

**AGENCE INTERNATIONALE DE L'ENERGIE ATOMIQUE
DIVISION DE LA COOPERATION TECHNIQUE
PROJET CUB/5/015-02**

**Solubilisation partielle des phosphates naturels de Trinidad de Guedes
et leur évaluation agronomique.**

**Rapport au Gouvernement Cubain
par TRUONG Binh
Expert de l'AIEA**

Août 1996

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS

1 - SÉMINAIRE SUR LES PHOSPHATES NATURELS

2 - RÉSULTATS DES TRAVAUX DE 1995/96

- 2.1 - Institut des sols
- 2.2 - INIFAT et INICA
- 2.3 - ISACA

3 - SOLUBILISATION DES PHOSPHATES NATURELS

- 3.1. par des bactéries
- 3.2 - par des acides minéraux

4 - EVALUATION AGRONOMIQUE

- 4.1 - Essais en petits vases
- 4.2 - Incubation
- 4.3 - Essais en grands vases
- 4.4 - Essais aux champs

5 - CONCLUSION, RECOMMANDATION

ANNEXES :

- Bibliographie
- Personnes rencontrées.



AVANT-PROPOS

Cette mission a été effectuée dans le cadre du Projet CUB/5/015-02, du 28 juin au 12 juillet 1996, à l'Institut des Sols, avec une participation à la quatrième Réunion du Réseau Latino-Américain de Phosphate Naturel, et des contacts avec l'INIFAT, INCA, INICA, ISACA.

Elle avait pour objet de discuter avec les partenaires locaux, des résultats des travaux sur la dynamique du phosphore dans les sols, l'évaluation des méthodes d'extraction chimique du phosphore assimilable, les techniques de dilution isotopique, prévus au cours de la mission de l'année dernière. Ensuite, nous avons présenté, Aurélio GARCIA et moi-même, les étapes de la mise au point des phosphates partiellement solubilisés à partir des phosphates naturels de Trinidad de Guedes. Enfin, nous essayons d'organiser un réseau d'évaluation agronomique de ces nouveaux engrais et initier une étude de préfaisabilité pour leur production à Cuba.

Je tiens à remercier très sincèrement la Direction et le Personnel de l'I.S., en particulier M. Olegario MUNIZ, et toutes les personnes des autres Instituts et des Ministères, rencontrées au cours de la mission pour leur disponibilité, les discussions franches et approfondies, et les informations précises qui m'ont beaucoup aidé pour la compréhension de la situation et la formulation des propositions.

1 - SÉMINAIRE SUR LES PHOSPHATES NATURELS

La quatrième Réunion du Réseau Latino-Américain de Phosphate Naturel (RELARF) s'est tenue au Parc des Expositions de la Havane, du 3 au 5 juillet 1996, et a réuni une quarantaine de personnes, venant surtout des organismes de recherche et de développement cubains et quelques unes de l'étranger : Brésil, Pérou, Venezuela, France.

27 communications ont été présentées, couvrant l'ensemble de la filière : la géologie et les mines, traitement des minerais et enrichissement, solubilisation et fabrication des engrais, effet des zéolithes, fertilisation des cultures, riz, canne à sucre, pins, pâturage.

Je me suis attaché à montrer l'intérêt d'une démarche participative, réunissant les fabricants et les utilisateurs des engrais, pour proposer des formes d'engrais les plus adaptées aux sols, cultures, conditions d'utilisation, plus efficaces agronomiquement, et plus économiques, en mettant l'accent sur les points suivants :

- Zonage des besoins en engrais

S'agissant d'une production d'engrais à base de phosphates locaux, il serait opportun d'élargir la gamme des produits, de régionaliser les besoins en tenant compte des caractéristiques des lieux d'utilisation.

En effet, l'efficacité agronomique des phosphates naturels, bruts ou partiellement solubilisés, dépend certes, de leurs propriétés intrinsèques, mais aussi des conditions d'utilisation, les facteurs les plus importants étant :

- Les sols : en particulier l'acidité qui solubilise les phosphates, le taux de saturation du complexe absorbant qui encaisse les produits de solubilité, la matière organique qui protège les fractions de phosphore assimilable.
- Le climat : l'humidité du sol favorise la solubilisation des phosphates, mais son excès (hydromorphie) crée des conditions réductrices qui limitent la solubilisation, d'autre part l'alternance humidification/dessiccation accélère les réactions avec le sol, en particulier la rétrogradation vers des formes moins solubles par l'inclusion dans des sesquioxides de fer et d'aluminium.
- La plante : par son système racinaire plus ou moins développé qui intercepte les ions phosphates, son rythme et son intensité d'absorption, ses exsudations qui modifient l'équilibre du milieu.

La combinaison de ces facteurs permet de définir des zones d'utilisation, par exemple:

- dans les zones ayant des facteurs favorables, sols acides, humidité suffisante, plante à absorption lente, on peut proposer des phosphates peu solubilisés donc plus économiques,
- dans les zones ayant des facteurs peu favorables, sols proches de la neutralité, humidité aléatoire, plantes exigeantes, il faudrait des produits plus solubles.

D'autres part on pourrait aussi intégrer les problèmes spécifiques de chaque zone: toxicité aluminique, salinisation, carence en phosphore, calcium, oligo-éléments dans le but de mettre au point des formules d'engrais adaptées à chaque région.

- Caractéristiques des matières premières

En Amérique Latine, les gisements de phosphates naturels sont nombreux et diversifiés :

- . de type Guano, très tendre, au Chili, Pérou...
- . sédimentaire, de qualité très différente, les plus réactifs étant Sechura (Pérou), Baja California (Mexique), Riecito (Vénézuéla),
- . magmatique très dur, comme Araxa, Jacupiranga (Brésil).

Ils possèdent donc des caractéristiques différentes selon leur type de formation et leur histoire géologique, qui induisent des possibilités d'utilisation différentes. Pour les déterminer, des analyses fines ont été réalisées.

- **Minéralogie et cristallographie**, pour connaître la composition qualitative et quantitative des minéraux : apatite, quartz, oxydes de fer et d'aluminium, calcite, dolomie, gypse... qui orientent des types d'attaque pour économiser de l'acide et éviter la formation de minéraux gênants (anhydrite, phosphate de fer). D'autre part les degrés de substitution dans les réseaux cristallins de l'apatite renseignent sur la réactivité des phosphates.

- **Composition chimique des éléments majeurs** (P, Ca, Al, Fe, Si...), oligo-éléments dont certains intéressent l'agriculture (Zn, Co, Ni, Cu...) d'autres pourraient être toxiques (F, Cl, Pb, Cd...). Les différents teneurs permettent de calculer les ratio d'attaque et la consommation d'acide.

- **Solubilité dans différents réactifs**, citrate d'ammonium neutre, acide citrique 2 % et acide formique 2 %.

Ce dernier étant le plus discriminant, il sert de norme dans la Communauté Européenne, les phosphates naturels doivent avoir au moins 55 % de P_2O_5 soluble dans l'acide formique 2% pour être utilisés en application directe.

- **Granulométrie des grains**, la dissolution des phosphates dans le sol ou l'acide dépend des surfaces de contact. Cette distribution de courbe granulométrique des grains est très importante dans les attaques partielles des phosphates. En effet la quantité d'acide ajoutée étant limitée, il faudrait qu'elle touche le maximum de particules d'une taille déterminée. La technique de préfragilisation par compactage à sec permet de casser les grains de phosphate selon les lignes de clivage des minéraux, de faire des économies sur le temps et l'énergie de broyage, d'améliorer les courbes granulométriques, et par voie de conséquence l'efficacité des attaques partielles.

- Attaque partielle des phosphates

L'objectif est d'augmenter l'efficacité des phosphates durs, peu réactifs, tout en maintenant le coût à un niveau acceptable. Il n'existe pas de principe absolu, ni de règle générale applicable dans tous les cas, nous venons de voir que cette mise au point dépend des caractéristiques des matières premières et des conditions d'utilisation.

L'attaque partielle vise à créer un effet starter avec la partie solubilisée qui va faciliter la croissance initiale de la plante et en particulier un meilleur enracinement. Comme le phosphore est très peu mobile dans le sol, plus un système racinaire est

développé mieux il intercepte et absorbe les ions phosphates, et avec le temps même la partie non attaquée serait mieux utilisée.

Il est donc très important qu'un maximum de particules de phosphate soit partiellement solubilisé pour créer une multitude d'effet starter in situ, ce qui suppose une attaque en mouvement et encore mieux en tourbillons et non une attaque en masse. Ainsi l'attaque partielle n'est pas seulement une étape inachevée de la fabrication du superphosphate, c'est une conception différente, qui demande une évaluation à chaque phase de la démarche : quel taux d'attaque pour quelle efficacité et à quel coût ?

L'expérience montre que les taux les plus intéressants, c'est-à-dire donnant de bons rapports efficacité agronomique/quantité d'acide consommée, se trouvent autour de 30 à 40 %. En effet à ces taux les acides touchent les minéraux phosphatés (apatite) mais très peu les gangues dures comme les silicates.

Les produits sont ensuite évalués en laboratoire (solubilité, composition chimique), en serre (essais en vases de végétation) et aux champs (essais en stations et en milieu paysan). Les résultats ne sont pas toujours excellents au premier coup, mais à force de patience et de perspicacité, on peut arriver à des résultats satisfaisants pour la plupart des phosphates étudiés, même pour ceux réputés inutilisables selon les techniques traditionnelles.

2 - RÉSULTATS DES TRAVAUX DE 1995-96.

Suite à la mission de l'année dernière, des travaux ont été initiés pour :

- la détermination du phosphore isotopiquement diluable (valeur L, valeur A), des sols initiaux et fertilisés avec différents types d'engrais phosphatés ;
- la mesure des facteurs de la dynamique du phosphore sur des sols vierges ou après incubation avec des phosphates, en particulier les facteurs :
 - Quantité, c'est-à-dire la valeur E en temps court
 - Intensité, la concentration en P de la solution du sol
 - Capacité, la fixation par le sol du P ajouté
 - Cinétique, la pente de la courbe d'échange isotopique.
- la comparaison des différentes méthodes de détermination du phosphore "assimilable" avec l'activité spécifique de la solution du sol.

2.1 - Institut des Sols

La station La Renée est à présent bien équipée pour travailler avec les éléments marqués, salle de manipulation isolée et contrôlée, boîtes à gants, récipients de stockage de déchets solides et liquides, serre contrôlée et isolée...

La mesure de la radioactivité (^{32}P) est effectuée à l'INIFAT, près de la Havane, qui dispose d'un compteur à scintillation liquide, en retour La Renée fait des analyses de sols pour l'INIFAT.

Trois essais en vases ont été réalisés pour la détermination de la valeur L, deux avec le sol ferrallitique rouge de la station (La Salud), concernant la comparaison des

phosphates et des mélanges de phosphates et zéolithes, un essai sur sol ferrallitique quartzite (Los Palacios) avec du riz inondé.

Les matières végétales sont récoltées, en instance de minéralisation pour le dosage de P et la mesure de radioactivité.

Un essai d'incubation sols+ engrais, a été mené en parallèle avec les vases, en vue de déterminer les facteurs de la dynamique du phosphore.

Un travail un peu similaire a été réalisé par Aurélio GARCIA, pendant son stage à Montpellier (France), sur les mêmes sols mais avec des traitements différents, un résumé des résultats est présenté dans les tableaux 1 à 4.

On constate que les trois sols sont presque neutres à basiques, relativement bien pourvus en phosphore, en calcium échangeable, avec un taux élevé de saturation en cations. A priori, ces sols ne possèdent pas une grande capacité de solubilisation des phosphates naturels.

Cependant, les résultats des facteurs de la dynamique montrent des différences intéressantes entre les sols :

- le vertisol (Nueva PAZ) possède des facteurs intensité très faible, capacité de fixation élevée, cinétique lente, à l'inverse du sol ferrallitique quartzite (Los Palacios) ;
- le sol ferrallitique rouge (La Salud) possède le facteur quantité le plus élevé, peut être lié au stock énorme de P total ;
- les deux phosphates naturels bruts induisent des changements appréciables sur les facteurs quantité et intensité, ce qui veut dire qu'ils ont été solubilisés dans une certaine mesure par les sols ;
- les phosphates partiellement solubilisés et surtout le phosphate soluble, provoquent des changements importants sur ces deux facteurs ;
- les facteurs capacité et cinétique ne semblent pas être modifiés par les traitements.

Ces résultats montrent la grande sensibilité de la technique d'échange isotopique, et permettent une meilleure compréhension des phénomènes.

TABLEAU 1 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES SOLS

	Ferrallitique Rouge (La Salud)	Ferrallitique Quartzite (Los palacios)	Vertisol (Nueva Paz)
P total en ppm	2 807	542	627
P Olsen-Dabin en ppm	41	51	31
pH	6,6	6,9	7,7
Ca éch. meq/100 g	10,9	12,0	34,4
Mg éch. meq/100 g	2,0	3,0	11,2
CEC meq/100 g	13,6	17,6	48,2
% saturation	95	89	98

TABLEAU 2 : FACTEURS DE LA DYNAMIQUE DU PHOSPHORE
DANS UN SOL FERRALLITIQUE ROUGE (LA SALUD)

Source : A. GARCIA



Traitements	Quantité E1 mg P/kg	Intensité Cp mg P/l	Capacité r1/R	Cinétique n
Sol témoin	5,41	0,013	0,024	0,338
+ PN Djebel Onk	7,77	0,021	0,027	0,326
+ PN Trinidad de Guedes	6,07	0,017	0,028	0,289
+ PN Trinidad partiel. solub. S - 40	9,54	0,021	0,022	0,336
+ PN Trinidad partiel. solub. C - 40	10,40	0,026	0,025	0,290
+ PN Trinidad partiel. solub. S - 60	7,18	0,023	0,032	0,413
+ PN Trinidad partiel. solub. C - 60	21,11	0,038	0,018	0,278
+ TSP	18,63	0,041	0,022	0,215

TABLEAU 3 : FACTEURS DE LA DYNAMIQUE DU PHOSPHORE
DANS UN SOL FERRALLITIQUE QUARTZITE (LOS PALACIOS)

Source : A. GARCIA

Traitements	Quantité E1 mg P/kg	Intensité Cp mg P/l	Capacité r1/R	Cinétique n
Sol témoin	3,63	0,077	0,212	0,326
+ PN Djebel Onk	4,97	0,091	0,183	0,282
+ PN Trinidad de Guedes	3,83	0,091	0,237	0,322
+ PN Trinidad partiel. solub. S - 40	7,01	0,122	0,174	0,311
+ PN Trinidad partiel. solub. C - 40	11,72	0,197	0,168	0,216
+ PN Trinidad partiel. solub. S - 60	12,92	0,190	0,147	0,118
+ PN Trinidad partiel. solub. C - 60	15,31	0,265	0,173	0,103
+ TSP	24,12	0,415	0,172	0,218

TABLEAU 4 : FACTEURS DE LA DYNAMIQUE DU PHOSPHORE
DANS UN VERTISOL (NUEVA PAZ)

Source : A. GARCIA

Traitements	Quantité E1 mg P/kg	Intensité Cp mg P/l	Capacité r1/R	Cinétique n
Sol témoin	3,69	0,009	0,026	0,229
+ PN Djebel Onk	6,92	0,018	0,026	0,241
+ PN Trinidad de Guedes	6,15	0,016	0,026	0,284
+ PN Trinidad partiel. solub. S - 40	8,26	0,019	0,023	0,229
+ PN Trinidad partiel. solub. C - 40	8,96	0,026	0,029	0,213
+ PN Trinidad partiel. solub. S - 60	5,76	0,015	0,026	0,157
+ PN Trinidad partiel. solub. C - 60	6,42	0,018	0,028	0,228
+ TSP	11,30	0,034	0,030	0,196

2.2. INIFAT et INCA

Dans ces deux organismes, des essais en vases avec un marquage au ^{22}P ont été réalisés pour la détermination de la valeur L :

. à l'INIFAT, avec le maïs et le soja, pour comparer la disponibilité du phosphore avec les méthodes d'extraction habituelle Oniani, Olsen, Machiguin ;

. À l'INCA, avec le riz et la tomate, pour étudier l'effet de l'inoculation des endomycorhizes, leur action de solubilisation du phosphore du sol et des phosphates naturels apportés, ou l'augmentation de la capacité d'absorption de l'association plante + mycorhizes.

Les sols ont été incubés avec les traitements, en parallèle avec les essais en crises, en vue de la mesure des facteurs de la dynamique du phosphore.

2.3. ISACA

L'Institut a travaillé sur un Ferralsol de leur station de Ciego de AVILA (Tableau 5) proche de la neutralité, relativement pauvre en phosphore assimilable et en calcium échangeable (Herrera J., 1996).

L'étude sur la dynamique du phosphore (Tableau 6) montre que le phosphate naturel de Trinidad de Guedes n'est pas solubilisé dans ce sol, contrairement à celui de Caroline du Nord, plus tendre et plus réactif, qui modifie largement les 4 facteurs de la dynamique, mieux que les phosphates partiellement solubilisés à partir des phosphates naturels de Trinidad de Guedes ou de Riecito.

Les deux facteurs, généralement très stables, comme la capacité de fixation et la cinétique d'échange, sont nettement améliorés par les phosphates tendres et solubles.

La comparaison des méthodes d'extraction chimique avec l'activité spécifique de la solution du sol (Tableau 7) permet une discrimination et un classement des méthodes.

L'extraction d'Oniani ne contient que 3 à 4 % du phosphore possédant les mêmes propriétés que les ions de la solution du sol, en particulier celle d'assimilabilité, et qu'elle extrait 96 à 97 % de phosphore immobile, donc difficilement assimilable par les plantes, dans les conditions de l'essai. Inversement, la méthode Mehlich renferme 72 à 75 % de phosphore équivalent à la solution du sol ; elle est donc la meilleure, suivie de celles de Olsen, et Bray I. (Voir Fardeau et al, 1988).

TABLEAU 5 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DU SOL

P assimilable ONIANI : 21,7 ppm

pH (eau) = 6,7

pH (Kcl) = 5,9

Ca ech. = 5,87 c-mol. Kg⁻¹

CEC = 13,0 c mol. Kg⁻¹

Matière organique : 2,04 %

Argile : 48,8 %

TABLEAU 6 : FACTEURS DE LA DYNAMIQUE DU PHOSPHORE DANS UN FERRALSOL DE CIEGO DE AVILA

Source : J. HERERA

Traitements	Quantité E1 mg P/kg	Intensité Cp mg P/l	Capacité r1/R	Cinétique n
Témoin	4,4	0,010	0,024	0,53
+ PN Trinidad de Guedes	4,5	0,013	0,029	0,54
+ PN Trinidad partiel. solub.	4,7	0,020	0,042	0,59
+ PN Riecito	4,8	0,022	0,046	0,41
+ PN Riecito partiel. solub.	4,7	0,031	0,069	0,18
+ PN Caroline du Nord	6,9	0,034	0,050	0,15
+ TSP	8,2	0,045	0,055	0,12

TABLEAU 7 : COMPOSITION ISOTOPIQUE DES DIFFERENTS EXTRAITS

Source : J. HERRERA

Méthodes chimiques	Traitement des sols	Activité spécifique		
		Solution du sol	Solution chimique	Rapport des deux (en %)
ONIANI	Témoin	38,3	1,56	4
	+ TSP	23,6	0,76	3
	+ PN	23,2	0,09	0,3
BRAY I	Témoin	60,7	21,16	33
	+ TSP	9,0	1,69	18
	+ PN	24,7	0,31	1,2
OLSEN	Témoin	1,8	0,39	22
	+ TSP	2,0	0,50	25
	+ PN	1,8	0,51	27
MEHLICH II	Témoin	51,8	39,00	75
	+ TSP	6,8	4,90	72
	+ PN	15,2	0,44	2

3. SOLUBILISATION DES PHOSPHATES NATURELS

L'année dernière, nous avons envisagé plusieurs possibilités de solubilisation des phosphates naturels de Cuba, généralement peu réactifs, par des acides organiques produits au cours des compostages, des résidus de l'industrie des jus d'agrumes, renfermant de l'acide citrique, des bactéries types *Pseudomonas*, et des acides minéraux.

Quelques tentatives ont été réalisées avec les acides organiques mais ne sont pas allées très loin, du fait des difficultés de dosage des acides par chromatographie en phase gazeuse, et de la disponibilité des résidus de jus de fruits.

Par contre, les deux autres voies ont donné des résultats intéressants.

3.1. Bactéries

Les souches ont été isolées à partir des sols rouges, *Pseudomonas fluorescens*, aérofaciens, putida... l'inoculum contient :

10 g/l de glucose
5 g/l de levure
0,2 g/l de Mg S04
0,1 g/l de Kcl
Traces de Fe S04
20 g/l d'agar

1 ml de suspension de 10^9 bactéries est rajouté à 50 ml du milieu d'inoculum.

Des études ont été réalisées sur des formes de phosphore du sol, phosphate de fer, d'aluminium, de calcium, reconstituées par réactions chimiques en laboratoire. Ces formes chimiques sont très loin de celles réellement existant dans les sols ; en effet, dans des conditions naturelles, les formes sont toujours complexes, liées à plusieurs cations, enrobés successivement par des oxydes au gré des alternances dessiccation /humidification (Conesa, 1969, Mattingly et al, 1967) ; elles sont donc bien cristallisées, compactées, incluses, moins solubles que celles récemment précipitées, simples, encore sous formes colloïdées, amorphes. Il a été suggéré de travailler directement sur des phosphates des sols.

L'étude sur le phosphate naturel de Trinidad de Guedes consiste à mélanger 50 ml de l'inoculum décrit précédemment avec 5 g de phosphate naturel contenant 27 % de P_2O_5 total, d'incuber à 30°C pendant 15 jours, avec agitation intermittente pour aérer, et à doser le phosphore dans la solution surnageante. Les résultats sont présentés au tableau 8.

Il y a effectivement un léger accroissement de solubilisation dû à l'inoculum, mais il est très faible, environ 0,2 % du P_2O_5 total ajouté au milieu, ce qui semble insuffisant pour induire un effet starter au phosphate naturel.

Les bactéries sont-elles placées en condition optima de fonctionnement ? Milieu nutritif, température, temps et surtout rapport solide/liquide ? Le rapport actuel 5 g/50 ml est irréalisable sur le plan artisanal ou semi-industriel quand on veut produire une quantité suffisante pour des essais agronomiques. En effet, 200 kg de phosphate (54 kg de P_2O_5 /ha) demanderaient 2 000 l d'inoculum.

Il faudrait imaginer d'autres systèmes de production pour inverser le rapport solide/liquide, compatible avec un coût de fabrication acceptable économiquement.

**TABLEAU 8 : SOLUBILISATION DES PHOSPHATES NATURELS
DE TRINIDAD DE GUEDES BRUT (TGB)
ET PARTIELLEMENT SOLUBILISES (TGPS)
PAR LES BACTERIES FOSFORINA**

Source : J. FERRAN



Traitements	mg de P ² O ⁵ dans 50 ml d'inoculum	Accroissement dû à l'inoculation en mg de P ₂ O ₅	% de solubilisation du P ² O ⁵ total
TGB non inoculé	3,40		
inoculé	7,13	3,73	0,26
TGPS 10 % non inoculé	4,40		
inoculé	7,13	2,73	0,21
TGPS 20 % non inoculé	5,50		
inoculé	8,19	2,69	0,22
TGPS 30 % non inoculé	7,60		
inoculé	10,30	2,70	0,22

3.2. Attaque partielle des phosphates

Les études de mise au point ont été réalisées en France sur un échantillon de 250 kg de phosphate de Trinidad de Gudes enrichi à 30 % de P₂O₅ total :

- essai de broyage en variant le temps et la charge des broyeurs, pour obtenir une proportion importante de particules autour de 100 microns ;
- analyse chimique complète des matières premières, en particulier les solubilités dans les réactifs standard, pour estimer la réactivité des phosphates ;

- solubilisation partielle, sur des lots de 35 kg de phosphate, en variant la nature des acides, leur dilution, la température des liquides, les types de mélange, le temps de maturation.

On distingue trois phases principales :

A - phase de préparation des produits avant attaque comprenant :

A-1 préparation des produits liquides (dosage, mélange, réchauffage, dilution, dissolution des produits solides ajoutés, etc...)

A-2 préparation des produits solides (dosage, mélange, broyage, etc...)

B - phase de réaction entre les produits préparés. La réaction pouvant se faire en continu, en discontinu, et dans les deux cas en étapes successives et posséder une ou plusieurs étapes de maturation des produits ou même une opération de séchage.

C - phase de mise en forme du produit pour obtenir un produit :

- . pulvérulent
- . run of pile
- . granulé
- . compacté

Les phases B et C peuvent par moment être réalisées simultanément (granulation pendant la phase d'attaque).

Pour les études de mise au point, les attaques ont été réalisées en variant :

- . la nature des acides, sulfurique, phosphorique, mixte (mélange d'acides sulfurique et phosphorique), complexe (mélange d'acide sulfurique et des sels ammoniacaux),
- . la quantité et la concentration des acides,
- . La température et les types de mélanges.

Le taux d'attaque est défini comme le pourcentage de la quantité d'acide utilisée par rapport à celle requise pour la solubilisation totale.

Les résultats sont présentés dans les tableaux 9 à 11, pour la consommation des matières, les teneurs en éléments totaux, et les solubilités dans les différents réactifs, un phosphate tendre d'Algérie (Djebel Onk) est ajouté comme terme de comparaison.

TABLEAU 9

**MISE AU POINT DES PHOSPHATES PARTIELLEMENT SOLUBILISES
A PARTIR DU PHOSPHATE BRUT DE TRINIDAD DE GUEDES**

TRAITEMENT	QUANTITES (KG)			
	PHOSPHATE BRUT	H2SO4 96 %	MAP	EAU
Att. Sulf. 40 %	35.00	8.75	-	3.50
Att. Complexe 40 %	35.00	8.75	5.00	3.50
Att. Sulf. 60 %	35.00	13.10	-	5.40
Att. Complexe 60 %	35.00	13.10	5.00	5.40

TABLEAU 10 - ANALYSES TOTALES

Echantillon	P2O5 %	CaO %	N %	MgO %	K2O %	Na2O %	Fe2O3 %	Al2O3 %	SO3 %
PN CUBA	30.60	43.57	—	0.28	0.12	0.59	2.14	3.42	1.55
PN D. ONK	28.60	48.50	—	1.70	0.14	1.27	0.38	0.57	2.70
40% SULFUR.	25.70	38.29	—	0.25	0.07	0.49	2.71	2.70	16.40
40% + MAP	29.01	35.03	1.25	0.24	0.11	0.46	2.59	2.59	15.80
60% SULFUR.	23.82	36.07	—	0.27	0.08	0.44	2.47	2.54	23.10
60% + MAP	26.97	33.56	1.17	0.32	0.13	0.41	2.39	2.39	21.80

TABLEAU 11

ANALYSE DE PHOSPHATES NATURELS ET ACIDIFIES CUBAINS

	P2O5 total en % du minerai	solubilité formique		solubilité citrique		solubilité citrate neutre		solubilité eau	
		1/2h	2h	1/2h	2h	1/2h	2h	1/2h	2h
PN CUBA	30.6	26.8	31.6	26.5	29.7	11.3	15.2	0.07	0.07
PN D.ONK	28.60	69.70	78.70	38.10	44.30	20.10	25.10	0.03	0.03
40%SULFUR	25.70	48.60	53.20	53.90	59.40	31.40	32.20	15.50	31.90
40%S + MAP	29.01	50.30	57.10	55.80	59.80	31.90	32.10	13.50	31.90
60%SULFUR	23.82	55.70	61.40	65.70	70.20	46.20	46.40	25.70	37.90
60% + MAP	26.97	63.70	67.00	68.30	72.90	51.90	52.60	46.40	47.20

Les solubilités sont exprimées en % du P2O5 total

4. EVALUATION AGRONOMIQUE

Quatre types d'essais sont prévus en coopération avec les Instituts de Recherches : INIFAT, INCA, INICA, ISACA et IS.

4.1. **essais en petits vases, avec 1 kg de sol/vase et le sorgho comme plante test**

L'objectif est d'évaluer l'interaction entre les engrais et les types de sols. Le dispositif comporterait 7 traitements :

1. Sol témoin sans phosphate
2. Phosphate brut de Trinidad de Guedes
3. Phosphate partiellement solubilisé, attaque sulfurique à 40 %
4. " " " "complexe à 40 %
5. " " " "sulfurique à 60 %
6. " " " "complexe à 60 %
7. " soluble type TSP

avec 5 répétitions soit 35 vases par type de sols

Le nombre de sols se situerait entre 10 et 15, selon un zonage agropédologique représentatif des régions potentiellement utilisatrices de ces engrais. Chaque Institut se propose de fournir 2 sols provenant de leur zone d'influence, carencés en phosphore, avec des pH différents. Le complément sera fourni par l'Institut des Sols.

Il y aurait donc entre 350 et 525 vases, installés à la Station La Renée, avec le concours des différents Instituts participant au réseau.

La dose de phosphore est fixée à 100 ppm de P soit 229 mg de P_2O_5 /vase et environ 700 à 900 mg d'engrais/vase selon leur teneur en P_2O_5 total. La consommation maximum sera de l'ordre de 60 g à 75 g par type d'engrais.

4.2. **essais d'incubations, avec 100 g de sol/vase et sans culture** en parallèle avec l'essai précédent, mêmes traitements, mêmes sols, même dose d'engrais, en vue de mesurer l'effet des traitements sur les caractéristiques des sols, en particulier le phosphore assimilable, les cations échangeables, le pH, les facteurs de la dynamique du phosphore.

La consommation maximum sera de l'ordre de 6 à 7 g par type d'engrais.

4.3. **Essais En Grands Vases de 5 Kg de Sol/vase** avec différentes plantes : maïs, riz, haricot, soja, tomate.

L'objectif est d'évaluer l'efficacité des engrais sur les principales cultures en milieu contrôlé pour éviter les accidents de végétation. Le dispositif comporterait 4 à 5 traitements, les plus indiqués en fonction des sols et des cultures, en pensant déjà aux essais aux champs qui visent les mêmes objectifs mais en conditions naturelles, avec 5 végétations, soit 20 à 25 vases par sol et par plante.

Pour chaque plante, deux types de sols sont prévus :

5 plantes x 2 types de sols = 10 essais

Le nombre total de vases serait de 200 à 250.

La dose de phosphore est fixée à 50 ppm de P soit 572,5 mg de P_2O_5 /vase x 5 répétitions = 2 862,5 mg de P_2O_5 /traitement.

Chaque plante utilise en principe un type d'engrais. La consommation pour les 2 sols sera de 5

725 mg de P_2O_5 ,	soit	22,2 g pour le S-40	
		19,7 g	C - 40
		24,0 g	S - 60
		21,1 g	C - 60

La consommation totale des engrais pour ces trois types d'essais : petits vases, incubation, grands vases, est de l'ordre de 80 à 100 g par type d'engrais.

En principe, chaque organisme réalise ses propres essais, en fonction de leur point d'intérêt et de leur priorité, en concertation avec le réseau pour rechercher les complémentarités.

4.4. Essais aux Champs

L'objectif est de réaliser au moins deux essais par culture, pour éviter de tomber sur des cas particuliers, sur des sols carencés en phosphore et, si possible, avec des pH différents.

Sols ferrallitiques quartzites à Pinar del Rio
Sols ferrallitiques rouges à La Habana, Ciego de Avila.
Sols bruns avec et sans carbonate à Holguin.
Oxisols à Camagney.

Comme pour les essais en grands vases, chaque organisme choisit ses sols et cultures, et réalise ses propres essais (tableau 12), chacun comportant 4 ou 5 traitements et 5 répétitions.

1. Sol témoin sans phosphate
2. Phosphate brut de Trinidad de Guedes
3. Phosphate partiellement solubilisé de T.G.
4. Phosphate soluble type TSP

Bilan de la consommation d'engrais :

	Disponible	Consommé	Restant
S - 40	36 kg	21,86 kg	14,14 kg
C - 40	34 kg	19,38 kg	14,62 kg
S - 60	39 kg	16,32 kg	22,68 kg
C - 60	42 kg	24,47 kg	17,53 kg

Il reste donc des quantités d'engrais pour élargir le réseau d'essais, intégrer les variabilités spatiales.

TABLEAU 12 : ESSAIS AUX CHAMPS

Cultures	Surface parcellaire par traitement	Dose d'engrais kg P ₂ O ₅ /ha	Engrais conseillé	Organismes réalisateurs	Nb d'essais	Conso d'engrais
Maïs	24 m ² x 5 répét. = 120 m ²	60	S - 60	IS	2	6,04 kg
Riz	25 m ² x 5 répét. = 125 m ²	50	S - 60	INCA, IS	2	5,24 kg
Haricot	24 m ² x 5 = 120 m ²	50	S - 60	ISACA, IS	2	5,03 kg
Tomate	24 m ² x 5 = 120 m ²	50	C - 60	INCA, IS	2	4,44 kg
P. de terre	36 m ² x 5 = 180 m ²	150	C - 60	ISACA, IS	2	20,02 kg
C. à sucre	50 m ² x 5 = 250 m ²	50	S - 40	INICA	3	14,59 kg
	“ ” “	50	C - 40	INICA	3	12,92 kg
Pâturage	25 m ² x 5 = 125 m ²	75	S - 40	IS	2	7,29 kg
	“ ” “	75	C - 40	IS	2	6,46 kg

5. CONCLUSION, RECOMMANDATIONS

La situation des engrais à Cuba reste préoccupante, la consommation actuelle ne représente que 25 à 30 % de celle de 1990, selon les éléments fertilisants. On perçoit quelques signes de reprise, en particulier pour la canne à sucre. Cette pénurie a suscité beaucoup de recherches sur les modalités d'utilisation plus efficaces, plus économiques, et sur la valorisation des ressources locales en matières fertilisantes, matières organiques, activités des micro-organismes, phosphates naturels...

L'apport des techniques isotopiques est appréciable pour la sensibilité et la précision des mesures, la possibilité de suivre les éléments dans les sols, eaux, plantes, en particulier l'évolution des engrais phosphatés et les modifications des facteurs de la dynamique du phosphore dans les sols.

Les travaux sur les phosphates naturels de Trinidad de Guedes commencent à donner des résultats intéressants. Il est possible de fabriquer des engrais partiellement solubilisés, efficaces et économiques. Un grand réseau d'évaluation agronomique est mis en place, impliquant les principaux organismes de recherche et de développement, comprenant des essais en milieu contrôlé et en plein champ, sur les principales cultures du pays. Il serait opportun de prévoir une réunion de synthèse vers la fin de 1997 pour permettre à chaque équipe de présenter leurs résultats et de les commenter, et au pouvoir politique d'examiner le bien fondé et l'intérêt de cette démarche.

Il s'agit d'une possibilité de fabriquer des engrais plus adaptés aux conditions de sols, plantes et systèmes de cultures, avec des matières premières locales : Phosphate de Trinidad de Guedes et acide sulfurique de Santa Lucia, selon une technologie simple et flexible en fonction des caractéristiques des matières premières.

Une étude de pré-faisabilité est recommandée, simultanément avec les essais agronomiques pour permettre une prise de décision concomitante :

- zonage des besoins en engrais, qualitatifs et quantitatifs ;
- proposition des types d'engrais adaptés à ces besoins ;
- organisation de la production, approvisionnement en matières premières, circuit de distribution, lieux de fabrication ;
- bilan technique et économique, sur les activités régionales, impacts sur la production agricoles et la fertilité des sols.

BIBLIOGRAPHIE

CABRERA A. El rol del fosforo en la agricultura canera Cubana. 4^e RELARF, La Habana 3 - 5/7/96, 19 p.

CONESA A.P. Etude des formes de phosphore du sol par la méthode Chang et Jackson. Science du Sol N° 1, 1969, 15-21.

FARDEAU J-C., MOREL C., BONIFACE R. Pourquoi choisir la méthode Olsen pour estimer le phosphore "assimilable" des sols : Agronomie, 1988, 8 (7), 577-584.

HERRERA J. Studies on alternative phosphorus fertilizer sources for cropping systems grown in red ferralitic soils using nuclear techniques. Progress report of IAEA coordinated programme, Feb, 1996, 6 p.

MATTINGLY G.E.G., TALIBUDEEN O. Progress in the chemistry of fertilizer and soil phosphorus. Topics in Phosphorus Chemistry vol. 4, 1967, 157 - 290.

RODRIGUEZ L., LIMA A., GIL A. Potential de minerales fosforicos en Cuba. 4^e RELARF, La Habana 3-5/7/96 6p.

SEJO O., Y OTROS. Informe sobre el beneficio de fosforitas del yacimiento Trinidad de Guedes a escala de planta piloto. CIPIMM, 1991.

TRUONG Binh. Etude de la dynamique du phosphore dans les sols et de l'efficacité des engrais phosphatés. Rapport AIEA, Projet CUB/5/015-02, Sept. 1995, 35 p.

TRUONG Binh. Proposition de nouveaux types d'engrais phosphatés, plus adaptés aux conditions des milieux d'utilisation. IV^e Réunion RELARF, La Havane, 3-5 juil. 1995, 31 p.

PERSONNES RENCONTREES**Ministère de l'Agriculture (MINAG) :**

Mmes Maria Antonia FERNADEZ, Directrice de la Science et de la Technique.
Hilda AGUILERA, Directrice des Relations Internationales.

Ministère de l'Industrie de Base (MINBAS)

Mmes Alicia LIMA, Responsable des Industries Chimiques.
Carmen RODRIGUEZ, Responsable des engrais
Maria Elena FERNANDEZ, Géologue des minéraux non métalliques (CNFG)
Marta LIZ, Traitement des minerais (CIPIMM)

Instituto Nacional de Investigaciones de la cana de Azucar (INICA)

MM. Ismael CUELLAR, Directeur
Rafael VILLEGAS, Directeur Adjoint
Mario de LEON, Chef du Département d'Agrochimie.

Instituto Superior Agrícola de Ciego de Avila (ISACA)

MM. Jose HERRERA et Ricardo RODRIGUEZ

Instituto de Suelos (IS)

MM. Ricardo DELGADO, Directeur de l'Institut
Olegario MUNIZ, Chef du Département de Fertilité des Sols
Bernardo CALERO, Chef du Département de Biologie des Sols
Antonio VANTOUR, Chef des Relations Extérieures
Mmes Graciela DUENAS, Recherche sur l'Azote, ^{15}N
Marta GONZALEZ, Recherche sur ^{14}C , ^{35}S
Lazara OTERO, Microbiologiste
MM. Aurelio GARCIA, Recherche sur le hosphore ^{32}P ,
Antonio NUVIOLA, id
Jorge FERRAN, Recherche sur la solubilisation des phosphates par les bactéries.
Rafael BARROSO, Directeur de la Station de Camaguay.

Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura Tropical (INIFAT)

M^{me} Alaida LABRADA, Chef du Département de Biophysique
M. Carlos ALVAREZ, Chef du Laboratoire des Isotopes.

Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA)

M. Regino GOMEZ, Chef du Service de fertilité des sols.

Ambassade de France

M. Emmanuel VALAYE, Attache Culturel et Scientifique