

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

**ETUDE DE LA DYNAMIQUE DU PHOSPHORE DANS LES SOLS
ET DE L'EFFICACITÉ DES ENGRAIS PHOSPHATES**

**RAPPORT AU GOUVERNEMENT CUBAIN
par TRUONG Binh
Expert de l'AIEA**

Septembre 1995

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS

1. PRODUCTION AGRICOLE

2. SITUATION DES ENGRAIS

3. PRODUCTION D'ENGRAIS

4. PHOSPHATES NATURELS

4.1. TRINIDAD DE GUEDES

4.2. CARACTÉRISTIQUES DES PHOSPHATES

4.3. ATTAQUE PARTIELLE DES PHOSPHATES

5. BIOFERTILISANTS

5.1. INSTITUT DES SOLS (IS)

5.2. INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES AGRICOLES (INCA)

5.3. INSTITUT DE RECHERCHES FONDAMENTALES EN AGRICULTURE TROPICALE (INIFAT)

6. PROPOSITIONS DE THÈMES D'ETUDE

6.1. PHOSPHATES

6.2. BIOFERTILISANTS

6.3. PHOSPHORE ASSIMILABLE

6.4. FACTEURS DE LA DYNAMIQUE DU PHOSPHORE

7. CONCLUSION

ANNEXES

. BIBLIOGRAPHIE

. PERSONNES RENCONTRÉES

AVANT-PROPOS

Cette mission a été effectuée dans le cadre du Projet CUB/5/015-02, du 9 au 23 juin 1995, à l'Institut des Sols (IS), avec des visites à l'INIFAT, l'INCA, au gisement de phosphate de Trinidad de Guedes, à l'usine d'engrais de RAYONITRO à Matanzas, et des contacts avec le CIQ, le CNFG, l'ISACA (voir en annexe les personnes rencontrées).

Elle avait pour objet de discuter avec les partenaires locaux, sur les problèmes de fertilité et fertilisation des sols, en particulier phosphatée, pour améliorer la production agricole, par la valorisation des ressources locales en matières fertilisantes, et de définir les protocoles d'essais au laboratoire, en serre et au champ, utilisant des isotopes, concernant la dynamique du phosphore, l'évaluation des engrais phosphatés, les interactions phosphore-azote-matière organique.

Je voudrais remercier très sincèrement la direction et le personnel de l'IS, pour leur accueil très amical, leur disponibilité, en particulier MM. Olegario MUNIZ, Aurelio GARCIA, et toutes les personnes rencontrées au cours de la mission pour leur franche coopération. Il y a eu un vrai échange, et je garde un bon souvenir, motivant, d'ouverture d'esprit, de conviction, d'espoir et de gaieté de vivre, malgré les difficultés que je souhaite transitoires.

1. PRODUCTION AGRICOLE

L'agriculture reste le secteur d'activité le plus important à Cuba, elle représente 62 % du produit national brut (Atlas Eco, 1995), elle est diversifiée malgré la place toujours prépondérante de la canne à sucre (tableau 1). Cette production a beaucoup baissé ces dernières années, passant de 76 millions de tonnes en 1990 à 39 millions en 1994, soit une diminution de 49 %, mais paradoxalement, pas au profit des autres cultures, comme les cultures vivrières.

En effet, (tableau 2), on constate pour la même période que les céréales ont baissé de 49 %, les légumes de 18 %, les fruits de 14 %, les racines et tubercules, haricots secs, demeurent stables. Cette baisse quasi générale de la production agricole est préoccupante pour l'alimentation humaine, sans parler de l'économie en général. Elle touche non seulement les surfaces cultivées, mais aussi les rendements à l'hectare, c'est à dire les facteurs de production, et en particulier les engrais.

2. SITUATION DES ENGRAIS

Tous les postes ont baissé ces dernières années, production, importation, consommation (tableaux 3 et 4), accusant une diminution globale de 63 %, touchant différemment les éléments majeurs : Azote (- 48 %), Phosphore (- 76 %), Potassium (-83 %). Un bilan rapide et partiel, entre les apports d'engrais et les exportations des cultures donne les résultats suivants :

	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	TOTAL
Apports d'engrais	192000	20700	36500	249200
Exportation des cultures	57663	29726	113766	201155
Bilan partiel	+ 134337	- 9026	- 77266	+ 48045

Le bilan global est encore positif, ce qui est rassurant mais il cache des réalités difficilement chiffrables comme les pertes pour volatilisation (azote), lessivage, lixiviation, érosion, (pour tous les éléments). Inversement, ce bilan ne tient pas compte des restitutions des résidus de récoltes et des apports d'engrais organiques. Synthétiquement le bilan reste positif pour l'azote, déficitaire pour le phosphore, déficitaire aussi pour le potassium mais moins grave que ne le laissent penser les chiffres si on tient compte des restitutions des récoltes, en particulier les feuilles de canne à sucre et les résidus des industries agro-alimentaires, riches en potassium.

TAB 1 - CUBA : PRODUCTION AGRICOLE EN 1994
SOURCE : ANNUAIRE FAO DE PRODUCTION 1994

Principales cultures	Surface 1000 ha	Rendements Kg/ha	Production 1000 T
CEREALES	156	1776	277
dont riz	78	2385	186
maïs	77	1169	90
RACINES et TUBERCULES	151	4914	744
dont manioc	70	4131	290
patate douce	54	3704	200
pomme de terre	14	15319	216
HARICOTS SECS	77	344	26
ARACHIDES	13	1000	13
LEGUMES ET MELONS			484
dont tomate	28	7143	200
courges	25	1786	45
concombres	14	2593	36
melons	7	4444	32
poivons	4	2593	36
oignons	4	4186	8
CANNE A SUCRE	1100	35455	39000
CAFE	90	233	21
CACAO	9	235	2
TABAC	50	884	44
JUTE	10	1000	10
SISAL	5	1340	7
FRUITS			1324
dont orange			433
pamplemousse			317
citron			60
tangerine			15
mangue			84
ananas			21
avocat			9
banane			180
plantain			115
papaye			30

**TAB. 2 - CUBA : VARIATION DEPUIS 1990 DE QUELQUES PRODUCTIONS
AGRICOLES**

SOURCE : ANNUIRES FAO 1993 et 1994

PRINCIPALES CULTURES		SURFACE 1000 ha	RENDEMENT Kg/ha	PRODUCTION 1000 T
Céréales	1990	219	2480	543
	1992	188	2149	404
	1994	156	1776	277
Racines et tubercules en	1990	158	4835	764
	1992	156	5228	813
	1994	151	4914	744
Haricots secs	1990	74	351	26
	1992	73	342	25
	1994	77	344	26
Canne à sucre en	1990	1350	56467	76230
	1992	1550	37419	58000
	1994	1100	35455	39000
Légumes en	1990			585
	1992			583
	1994			484
Fruits en	1990			1535
	1992			1478
	1994			1324

TAB 3 - CUBA - SITUATION DES ENGRAIS (En milliers de T d'unités fertilisantes)

SOURCE : Annuaire FAO 1993

ANNEES	PRODUCTION	IMPORTATION	CONSOMMATION
1989/90	161	538	661
1990/91	147	436	580
1991/92	127	238	365
1992/93	106	143	249

CONSOMMATION DES ENGRAIS (En de T d'unités fertilisantes)

SOURCE : Annuaire FAO 1993

ANNEES	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1989/90	366 700	83 000	211 700
1990/91	283 000	82 000	215 000
1991/92	240 000	65 000	60 000
1992/93	192 000	20 700	36 500

TAB. 4 - SITUATION DES ENGRAIS PHOSPHATES (en T de P₂O₅)**SOURCE : Annuaire FAO 1993**

	PRODUCTION	IMPORTATION	CONSOMMATION
1989/90	14 899	72 925	83 000
1990/91	7 000	75 000	82 000
1991/92	7 000	58 000	65 000
1992/93	6 000	14 700	20 700

CUBA : SITUATION DES PHOSPHATES NATURELS (en milliers de T)**SOURCE : Annuaire FAO 1993**

	PRODUCTION	IMPORTATION
1989/90	50	8
1990/91	50	13

**TAB. 5 - CUBA : EXPORTATION DES ELEMENTS NUTRITIFS PAR LES
PRINCIPALES CULTURES
SOURCE : INCA 1994**

CULTURES	PRODUC. 1000 T	UNITES FERTILISANTES EN T			
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	TOTAL
Riz	186	2 604	818	2 976	6 398
maïs	90	2 520	900	2 790	6 210
Manioc	290	580	464	2 494	3 538
Pomme de Terre	216	842	388	1 749	2 979
Patate douce	200	1 000	300	500	1 800
Haricots secs	26	1 209	270	1 222	2 701
Arachide	13	663	117	312	1 092
Tomate	200	440	180	1 120	1 740
Courges	45	810	58	117	985
Poivrons	51	224	51	423	698
Concombres	36	648	46	93	787
Oignons	18	46	23	72	141
Orange	433	3 593	779	5 022	9 394
Pamplemousse	317	2 631	570	3 677	6 878
Autres citrus	80	664	144	928	1 736
Mangues	84	109	50	193	352
Ananas	21	56	15	142	213
Banane	180	324	90	1 170	1 584
Plantain	115	230	69	851	1 150
Papaye	30	90	30	105	225
Canne à sucre	39 000	35 100	23 400	81 900	140 400
Tabac	44	2 860	880	5 280	9 020
Café	21	420	84	630	1 134
TOTAL	41 696	57 663	29 726	113 766	201 155

3. PRODUCTION D'ENGRAIS

Elle était importante dans les années quatre vingt, plus de 300.000 T/an, concentrée surtout à Matanzas, La Regla (dans le port de la Havane), Felton (Holguin) pour les engrais complexes et les mélanges , et à Novitas et Cienfuego pour les engrais azotés.

La baisse de la production est imputable à plusieurs causes :

☞ L'épuisement de la mine de phosphate de La Pimienta (Pinar del Rio), exploitée depuis 1975, pour alimenter l'usine de superphosphate de la Regla, capacité 70.000 T/an, qui utilisait aussi l'acide sulfurique fabriqué avec la pyrite de Santa Lucia, province de Pinar del Rio aussi.

Le procédé de fabrication a été mis au point pour les phosphates de la Pimienta, et rencontre des difficultés pour s'adapter à d'autres phosphates. L'usine est arrêtée actuellement.

Elle est bien située dans le port de La Havane, ce qui facilite l'approvisionnement en matières premières et la distribution des produits finis dans une province grosse consommatrice d'engrais ; il faudrait transformer la chaîne de fabrication vers une plus grande souplesse, diversification des sources de phosphates, élargissement de la gamme des produits, phosphates bruts réactifs broyés finement, phosphates partiellement solubilisés à différents taux d'attaque en fonction des besoins, ce qui permettrait d'augmenter la production avec la même quantité d'acide disponible, et de diminuer la consommation d'énergie, et le prix de revient.

☞ L'accroissement du prix des matières premières importées, comme le naphta pour la production d'urée et du nitrate d'ammonium, plus élevé que celui des produits finis. Dans ces conditions il est plus économique d'importer de l'urée et du sulfate d'ammonium, d'autant plus que les sources d'énergie à Cuba sont limitées (pétrole, gaz, électricité).

☞ L'insuffisance des devises pour importer des engrais simples pour les mélanges et la faiblesse des commandes des Ministères utilisateurs d'engrais, à cet égard la situation de l'usine de Rayonitro est exemplaire.

RAYONITRO

L'usine d'engrais complexes est située dans le port de Matanzas, où de gros bateaux peuvent accoster (200.000 T).

A l'origine, en 1948, elle était destinée à la fabrication de la soie artificielle (rayonne) d'où le nom, avec une unité d'acide nitrique, capacité 120 T/jour soit 30.000 T/an et d'acide sulfurique, 70 T/jour soit 20.000 T/an à partir des pyrites de Santa Lucia.

Dans les meilleures années, elle produisait 360.000 T d'engrais complexes, avec 3 systèmes différents :

- . Système PEC Engineering, phospho et sulfonitrique, pour les formules 12-8-24 et 14-6-18.
- . Système TVA granulation humide, pour les formules 9-13-18 et 10-12-24.

. Système soviétique combiné granulateur-sécheur, pour les formules 14-6-18, 14-6-20 et 12-8-18.

En 1994, la production était de 27.000 T, par manque de matières premières et de commande. En effet, les matières premières sont importées par les utilisateurs comme les Ministères de l'Agriculture, de la Canne à Sucre, qui commandent à l'usine de fabriquer des formules.

En moyenne, pour 1 T de produit fini, l'usine consomme :

- . 325 kg d'acide nitrique
- . 76 kg d'acide sulfurique
- . 90 kg d'ammoniac
- . 321 kg de chlorure de potassium
- . 201 kg de phosphate naturel

Le prix de revient du 14-6-18 est de 252 pesos/T.

Comme pour la Regla, il faudrait modifier les chaînes de fabrication pour produire des phosphates partiellement solubilisés, en plus grande quantité avec les mêmes disponibilités en acides.

Le démarrage de l'exploitation du gisement de phosphate de Trinidad de Guedes, dans la même province, constitue un atout important, pour la proximité et l'économie en devises.

Après ce tour d'horizon et compte-tenu de la situation économique du pays, l'amélioration de la nutrition des plantes passerait par :

- . la valorisation des ressources locales en matières fertilisantes, essentiellement phosphates naturels, matières organiques et biofertilisants,
- . une pratique de fertilisation plus adaptée aux besoins des plantes et des sols, basée sur un zonage pédoclimatique et système de cultures, et une mise au point des produits efficaces,
- . une coordination des recherches entre les différents instituts pour mieux utiliser le potentiel humain et les moyens disponibles, en fixant des objectifs précis, réalistes et une démarche commune, pour la mise au point des produits efficaces, leur évaluation agronomique et économique, l'organisation des réseaux de démonstration, le contrôle de l'impact des fertilisants sur le milieu.

4. PHOSPHATES NATURELS

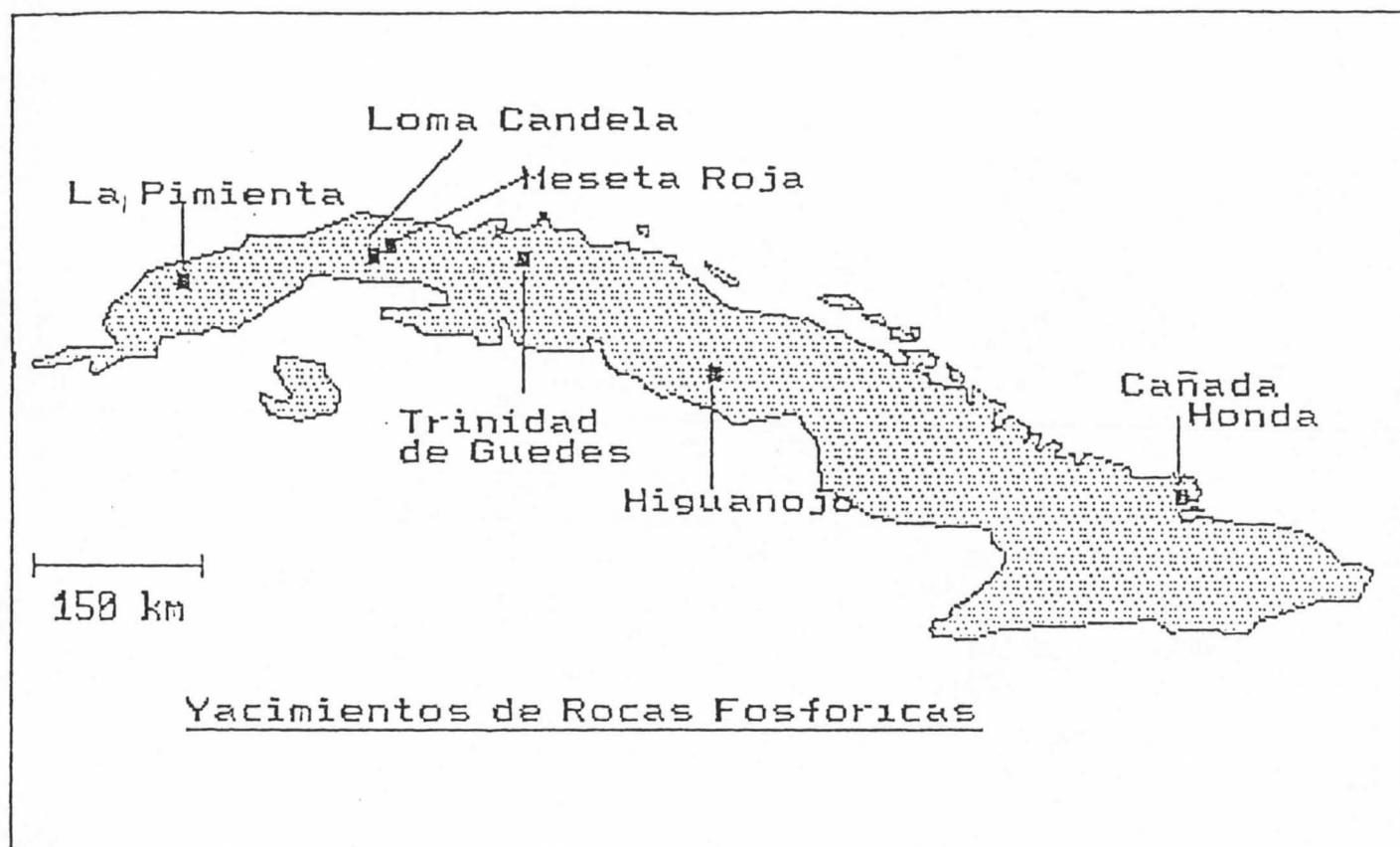
Les réserves sont importantes (tableau 6) et bien distribuées sur l'ensemble du pays (figure 1), pouvant couvrir les besoins pendant un siècle. Mais elles sont peu exploitées, à part La Pimienta, depuis 1975 et en voie d'épuisement, Trinidad de Guedes fait l'objet d'étude détaillée sur le gisement et les possibilités d'enrichissement des minerais, 3.000 T ont été envoyés à Santa Lucia pour les tests à l'échelle d'unité pilote.

TAB. 6 - CUBA : RESERVES EN PHOSPHATE NATUREL

SOURCE : M.E. FERNANDEZ 1994

GISEMENT, PROVINCE	RESERVES		TENEUR EN %		
	Catégorie	1000 T	P ₂ O ₅	CaO	R ₂ O ₃
La Pimienta, Pinar del Rio	prouvé	223	20,9		4,8
	probable	153	23,8		10,9
Meseta Roja, La Habana	possible	22473	7,3	44,8	3,3
Loma Candela, La Habana	prouvé	294	8,0	39,2	2,3
	probable	25	9,2	39,2	2,4
Trinidad de Guedes, Matanzas	prouvé	294	23,6	20,4	11,7
	probable	169	22,3	43,0	13,2
	possible	475	20,3	24,8	6,5
Higuanogo, S. Spiritus	prouvé	110	3,0	45,8	
	probable	134	3,0	46,2	
Canada Honda, Holguin	prouvé	209	3,1	47,3	5,5
	probable	1980	3,1	48,2	5,1
	possible	6451	3,1	48,3	5,9

FIG. 1 : Gisements de Phosphates Naturels à Cuba
(M.E. FERNANDEZ , 1994)



Les autres gisements sont identifiés mais peu étudiés, du fait de leurs faibles teneurs en P_2O_5 , qui requièrent de lourds investissements pour les enrichir. Cependant l'expérience de Trinidad de Guedes, et sa réussite économique (espérons-le) devraient inciter à plus d'initiatives.

Une autre voie mérite aussi une attention particulière, concernant les phosphates de type Guano (dépôts d'excréments d'oiseaux de mer), identifiés au début du siècle sur les îles Avalos, Cantiles, Largo, Romano, et sur la côte de Cienaga de Zapata (Fernandez, 1994), qui sont généralement très tendres et réactifs, pouvant être utilisés directement avec une efficacité équivalente aux superphosphates. De nouvelles prospections sont à encourager, même pour des gisements de faible dimension car une exploitation de type artisanale est plus adaptée et plus économique.

4.1. Trinidad de Guedes

Le gisement a été trouvé en 1980, suite à une prospection aérienne qui a décelé des anomalies géologiques dans la région. L'étude détaillée consiste en un maillage de 25 x 25 m et des forages jusqu'à 11 m de profondeur, analyses des échantillons et estimation des réserves.

Il se présente sous forme de lentilles de phosphates tricalciques altérés, mélangés à un sol ferrallitique rouge, friables, pulvérulents, avec une faible couverture : 40 cm à l'Est, 3m à l'Ouest.

Il est divisé en 10 blocs selon les teneurs en P_2O_5 :

- . Un bloc avec 450.000 T de réserve à 20 % de P_2O_5 , qui sera exploité dans un premier temps, 65.000 T/an de brut pour produire 50.000 T/an d'enrichi à 28-30 % de P_2O_5 .
- . Les autres blocs représentent 2.000.000 de T de réserve à 13-14 % de P_2O_5 .
- . Des mélanges de phosphate et de carbonate de calcium, environ 1.000.000 T à 9-12 % de P_2O_5 .

L'usine d'enrichissement est construite à côté du gisement, avec 500.000 \$ US d'investissement, et devrait démarrer cette année. Le phosphate brut est concassé, désagrégé, puis lavé à l'eau (75 m³/ha), séparé par granulométrie :

- . Les fines < 74 microns, 30 % en poids, sont hydrocyclonnées et jetées, elles contiennent 5 % de P_2O_5 .
- . L'autre fraction, grossière, 70 % en poids, est décantée, séchée et broyée, elle contient 28-30 % de P_2O_5 et 3 % d'humidité. Le taux de récupération est de 65 %.

Le prix de revient du phosphate enrichi est estimé à 27,6 \$/T au taux de 1 peso = 1 dollar, ce qui signifie qu'en réalité il est nettement moins élevé, en particulier si on le compare avec celui du marché international : 1 \$ par % de P_2O_5 , FOB. Ce phosphate est donc très compétitif à Matanzas.

4.2. Caractéristiques des phosphates

Nous avons analysé deux séries d'échantillons, la première lors de la visite de M. José HERRERA à Montpellier en avril 1995 (tableaux 7 et 8), et la deuxième lors de la mission à Cuba en juin (tableaux 9 et 10).

Il semble que la première série corresponde à des phosphates bruts et la deuxième à des phosphates enrichis, les différences entre échantillons de la même série étant dues à des variabilités dans les prélèvements.

L'enrichissement a amélioré nettement les teneurs en P_2O_5 et CaO, et diminué celles en Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 , mais pas suffisamment pour permettre la fabrication des engrais à hautes teneurs dans des conditions optima. Par contre il serait possible de fabriquer des phosphates partiellement solubilisés dans des conditions acceptables sur le plan technologique et économique.

Les mesures de solubilité dans différents réactifs (tableaux 8 et 10) montrent que ce sont des phosphates durs. La solubilité formique est de 30 à 40 % (la norme européenne est fixée à 55 %) par conséquent ce sont des phosphates difficilement utilisables en application directe, il faudrait alors des sols très acides, une pluviométrie abondante, et des cultures à absorption lente et longue. Pour les autres situations il faut créer un effet starter par des solubilisations partielles pour espérer une efficacité agronomique intéressante.

4.3. Attaques partielles 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.

4.3.1. Considérations agronomiques

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 phosphatés, 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 tourbillon 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 ?

TAB. 7 - CUBA : PHOSPHATE NATUREL DE TRINIDAD DE GUEDES
 ECHANTILLONS ENVOYES PAR GARCIA-HERRERA (Avril 1995)
 Composition chimique en % du minerai

	ECHANTILLONS	
	N° 1	N° 2
P ₂ O ₅	19,96	18,03
CaO	25,55	27,70
MgO	0,36	0,33
K ₂ O	0,19	0,17
Na ₂ O	0,60	0,51
Fe ₂ O ₃	8,21	7,86
Al ₂ O ₃	16,09	15,03
SiO ₂	16,11	16,73
SO ₃	0,95	0,95

TAB. 8 - CUBA : PHOSPHATE NATUREL DE TRINIDAD DE GUEDES

SOLUBILITES EN % du P₂O₅ TOTAL

SOLUTION D'EXTRACTION	ECHANTILLONS			
	N° 1		N° 2	
	30 mn	2 h	30 mn	2 h
Eau	0,18	0,20	0,18	0,25
Citrate d'ammonium neutre	15,80	26,60	15,14	24,40
Acide citrique 2 %	46,23	53,77	44,26	51,03
Acide formique 2 %	42,10	47,76	40,54	45,42

TAB. 9 - CUBA : PHOSPHATE NATUREL DE TRINIDAD DE GUEDES
Echantillons prélevés au cours de la mission (juin 1995)
Composition chimiques en% du minerai

	ECHANTILLONS	
	BRUT	ENRICHI
P ₂ O ₅	25,21	27,79
CaO	37,84	41,66
MgO	0,33	0,30
K ₂ O	0,13	0,16
Na ₂ O	0,52	0,57
Fe ₂ O ₃	6,66	4,54
Al ₂ O ₃	5,88	4,11
SiO ₂	12,10	10,15
SO ₃	1,03	1,40
CO ₂	3,56	3,78

**TAB. 10 - CUBA : PHOSPHATE NATUREL DE TRINIDAD DE GUEDES
SOLUBILITES EN % DU P₂O₅ TOTAL**

Solutions d'extraction	Phosphate brut		Phosphate enrichi	
	1/2 h	2 h	1/2 h	2 h
Eau	0,08	0,09	0,06	0,06
Citrate d'ammonium neutre	24,85	26,03	10,56	15,39
Acide citrique 2 %	31,25	36,48	28,96	33,19
Acide formique 2 %	30,98	34,43	28,66	31,71

4.3.2. Considérations technologiques

On distingue trois phases principales (fig. 3, 4, 5) :

A. Phase de préparation des produits avant attaque comprenant :

- A1 . Préparation des produits liquides (dosage, mélange, réchauffage, dilution, dissolution des produits solides ajoutés, etc...).
- A2. Préparation des produits solides (dosage, mélange, broyage, etc...).

B. Phase de réaction entre les produits préparés. La réaction peut se faire en continu, en discontinu, et dans les deux cas en étapes successives et doit 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 faisant varier :

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

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

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.

Nous avons besoin de 200 kg de phosphate enrichi de Trinidad de Guedes et d'un petit crédit pour la mise au point de ces produits.

FIG. 3 - PHASE DE PREPARATION DES PRODUITS SOLIDES

Phase de préparation des produits solides

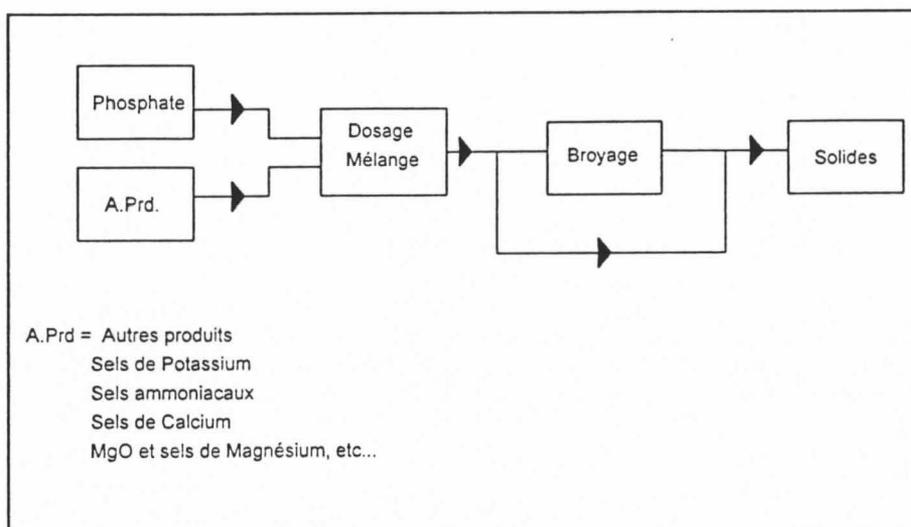


FIG. 4 - PHASE DE PREPARATION DES PRODUITS LIQUIDES

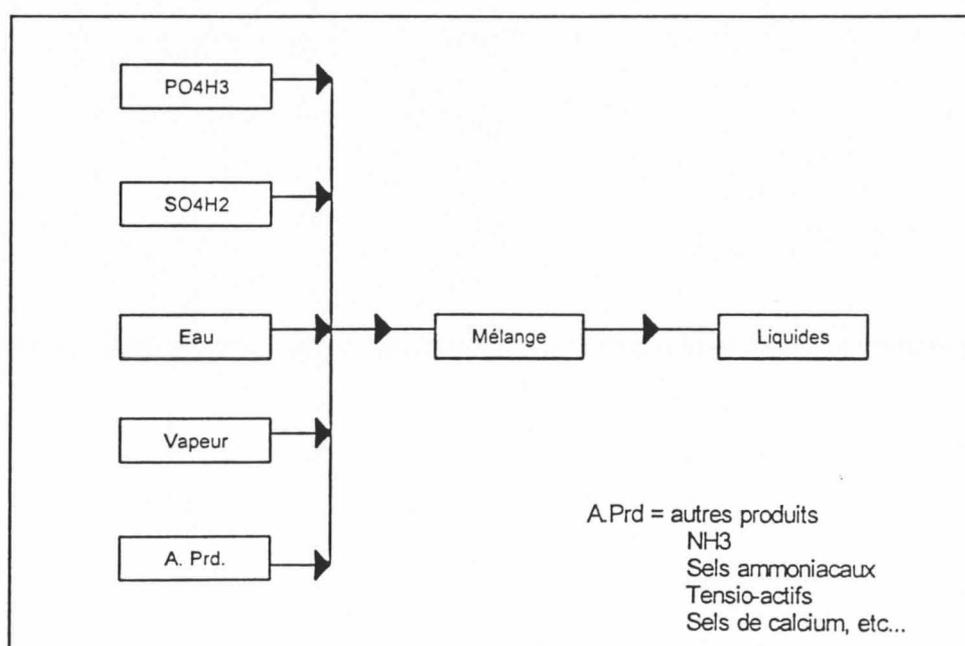


FIG. 5 - SOLUBILISATION ET GRANULATION

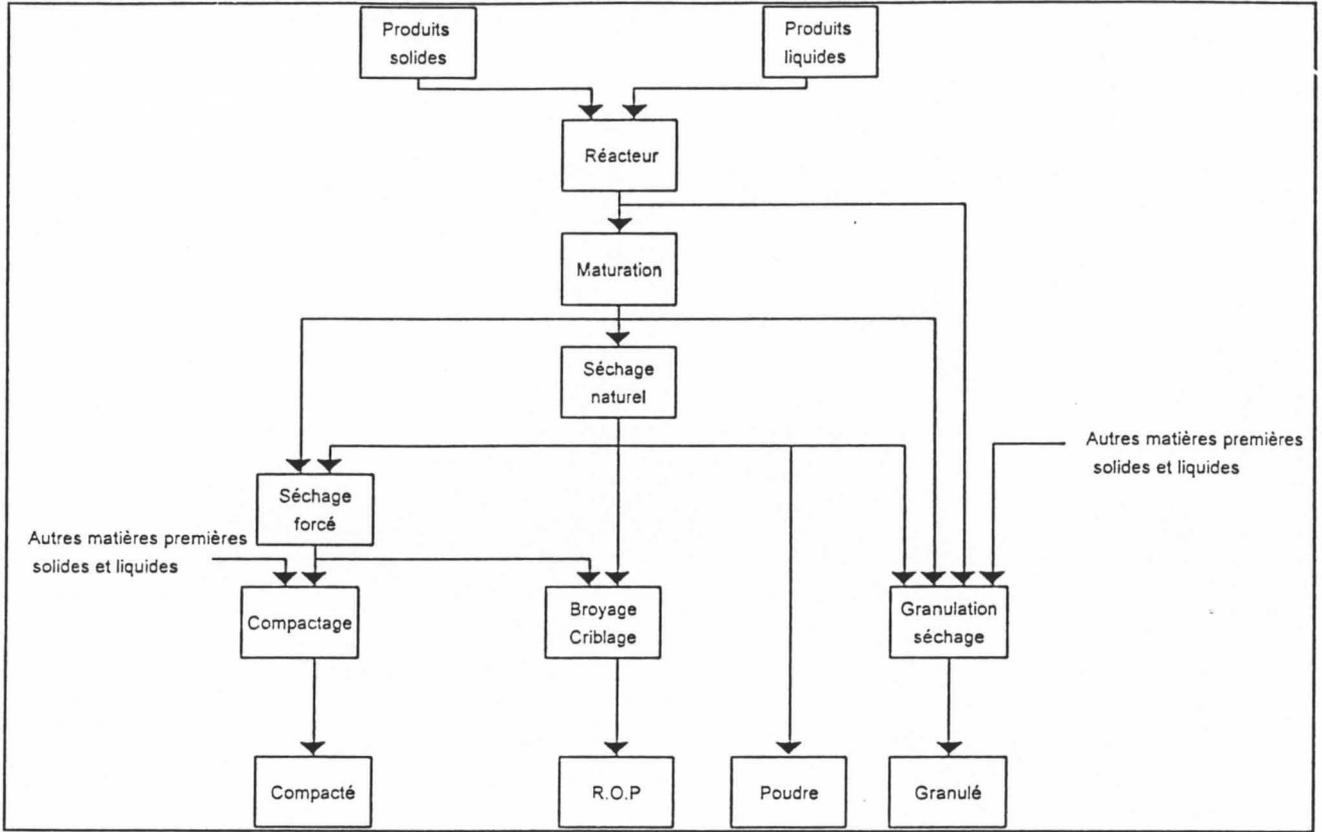
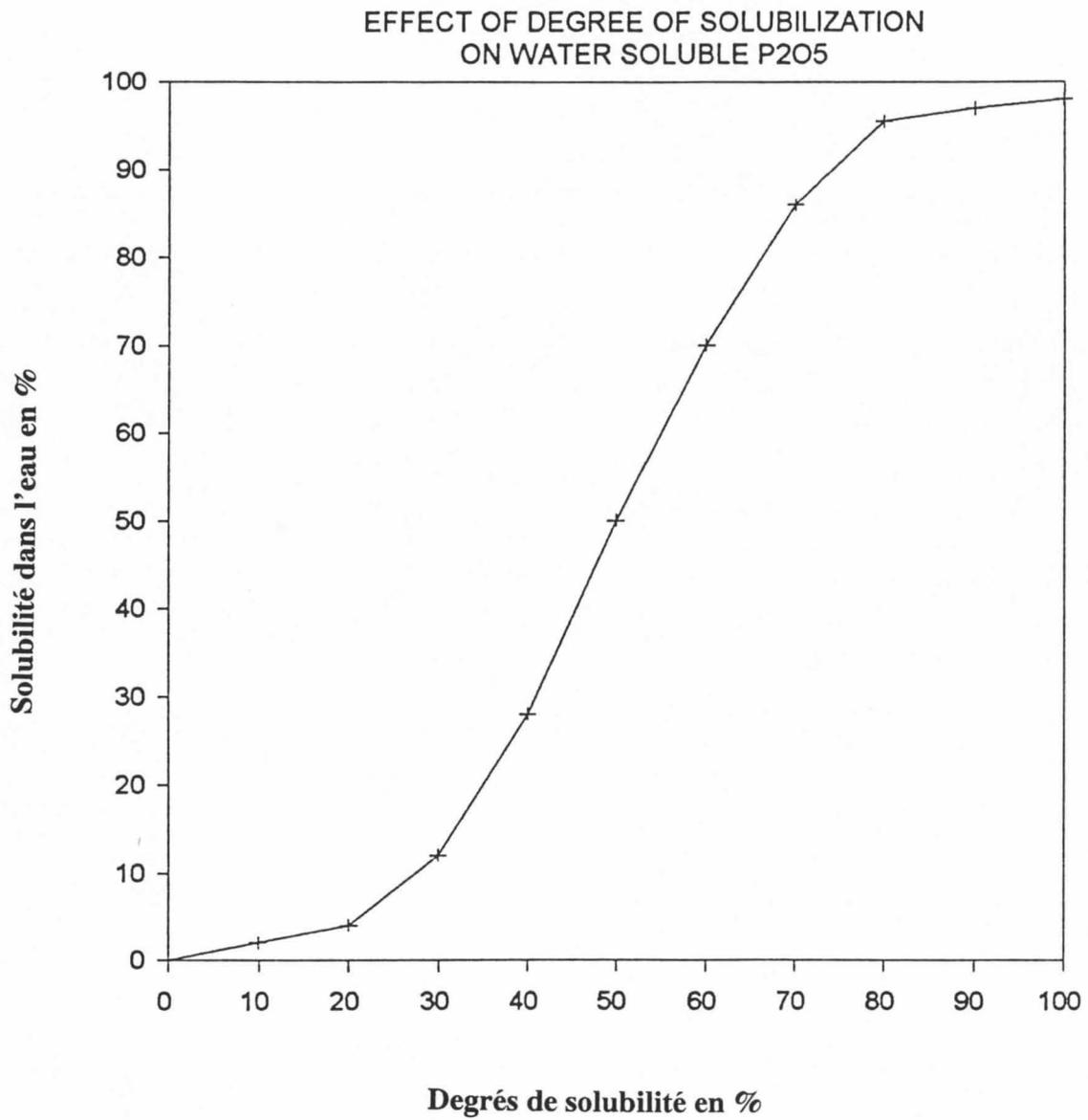


Fig. 2 - Relation entre degrés de solubilisation (consommation d'acides) et solubilité dans l'eau.



5. BIOFERTILISANTS

Les organismes de recherche à Cuba ont beaucoup travaillé sur la matière organique, les microorganismes, bactéries pour la solubilisation des phosphates du sol, pour fixer l'azote de l'air, pour la décomposition des déchets organiques. Certains résultats sont prometteurs et applicables à grande échelle.

5.1. L'Institut des Sols (IS)

Il comporte quatre départements scientifiques :

- . Cartographie et pédogenèse
- . Aménagement et conservation des sols
- . Biologie des sols
- . Fertilité et nutrition des plantes

et des programmes particulièrement axés sur les engrais biologiques et les ressources locales en matières fertilisantes :

- . Matières organiques des sols, évolution, effet sur les propriétés physico-chimiques
- . Production de biomasse, engrais verts, légumineuses
- . Compostage, action des vers de terre
- . Fixation de l'azote de l'air, symbiotique (rhizobium) et non symbiotique (azotobacter, azospirilum).
- . Solubilisation du phosphore du sol par des bactéries (pseudomonas)
- . Utilisation des phosphates naturels locaux, solubilisation par des acides organiques

Il s'appuie sur 5 stations expérimentales réparties sur l'ensemble du pays : Las Margaritas, La Renée, Camaguay, Guantanamo, Escambray.

Les points forts de l'IS sont les travaux sur les phosphates naturels, la solubilisation des phosphates du sol, la décomposition de la matière organique, la fixation de l'azote atmosphérique.

5.1.1. Solubilisation du phosphore du sol

Les teneurs en phosphore total sont parfois importantes, en particulier dans la province de la Havane, mais une fraction seulement est assimilable par les plantes, d'où l'idée de sélectionner des bactéries du genre pseudomonas pour solubiliser spécifiquement les principales formes chimiques du phosphore du sol, lié au fer, à l'aluminium, au calcium.

Les souches efficaces sont fixées sur gel pour la conservation, et la fabrication de l'inoculum liquide en vue de l'application aux champs, concentration de bactéries 10^9 /ml. Jusqu'à présent la superficie totale inoculée est de l'ordre de 15.000 ha. Les résultats sont intéressants :

- . Si le sol est riche en phosphore, l'inoculum peut remplacer la fertilisation phosphatée, et mobiliser 60 à 80 kg de P_2O_5 à l'hectare.

. Si le sol est pauvre en phosphore, le taux de remplacement est de l'ordre de 50 %, c'est à dire une mobilisation de 30 à 40 kg de P_2O_5 /ha.

Cependant cette solution épuise les réserves du sol, et sans apport de l'extérieur, risque d'atteindre rapidement le seuil de rupture, d'où la proposition d'associer l'action solubilisatrice de ces bactéries et une utilisation plus généralisée des phosphates naturels locaux, peu réactifs.

5.1.2. Décomposition de la matière organique par des vers de terre

Les souches sélectionnées par l'équipe de Bernardo CALERO sont particulièrement voraces et prolifiques, elles consomment chaque jour l'équivalent de leur poids en matière organique brute, la population est multipliée par 5 en 21 jours, et peut atteindre un maximum de 21.000/m² soit 10 kg.

Un projet de coopération avec le Mexique est en cours de réalisation avec transfert de souches et de technologie d'élevage, d'extraction d'acides humiques. En effet, le compost issu de cette décomposition et de bonne qualité nutritionnelle, semble avoir des propriétés de stimulation de croissance des plantes.

5.1.3. Fixation symbiotique de l'azote

Les haricots secs constituent une composante importante dans l'alimentation à Cuba, surtout le haricot noir (85 %), ils sont plantés dans les provinces de Pinar del Rio, La Habana, Holguin. Pour un rendement de 1 à 1,5 T/ha de grain, la demande est de : 140 N - 95 P_2O_5 - 60 K_2O et 1 T de grain exporte : 34 N - 12 P_2O_5 - 42 K_2O .

Des travaux importants sur la fixation symbiotique de l'azote, ont été réalisés pour économiser l'engrais, et ont abouti à l'inoculation de 40.000 ha, soit 80 % des surfaces cultivées. La recommandation sur le plan national est de 40 kg de N/ha + inoculum de rhizobium, dans l'avenir l'objectif est de diminuer encore la dose d'azote de 40 à 30 ou 25 kg de N. La fixation est de l'ordre de 80 kg de N/ha, soit un total de 105 kg de N disponible, la moitié serait utilisée par la culture d'haricot, et l'autre moitié resterait dans le sol. La répartition de l'azote minéral apporté, après 70 jours est la suivante :

- . 20 % de perte par volatilisation
- . 10 % de perte par lixiviation
- . 70 % reste sous forme organique

La production de l'inoculum est de l'ordre de 100 T/an, assurée en partie par l'Institut des Sols qui fournit les souches et qui possèdent des fermenteurs jusqu'à 100 l, mais la plus grande partie est fabriquée localement par le réseau de l'industrie du sucre, qui possède des fermenteurs de 2000 L.

Chaque sachet contient 200 ml d'inoculum + 500 g de tourbe, suffisant pour un hectare, soit 60 à 100 kg de graines, coûte 0,13 \$US à la production. Il est vendu à 3 \$/sachet.

5.2. L'Institut National des Sciences Agricoles (INCA)

Crée en 1970, il se trouve sur le campus de l'université agricole de La Havane, et constitue un groupement avec l'université et deux autres instituts (science animale et science agricole de La Havane), tous dépendant du Ministère de l'Education Supérieure.

Il comporte trois stations sur : le riz
les légumes (tomate, pomme de terre)
autres cultures (citrus, canne à sucre)

Le Département de biofertilisants et nutrition des plantes participe au réseau d'essais du GIATNA, en particulier avec le riz, sur les sols podzoliques argileux ; et la tomate, sur les sols ferrallitiques rouges.

Il a mis au point un inoculum de mycorhize (propagules, spores, racines infectées) vulgarisable :

- . Mycorhize agricole, 40-50 % d'infection, prix 1 \$US/kg
- . Mycorhize scientifique, 50-65 % d'infection, 10 \$US/kg
- . Mycorhize certifié, plus de 70 % d'infection, 250 \$US/kg

La dose recommandée est de 10 g d'inoculum par arbre ou de 1 kg d'inoculum/5 kg de graines, pour les céréales.

5.3. L'Institut de Recherches Fondamentales en Agriculture Tropicale (INIFAT)

C'est l'organisme le plus ancien du pays, il s'occupe des cultures en général, alors que les autres organismes sont plus spécialisés soit par thèmes (sols, irrigation...), par plantes (canne à sucre, café..) ou par régions.

Il possède quatre stations expérimentales : Pinar del Rio, La Habana, Sancti Spiritus, Ciego de Avila, un réseau d'essais chez les agriculteurs, et des représentants scientifiques dans quatorze provinces, chargés de la promotion des résultats de l'INIFAT, de la vulgarisation, et en retour de l'identification des sujets pour la programmation.

Les points forts de l'Institut sont les semences, la création variétale, le contrôle de qualité par radiographie, le diagnostic rapide (20 mn) pour les contaminations et les taux de germination.

Le programme de fertilité des sols et nutrition minérale des plantes s'occupe de l'évaluation des biofertilisants (phosphorine, azotobacter...), des phosphates naturels, et des relations engrais-sols-plantes. Sur ce dernier point, M. Carlos ALVAREZ a obtenu un grand nombre de résultats sur les sols rouges de la province de La Havane, montrant des teneurs élevées en phosphore des sols :

- . P₂O₅ total de 2260 à 7020 ppm
- . P₂O₅ assimilable ONIANI de 101 à 1525 ppm, le seuil de carence étant 200 ppm.

TAB. 11 - CUBA : échelle de fertilité des sols en phosphore et potassium selon la méthode ONIANI - en mg/100 g de sol
SOURCE : MINAG 1992

NIVEAU PHOSPHORE	BAS P ₂ O ₅ <10 mg	MOYEN Entre 10 et 20 mg	ELEVE P ₂ O ₅ >20 mg
Surface en 100 ha	525	292	385
% du total	43,7	24,3	32,0

POTASSIUM	K ₂ O<18 mg	Entre 18 et 30 mg	K ₂ O>30 mg
Surface en 1000 ha	305	247	650
% du total	25,4	20,6	54,0

ACIDITE	pH<4,6	Entre 4,6 et 6	pH>6
Surface en 1000 ha	89	489	624
% du total	7,4	40,7	51,9

TAB. 12 - CUBA : Répartition par province, des sols carencés en phosphore et potassium, selon la méthode ONIANI
SOURCE : MINAG 1992

PROVINCES	P ₂ O ₅ <10 mg		K ₂ O<18 mg		pH<4,6	
	1000 ha	%	1000 ha	%	1000 ha	%
Pinar del Rio	71	45	94	59	46	29
Habana	36	29	36	29	0,7	0,6
Matanzas	20	23	22	26	1,5	1,8
Cienfuegos	11	30	10	28	3	9
Villa Clara	32	31	27	26	8	7
S. Spiritus	26	37	17	24	3	4
C. De Avila	14	50	0,6	2	0,8	3
Camaguey	18	11	31	19	10	6
Las Tunas	7	17	11	25	0	0
Gramma	31	27	8	7	1,7	1,5
Holguin	35	49	8	11	0,6	1,0
S. De Cuba	18	40	6	14	5	12
Guantanamo	38	61	6	10	0,9	1,5
TOTAL	357		276		81	

Pourtant les sols et les cultures répondent encore à la fertilisation phosphatée. On peut se poser la question, à savoir si la méthode ONIANI est valable pour tous les sols et les cultures, (elle est généralisée à Cuba tableaux 11 et 12), ou seulement dans certains cas précis.

Il semble qu'à l'occasion de ce programme avec l'AIEA, il serait opportun de comparer la méthode ONIANI avec d'autres méthodes de détermination du phosphore assimilable, en particulier la dilution isotopique, dans un contexte plus élargi des facteurs de la dynamique du phosphore dans les sols.

6. PROPOSITION DE THÈMES D'ETUDE

Il existe un consensus général pour travailler en priorité sur les phosphates naturels et les biofertilisants, il s'agit donc de définir les différentes étapes et les méthodologies adaptées.

6.1. Phosphates naturels

Le phosphate enrichi de Trinidad de Guedes est tout à fait indiqué, comme matériel d'étude mais compte-tenu de sa faible réactivité, il serait intéressant d'ajouter des phosphates partiellement solubilisés à différents taux, et un phosphate tendre de type Caroline du Nord (USA), Djebel Onk (Algérie), Gafsa (Tunisie), avec une solubilité formique de l'ordre de 70 %.

Ces phosphates seront étudiés dans une gamme de sols représentatifs, du point de vue capacité de solubilisation des phosphates : acidité, complexe absorbant, P assimilable, Ca échangeable, taux de saturation...

Une mise au point est nécessaire sur les bactéries capables de solubiliser les phosphates naturels, par analogie avec celles (*pseudomonas*) qui solubilisent le phosphore du sol.

Les modes de solubilisation (acides minéraux, acides organiques, acidité du sol, bactéries) devraient être étudiés et comparés sur le plan technique et économique, et évalués sur le plan de la faisabilité industrielle.

6.2. Biofertilisants

La gamme de produits est très large, et en général, leur nature, leur mode d'utilisation, la probabilité d'efficacité agronomique et la rentabilité économique ne sont pas définis. Un effort de clarification est nécessaire.

L'inventaire des sources de matières organiques disponibles s'impose pour identifier les contraintes éventuelles de saisonnalité, de transport, de conditionnement, d'épandage. L'objectif est de choisir des matières intéressantes sur le plan scientifique, mais aussi économique.

Les conditions de compostages varient avec les buts recherchés : vitesse de décomposition, qualité de l'humus, production de biogaz, production d'acides organiques. Ce dernier point concerne la solubilisation des phosphates naturels, les résidus de l'industrie des jus d'orange, contiennent de l'acide citrique, qui pourrait être utilisé pour ce but.

Il s'agit de vérifier l'existence de ces phénomènes, de façon quantifiable, avant de se lancer dans des expérimentations coûteuses.

6.3. Phosphore assimilable

Il représente l'un des facteurs de la dynamique du phosphore (facteur quantité) et devrait être interprété en liaison avec les autres.

Les méthodes conventionnelles utilisent des réactifs chimiques qui extraient préférentiellement l'une des formes du phosphore du sol, d'autre part ces agents chimiques modifient les équilibres ioniques pré-existants. L'idéal serait l'eau, élément naturel, qui perturbe le moins l'état du sol.

Il s'agit donc de réaliser un équilibre relatif entre le sol et la phase aqueuse, par agitation pendant 24 h, puis d'ajouter du ^{32}P au mélange et de prélever des parties aliquotes après des temps de contact croissants de 10 à 100 minutes, et de mesurer la concentration en phosphore (Mt) et la radioactivité (Rt) de ces parties aliquotes :

soit E une quantité inconnue d'ions phosphates isotopiquement diluable du mélange, et R_o une quantité de ^{32}P connue, ajoutée au mélange, également sous forme d'ions phosphates sans entraîneur

A l'équilibre, on a égalité d'activité spécifique entre :

$$\frac{R_o}{E} = \frac{R_t}{M_t}$$

d'où on peut tirer :

$$E = \frac{R_o \times M_t}{R_t}$$

La valeur E repose sur l'hypothèse que seuls les ions phosphates isotopiquement échangeables, donc mobiles, sont assimilables par les plantes. Les corrélations assez étroites observées par de nombreux auteurs entre les valeurs E et les quantités de phosphore prélevées par les plantes laissaient présager la validité de cette hypothèse. Elle a été confirmée par l'identité de l'activité spécifique de la solution du sol et celle de la plante.

L'évaluation des différentes méthodes conventionnelles de détermination du phosphore assimilable (ONIANI, BRAY I, II, OLSEN, SAUNDER, MEHLICH...) consisterait donc à réaliser le contact sol + réactif selon les modalités habituelles, à ajouter du ^{32}P au mélange, et à mesurer l'activité spécifique de l'aliquote.

Selon l'hypothèse évoquée plus haut, la méthode qui donne l'activité spécifique la plus proche de celle de la solution du sol serait la meilleure.

6.4. Facteurs de la dynamique du phosphore

Il a été suggéré d'appliquer la méthode de Fardeau (1981), pour déterminer les 4 facteurs de la dynamique du phosphore, avec une seule manipulation :

- . R : la radioactivité ajoutée
- . r : la radioactivité dans le filtrat
- . Cp : la concentration en ^{31}P dans le filtrat
- . 10 : le rapport solution/sol

On obtient les résultats sur les facteurs suivants :

- . Intensité : Cp (en mg de P/l)
- . Quantité : $E = R \times Cp$ (en mg de P/kg de sol)
- . Capacité : $E/Cp = R/r \times 10$
- . Cinétique : $rt/R = (r_1/R)t^n$
 $\text{Log}(rt/R) = \text{Log}(r_1/R) - n \text{Log } t$

La pente $n = -(\text{Log } rt_2 - \text{Log } rt_1)/(\text{Log } t_2 - \text{Log } t_1)$

Si t_2 est 10 fois t_1 , on a $n = -\text{Log}(rt_2/rt_1)$, d'où l'intérêt de prélever les solutions entre 4 et 40 mn ou 10 et 100 mn.

Il reste un problème parfois insoluble, c'est la faible concentration en phosphore de la solution du sol, souvent en dessous de la limite de sensibilité des méthodes de dosage habituelles.

Dans ce cas il faudrait essayer d'utiliser les réactifs au vert malachite ou de méthyle plus sensibles, ou concentrer la solution du sol par évaporation ou adsorption du phosphore sur une résine anionique.

L'ensemble de cette démarche : objectifs, méthodologies, protocole d'essais, a fait l'objet de nombreuses discussions et séminaires. Aurelio GARCIA a été chargé de recenser les besoins en éléments marqués et de les communiquer à l'AIEA.

7. CONCLUSION

Cette mission a permis de prendre de nombreux contacts avec les organismes de recherche et de développement agricoles, les industriels des engrais, et de fédérer les actions en deux programmes sur les phosphates naturels et les biofertilisants.

Les programmes de l'AIEA, ordinaires et coordonnés sont bien engagés, initialement installés à l'INIFAT, avec des antennes à l'INCA, l'ISACA, et bientôt à la Station La Renée de l'IS. Les activités sont animées au sein d'un Groupement de Recherches et Applications des Techniques Nucléaires en Agriculture (GIATNA) présidé par Mme Alaida LABRADA.

Il est souhaitable que l'Agence continue d'apporter son concours à Cuba, par la fourniture des éléments marqués, la formation des stagiaires, et les échanges avec l'extérieur.

ANNEXES

BIBLIOGRAPHIE

1. FARDEAU J.C., 1981. Cinétique de dilution isotopique et phosphore assimilable des sols. Thèses Doct. Sci. Univ. Paris VI, 198 p.
2. FARDEAU J.C., MOREL C., BONIFACE R., 1988. Pourquoi choisir la méthode Olsen pour estimer le phosphore assimilable des sols. *Agronomie* 8, 577-584.
3. FERNANDEZ M.E., PEREZ H. , 1994. La roca fosforica en Cuba. Min. Ind. Basica, Centro Nac. Fondo Geologico. 28 p.
4. FERNANDEZ M.E., 1995. Propuesta de utilizacion racional de las menas del yacimiento de fosforitas Trinidad de Guedes. Centro Nac. Fondo Geologico. 10 p.
5. GARCIA A., NUVIOLA A., HERNANDEZ G., MOREJON L. Resultados obtenidos en la evaluation de dos rocas fosforicas cubanas. Inst. De Suelos, Capdevila, Boyeros, La Habana. 4 p.
6. GARCIA A., NUVIOLA A., MOLINA J.. Evaluation de roca fosforica cubana en relacion a la biofertilizacion, acidulacion parcial y adiccion de azufre. Inst. De Suelos, Capdevila, Boyeros, La Habana. 11 p.
7. MINISTERIO DE LA AGRICULTURA, 1992. Registro de la fertilidad de los suelos de cuba. Inst. De Suelos, Cent. Nac. De Suelos Y Fertilizantes. 42 p.
8. NOVOZAMSKY I., VAN DIJK D., VAN DER LEE J.E., HOUBA V.J.G., 1993. Automated determination of trace amounts of phosphate in soil extracts using malachite green. *Soil Sci. Plant Anal.* 24 (9 = 10), 1065-1076).
9. TRUONG B., BHAT S., BOUYER S., 1970. Dosage du phosphore à l'état de traces dans les solutions en équilibre avec le sol. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t 270.
10. TRUONG Binh., PICHOT J., 1971. Dosage du phosphore dans les solutions de sols par le vert de méthyle. *Agro. Trop.* Vol 26 n° 6 et 7, 767-770.
11. VAN VELDHOVEN R.P., MANNAERTS G.P., 1987. Inorganic and organic phosphate measurements in the nanomolar range. *Anal. Biochemi.* 161, 45-48.

PERSONNES RENCONTRÉES

Centro de Investigaciones Químicas (CIQ), MINBAS :

Mme Alicia LIMA, recherche sur les engrais chimiques
 Carmen RODRIGUEZ ACOSTA, chercheur auxiliaire sur les engrais
 M. Rolando Gil OLAVARRIETA, production des engrais organo-minéraux

Centro Nacional del Fondo Geológico (CNFG), MINBAS :

Mme Maria Elena FERNANDEZ, Geologue des minéraux non métalliques.

Instituto de Suelos (IS), MINAGRI :

MM. Ricardo DELGADO DIAZ, Directeur de l'Institut
 Olegario MUNIZ UGARTE, Chef du Département d'Agrochimie
 Bernardo CALERO, Chef du Département de Biologie des Sols
 Alfredo ANCIZAR, Relations Extérieures
 Mme Graciela DUENAS, Recherche sur l'azote, ¹⁵N
 Marta GONZALEZ, Radiochimie, ¹⁴C
 MM. Aurelio GARCIA, Recherche sur le phosphore, ³²P, phosphate naturel
 Antonio NUVIOLA, idem
 Francisco MARTINEZ, Matière organique ¹⁴C
 Jorge FERRAN, Microorganismes des sols, solubilisation des phosphates
 German HERNANDEZ, Rhizobiologie

Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura Tropical (INIFAT), MINAGRI:

M. Adolfo RODRIGUEZ NODALS, Directeur Général
 Mme Alaida LABRADA, Chef du Département de Biophysique et de Physiologie Végétale
 MM. Carlos ALVAREZ, Chef du Laboratoire des Isotopes
 Jorge CRUZ AGUADO, Recherche sur la matière organique, ¹⁴C.

Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), MES :

MM. Ramon RIVERA, Chef du Département d'Agrochimie
 Régino GOMEZ, Fertilité des sols

Instituto Superior Agrícola de Ciego de Avila (ISACA), MES :

MM. Jose HERRERA, Chef du Laboratoire de Techniques Nucléaires et de Biofertilisants
Armando HERNANDEZ GARCIA, Chercheur
Ricardo RODRIGUEZ GUZMAN, Chercheur

TRINIDAD DE GUEDES :

M. Gerardo PEREZ, Exploitation minière et enrichissement des phosphates naturels

RAYONITRO A MATANZAS :

MM. Raimundo PERDOMO, Chef du Département Technique
Leonardo COLOME, Chef de l'Atelier Engrais Complexes
Santiago BOCALLI RANGEL, Technologie et Développement

AMBASSADE DE FRANCE :

M. Antoine LEQUITTE, Attaché Culturel Adjoint