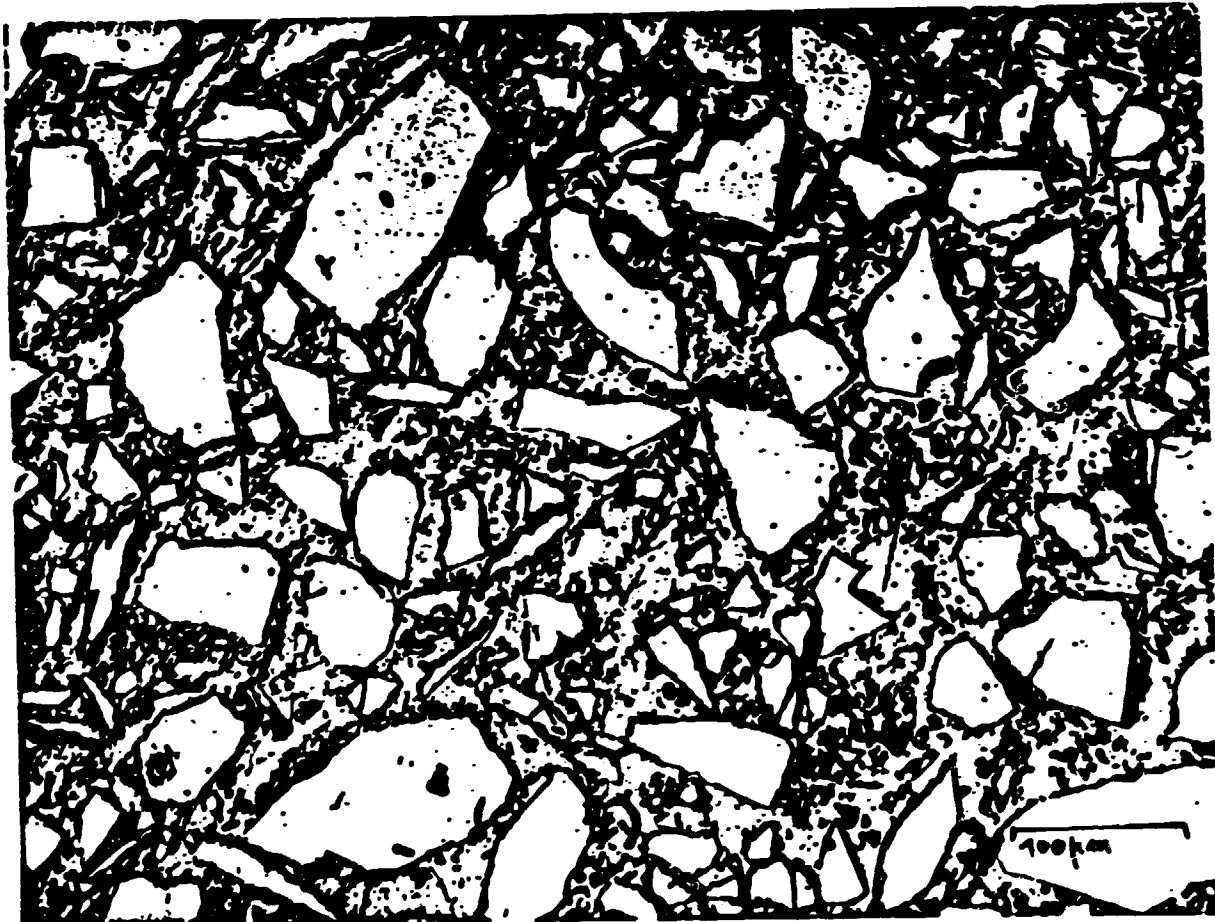
On notera que ce phosphate se présente sous forme de nodules arrondis de granulométrie très régulière (\pm 100 microns) ce qui explique la grande quantité de vides (zones noires à contours irréguliers) .
A signaler aussi la présence de quartz et de pyrite
le zonage occasionnel des nodules de phosphate.

Annexe 6. Microphotographie en surface polie de phosphate
russe KOLA (collection SYRES)

259-15

320x

KOLA



L'aspect de ce phosphate magmatique broyé est tout différent de celui des phosphates sédimentaires qui précèdent.

Il se présente sous forme de fragments anguleux de cristaux d'apatite sans trace de porosité, ce qui fait augurer une grande dureté et une faible réactivité.