

contribution a l'étude du statut phosphorique des sols de madagascar

NGO - CHAN - BANG et R. OLIVER

Les auteurs se sont attachés à appliquer sur des sols soumis à divers traitements (fumure phosphatée et humectation), la méthode d'évaluation du phosphore assimilable par détermination des cinétiques d'échange isotopique. Deux types de sols ont ainsi été étudiés et l'effet de l'hydromorphie a plus particulièrement été abordé. Dans un deuxième temps, la méthode de fractionnement des diverses formes de phosphore du sol selon CHANG et JACKSON à divers stades de l'échange isotopique a été utilisée en vue d'étudier les phénomènes d'évolution de diverses formes de phosphore du sol et de l'engrais phosphaté apporté sous forme soluble.

L'étude comparative des diverses cinétiques d'échange isotopique obtenues a permis de mettre en évidence une libération de phosphore assimilable sous l'influence des conditions d'hydromorphie et aussi une modification de l'allure des cinétiques d'échange isotopique due à l'addition d'une fumure phosphatée et qu'explique la création de sites d'échange du phosphore sous l'effet de l'hydromorphie et la saturation temporaire de certains sites.

Les fractionnements selon la méthode de CHANG et JACKSON ont permis de montrer que les fractions de P du sol les plus mobiles sont celles liées à l'aluminium et au fer, la fraction de P liée au calcium étant caractérisée par des échanges négligeables. Une fumure phosphatée apportée sous forme soluble est fixée en premier lieu sous forme de P lié à l'aluminium et est ensuite redistribuée vers les formes de P liées au fer ou au calcium; ces résultats s'expliquent par les hypothèses émises en 1961 par CHANG et CHU.

1 - INTRODUCTION

L'acide phosphorique est pour la nutrition des plantes un élément de première importance, aussi les travaux qui lui sont consacrés sont très nombreux. Beaucoup d'entre eux se rapportent à l'établissement de corrélations entre l'extraction du phosphore du sol à l'aide de réactifs appropriés et les prélèvements ou les besoins en phosphore des plantes cultivées. Selon le type de sol étudié et le but recherché, ces réactifs d'extraction peuvent varier considérablement.

L'introduction des techniques nucléaires en Agronomie a autorisé des progrès considérables dans la connaissance des phénomènes de fixation et de libération des éléments assimilables et en particulier du phosphore

Extrait des travaux effectués sous contrat n° 727 RB passé avec l'Agence Internationale pour l'Energie Atomique (Vienne).

par les sols. Nous citerons les méthodes de FRIED et DEAN, et LARSEN qui permettent "in vivo" l'évaluation des réserves du sol en phosphore assimilable par les plantes. D'autres méthodes plus rapides, ne font pas appel à l'utilisation de plantes test et sont largement utilisées, parmi elles, nous retiendrons la méthode de GUNARSON et ses dérivées (Dilution isotopique simple et en retour avec ou sans entraîneur). Ces dernières que nous avons utilisées dans notre étude permettent une évaluation du "pool phosphorique" assimilable par les plantes et donnent aussi une idée de la disponibilité du phosphore du sol à un moment donné pour la plante.

Les études entreprises jusqu'à présent à Madagascar, faisant appel à l'analyse chimique du sol, à l'établissement du diagnostic des carences du sol (méthode CHAMINADE)(7) en éléments minéraux ainsi qu'aux courbes de réponse à diverses fumures lors d'essais aux champs (P. ROCHE; J. VELLY; J. CELTON) (2) ont montré que le problème de la fertilisation phosphatée se posait de façon très aiguë pour les sols malgaches. Si d'un point de vue agronomique, il a été en grande partie résolu par l'apport d'une fumure phosphatée adéquate, il restait à mettre en évidence et à éclairer les phénomènes d'évolution de cette fumure, afin de mieux l'utiliser. Nous nous sommes surtout attachés à étudier l'influence des conditions d'hydromorphie sur l'évolution du phosphore assimilable du sol et de la fumure phosphatée apportée.

2 - MATERIELS ET METHODES

2.1 - Les sols

Le tableau ci-après résume les principales caractéristiques des sols étudiés. Des sols ont été choisis pour leur forte représentation à Madagascar.

Type de sol	Sol ferrallitique sur Gneiss (Ambatobe)	Sol hydromorphe moyennement organique (Mahitsy)
pH	4,0	5,1
<i>GRANULOMETRIE</i>		
Sables grossiers %	54,05	52,4
Limon %	11,00	15,3
Argile %	30,00	23,0
<i>ELEMENTS ORGANIQUES</i>		
Matière organique %	2,3	7,6
Rapport C/N	13,5	10
<i>ELEMENTS ASSIMILABLES</i>		
Ca meq/100 g	0,89	1,37
Mg meq/100 g	0,19	1,53
K meq/100 g	0,21	0,13
Na meq/100 g	0,09	0,04
Capacité d'échange meq/100g	3,60	12,2
% de saturation	38,3	25,2

Le premier de ces sols a une texture limono-argilo-sableuse. Son pH est extrêmement acide et il se caractérise par une pauvreté extrême en éléments assimilables. Sa teneur en matière organique est faible. Sa réponse aux engrais phosphatés au champ est très bonne et le diagnostic des carences de végétation met en évidence une très forte carence en phosphore.

Le second de ces sols a une texture limono-argilo-sableuse. Son pH est acide et sa teneur en matière organique est moyenne. Sa réponse au champ est faible, les essais en vases montrent une faible carence en phosphore. Le sol est naturellement sous régime hydromorphe.

2.2 - Les méthodes

Dans notre étude, nous avons utilisé la méthode de dilution isotopique avec la solution de sol comme entraîneur selon FARDEAU et MARTIN (3), elle consiste en une agitation du sol avec un extrait aqueux au 1/10 du même sol, rendu radio-actif par introduction d'une quantité adéquate de ^{32}P (Rapport sol/solution = 1/10). A des temps variables après le début de l'agitation (1/2 heure à 24 heures), les suspensions obtenues sont centrifugées et des prélèvements sont effectués en vue du comptage de la radio-activité.

Nous avons aussi largement fait appel à la méthode de fractionnement des diverses formes de phosphore du sol selon la technique de CHANG et JACKSON légèrement modifiée par DABIN. Cette technique a été utilisée sur des échantillons à divers stades de l'échange isotopique et l'activité spécifique des diverses fractions extraites a été déterminée.

3 - RESULTATS

3.1 - Détermination des cinétiques d'échange isotopique sur sol enrichi en phosphore au laboratoire

Les 2 types de sols soumis à l'expérience reçoivent les apports suivants de phosphore sous forme de $\text{PO}_4\text{H}_2\text{K}$ en solution

N° de l'échantillon	Traitement appliqué
0	0 p.p.m. de P apporté
1	25 p.p.m. de P apporté
2	50 p.p.m. de P apporté
3	125 p.p.m. de P apporté
4	250 p.p.m. de P apporté
5	500 p.p.m. de P apporté
6	1 000 p.p.m. de P apporté

Les échantillons sont maintenus à l'étuve à 30°C et leur taux d'humidité correspond environ aux 2/3 de leur capacité de rétention maximum en eau. Des prélèvements sont effectués à intervalles réguliers pour les mesures de cinétique d'échange isotopique.

3.1.1 - Sol ferrallitique sur Gneiss d'Ambatobe

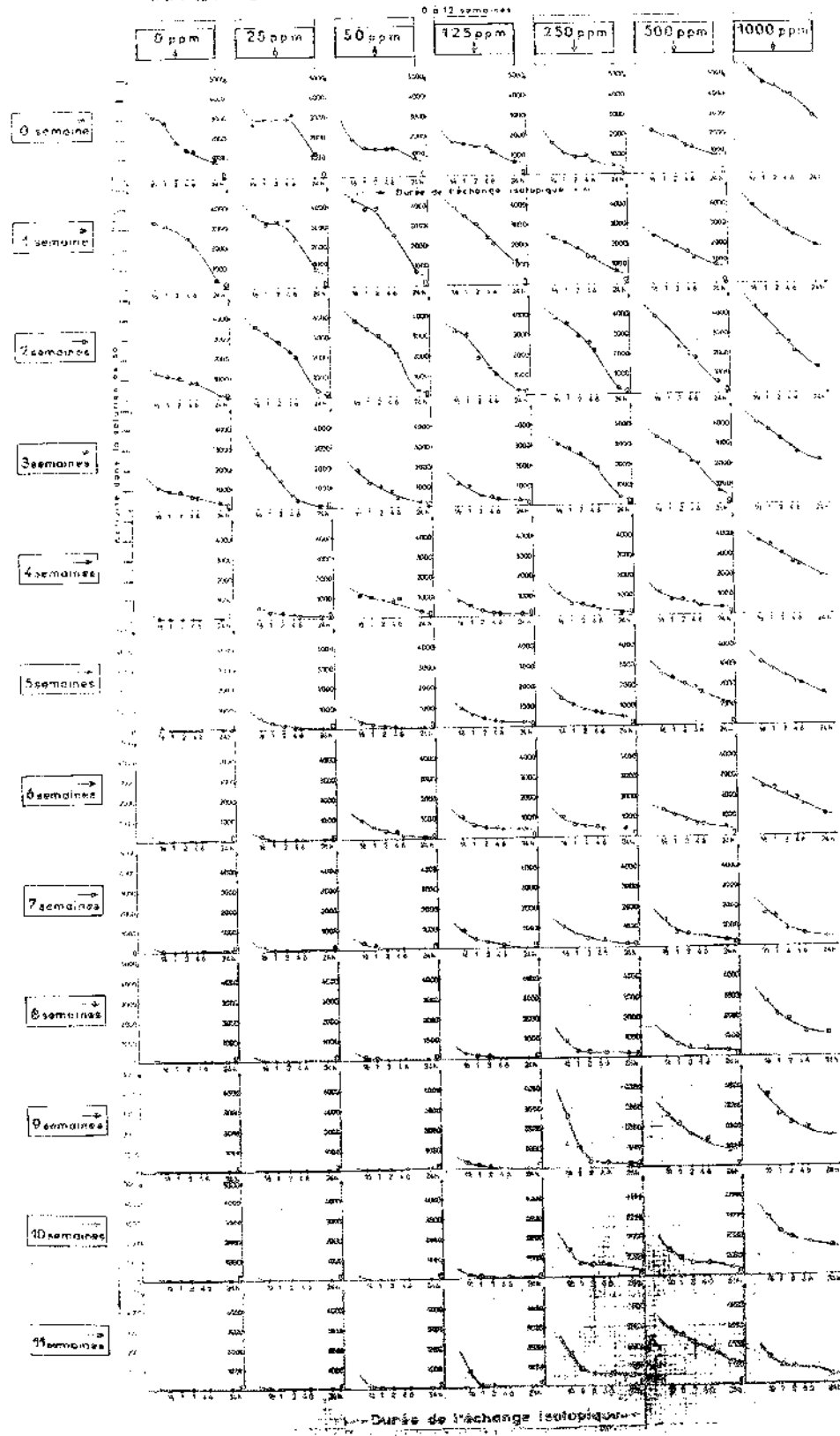
Les résultats peuvent se résumer dans le tableau suivant :

Temps d'incubation (humectation/dessiccation)	Durée de l'échange isotopique en heures	Traitements étudiés (quantité de P ajoutée)						
		0 ppm	25 ppm	50 ppm	125 ppm	250 ppm	500 ppm	1000 ppm
0 semaine	0	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000
	1/2	3 086	2 729	1 820	1 746	1 524	2 090	5 093
	1	2 998	2 796	1 458	1 550	1 034	1 866	4 658
	2	1 778	2 796	1 338	1 438	810	1 577	4 376
	4	1 468	2 886	1 271	1 340	921	1 342	4 111
	6	1 390	3 033	1 274	1 238	602	1 290	3 923
	24	784	1 183	840	586	489	844	2 907
1 semaine	0	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000
	1/2	3 376	3 646	4 409	3 898	2 410	2 348	3 862
	1	3 180	3 222	3 998	3 475	2 186	2 206	3 349
	2	2 814	3 409	3 845	3 330	1 846	1 877	3 031
	4	2 506	2 908	2 994	2 665	1 488	1 566	2 614
	6	2 129	2 471	2 780	2 283	1 413	1 243	2 405
	24	351	399	720	671	614	994	1 980
2 semaines	0	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000
	1/2	1 268	3 568	3 757	3 242	3 834	3 899	4 341
	1	1 164	3 232	3 445	3 063	3 586	3 380	3 850
	2	1 150	2 947	3 022	1 870	2 422	2 418	2 879
	4	886	2 300	2 571	1 422	2 123	1 966	2 548
	6	856	2 019	2 237	1 059	1 710	1 775	2 066
	24	247	342	335	307	355	608	1 306
3 semaines	0	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000
	1/2	1 138	2 761	1 876	1 184	3 039	3 359	4 010
	1	996	2 117	1 247	1 104	2 891	3 023	3 693
	2	872	1 489	1 020	531	2 534	2 659	3 286
	4	592	695	752	401	2 070	2 214	2 833
	6	564	478	452	328	1 883	2 095	2 583
	24	354	132	282	278	390	682	2 107
4 semaines	0	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000
	1/2	110	678	1 094	787	1 138	1 182	3 707
	1	76	318	1 026	565	602	763	3 415
	2	58	273	902	288	535	712	3 017
	4	38	199	678	206	422	651	2 067
	6	30	146	902	158	283	485	2 463
	24	18	102	259	132	210	342	1 957
5 semaines	0	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000
	1/2	143	515	274	952	1 396	2 581	3 112
	1	60	306	172	622	1 102	2 320	2 758
	2	59	196	149	471	861	2 090	2 459
	4	58	151	131	379	732	1 689	2 184
	6	36	84	62	298	617	1 651	2 038
	24	34	78	70	292	462	1 133	1 591

(suite du tableau)

Temps d'incubation (humectation/dessiccation)	Durée de l'échange isotopique en heures	Traitements étudiés (quantité de P ajoutée)						
		0 ppm	25 ppm	50 ppm	125 ppm	250 ppm	500 ppm	1000 ppm
6 semaines	0	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000
	1/2	57	179	269	894	1 067	1 345	2 413
	1	50	86	144	594	610	1 009	2 274
	2	46	70	143	462	569	826	2 078
	4	38	52	100	383	542	693	1 867
	6	33	38	90	237	439	626	1 571
	24	28	33	52	139	407	489	1 042
7 semaines	0	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000
	1/2	60	185	289	694	1 200	1 312	1 706
	1	46	74	164	490	722	704	1 534
	2	33	53	103	334	494	649	870
	4	-	-	-	-	-	-	-
	6	26	42	63	172	374	559	635
	24	22	22	43	86	165	297	482
8 semaines	0	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000
	1/2	58	49	188	266	814	1 057	2 763
	1	54	49	123	201	350	667	2 159
	2	34	31	83	142	279	494	1 839
	4	-	-	-	-	-	-	-
	6	33	30	58	69	260	475	1 456
	24	27	31	31	30	240	309	1 342
9 semaines	0	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000
	1/2	36	48	46	307	2 638	2 575	3 616
	1	39	34	33	190	765	2 227	2 573
	2	27	29	22	129	352	1 690	2 145
	4	-	-	-	-	-	-	-
	6	26	25	17	72	257	1 425	1 928
	24	20	15	10	54	239	793	1 532
10 semaines	0	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000
	1/2	61	84	84	205	1 426	1 392	2 857
	1	44	61	69	124	686	956	2 216
	2	45	49	55	101	650	720	1 916
	4	-	-	-	-	-	-	-
	6	33	41	50	111	647	690	1 628
	24	37	31	47	93	374	493	1 477
11 semaines	0	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000
	1/2	47	103	224	788	1 734	2 805	1 386
	1	35	42	112	199	811	2 538	918
	2	25	34	43	126	577	2 200	858
	4	-	-	-	-	-	-	-
	6	26	31	34	98	701	1 793	835
	24	18	23	22	33	600	1 221	449

Cinétiques d'Echange Isotopique
 sur FERRALLITIQUE 507-gross
 Amorphes - Tonadrine
 Etude de l'EFFET des APPORTS de PHOSPHORE
 7 doses de P 0 à 1000 ppm.
 de l'EFFET du TEMPS HUMECTATION de DESSICATION



Interprétation

Dès l'addition de phosphore au sol, on constate des modifications de l'allure de la courbe d'échange isotopique.

Le sol témoin présente un échange lent et la diminution de l'activité en solution est régulière entre 1/2 heure et 24 heures d'échange isotopique. Le dosage du phosphore présent en solution montre que les quantités échangées sont faibles (de 0,12 à 1,5 ppm de P après 24 heures).

Quand les doses de P apportées au sol varient de 25 à 250 ppm, on assiste à une augmentation des échanges dans un laps de temps court (1/2 heure) qui se traduit par une baisse de l'activité en solution.

Echantillon	Activité en solution après 1/2 heure d'échange
Sol témoin	3 086 impulsions/minute
25 ppm de P	2 729 impulsions/minute
50 ppm de P	1 820 impulsions/minute
125 ppm de P	1 746 impulsions/minute
250 ppm de P	1 520 impulsions/minute

Aux doses 500 et 1 000 ppm de P apportées, l'activité en solution après une demi-heure d'échange augmente à nouveau. On peut donc dire que jusqu'à la dose 250 ppm de P, la fumure apportée est très rapidement fixée par le sol et le "pool" phosphate du sol soumis à l'échange avec le radio-phosphore augmente (baisse de l'activité en solution). Lorsque l'apport de fumure phosphatée est très important, le sol à ses sites de fixation du phosphore temporairement saturés et une forte partie du phosphore reste en solution, ce qui par la voie de l'équation d'échange isotopique entraîne une augmentation de l'activité en solution. Si l'on examine les cinétiques d'échange entre 0 et 24 heures, on constate qu'elles présentent un palier très net qui peut s'expliquer en admettant que les fractions de P ajoutées saturent en premier lieu des sites où le phosphore se trouverait sous forme soluble, puis des sites où il se trouverait sous forme échangeable, mais non soluble.

Lorsque la durée d'incubation augmente, on observe une disparition des paliers ainsi qu'un rapprochement des courbes de l'axe des abscisses. Ceci s'expliquerait par le fait que les conditions d'hydromorphie créent de nouveaux sites de fixation du phosphore facilement échangeable et très facilement échangeable. Pour le sol témoin, ces sites sont occupés en premier lieu par des formes de phosphore facilement échangeable qui arrive ainsi à repasser temporairement en solution (augmentation de l'activité en solution pendant les 2 premières semaines d'incubation); par la suite la création de sites de fixation de phosphore facilement échangeable et la migration du phosphore solubilisable qui en résulte expliquent l'augmentation de la vitesse d'échange isotopique et le rapprochement des courbes de l'axe des abscisses. Ce phénomène qui est pratiquement achevé en 4 semaines pour le sol témoin, dure jusqu'à 11 semaines pour la dose 125 ppm de P apporté et se poursuit au-delà de ce temps, lorsqu'on apporte des quantités de P supérieures. L'augmentation d'échangeabilité peut atteindre 40 à 80 fois selon la durée d'échange et la durée d'incubation.

3.1.2 - Sol hydromorphe moyennement organique de Mahitay

Les résultats sont rassemblés dans le tableau suivant :

Temps d'incubation humectation	Durée de l'échange isotopique	Traitements étudiés (quantité de P ajoutée)						
		0 ppm	25 ppm	50 ppm	125 ppm	250 ppm	500 ppm	1000 ppm
	Heure	imp./mn	imp./mn	imp./mn	imp./mn	imp./mn	imp./mn	imp./mn
0 semaines	0	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000
	1/2	105	76	131	204	315	558	1 539
	1	46	33	55	193	216	389	1 282
	2	35	27	50	137	125	228	965
	5	32	26	39	105	109	206	854
	24	16	18	23	56	60	69	526
2 semaines	0	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000
	1/2	118	103	137	137	237	313	497
	1	90	94	126	126	150	206	279
	2	64	77	79	87	110	166	259
	5	28	23	45	50	86	140	215
	24	17	14	25	33	61	86	125
4 semaines	0	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000
	1/2	115	83	71	101	153	577	1 097
	1	53	53	46	81	79	369	958
	2	57	41	33	69	71	299	745
	5	44	30	28	55	70	160	452
	24	26	16	19	29	33	67	
6 semaines	0	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000
	1/2	45	50	45	74	128	298	1 273
	1	39	33	30	48	74	185	830
	2	26	29	24	32	58	160	763
	5	20	22	22	26	46	149	612
	24	15	11	10	12	29	69	404
8 semaines	0	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000
	1/2	75	77	76	82	212	385	1 314
	1	58	54	58	48	90	248	1 110
	2	49	50	41	38	75	182	848
	5	31	32	40	36	63	145	674

Interprétation

Les cinétiques d'échange effectuées immédiatement après l'addition de phosphore montrent :

Pour le sol témoin un échange très rapide, contrairement à ce que l'on vient d'observer précédemment. Il faut noter que ce sol est déjà sous régime hydromorphe. L'apport de faibles doses de fumure phosphatée (25 ppm de P) augmente légèrement la vitesse d'échange jusqu'à 24 heures ceci est certainement dû à une fixation du phosphore sur les sites très facilement échangeables.

L'apport de doses plus importantes de phosphore (de 50 à 1000 ppm de P) provoque une saturation temporaire des sites facilement échangeables d'où une augmentation du P en solution et une augmentation de l'activité en solution. Toutefois, cette activité reste (même pour la dose 1000 ppm de P) nettement inférieure à celle observée précédemment, ce qui indique un échange plus élevé (qui laisse supposer une capacité d'échange en PO_4^{---} plus élevée et également une échangeabilité plus grande des ions PO_4^{---} de ce sol au départ.)

Le régime hydrique n'a pas d'effet significatif sur ce sol car l'allure de cinétique varie peu en fonction de la durée d'incubation. Ceci est dû aux conditions initiales d'hydromorphie du sol.

3.2 - Fractionnement selon CHANG et JACKSON de sols enrichis en phosphore au laboratoire

Les sols étudiés sont les mêmes que ceux utilisés dans la première partie de cet exposé et ils ont été soumis au fractionnement selon la méthode de CHANG et JACKSON après un enrichissement en phosphore au laboratoire de 1000 ppm en P et une incubation à l'étuve à 30°C, dans des conditions d'hydromorphie voisines des 2/3 de la capacité de rétention maximum en eau. La durée d'incubation varie de 1 semaine à 6 mois.

3.2.1 - Sol ferrallitique sur Gneiss (Ambatohe)

Sol ferrallitique sur Gneiss (Ambatohe)		Formes de P non occluses			Formes de P occluses			Somme des formes de P extraites
		P-A1	P-Fe	P-Ca	P-Fe	P-A	P-F-A1	
Sol témoin	p.p.m. P	9	50	9	8	8	39	140
	Activité pour 5 000 ipm de départ	516	658	71,3	?	24,0	124,4	
	Activité spécifique	57,3	11,6	7,9	?	3,3	3,2	
Sol fertilisé incubé 1 semaine	p.p.m. P	293	167	16	40	10	51	577
	%	51	29	3	7	2	9	
	Activité pour 5 000 ipm de départ	675	744	6,61	2,17	1,85	41,5	
	Activité spécifique	2,3	1,46	0,44	0,05	0,18	8,1	
Sol fertilisé incubé 1 mois	p.p.m. P	332	244	22	27	9	36	672
	%	49	36	3	4	1,5	5,5	
	Activité pour 5 000 ipm de départ	2038	1475	66	20	19	191	
	Activité spécifique	6,13	6,04	3,06	0,74	2,6	2,80	
Sol fertilisé incubé 6 mois	p.p.m. P	366	336	29	74	19	52	1072
	%	34	30	2,6	7	2	5	
	Activité pour 5 000 ipm de départ	3096	2043	32	28	70	333	
	Activité spécifique	8,1	6,0	1,2	0,4	3,7	8,4	

L'apport d'une fumure phosphatée et les conditions d'incubation apportent de profondes modifications dans le phosphore minéral du sol. L'examen du tableau ci-dessus nous montre l'évolution des diverses formes de P minéral du sol. Le P apporté sous forme de $P(O)_4^{3-}$ en solution passe très rapidement dans les diverses fractions minérales de P du sol et en particulier, dans la fraction P-A1 d'où il est redistribué vers la forme P-Fe. Dans le cas d'une très forte fumure phosphatée, il reste une partie non négligeable, mais faible (environ 10 %) de P, dans les solutions de sol après 6 mois d'incubation (environ 40 % du P apporté est passé dans les fractions extraites après une semaine, et 50 % après un mois d'incubation). Corrélativement au passage vers P-Fe, le compartiment P-A) est réapprovisionné par le P de la fumure. Au cours des 6 mois d'incubation, la fraction P-Ca a

très peu augmenté en valeur absolue (de 15 à 26 p.p.m.) et elle ne représente toujours que 3 % environ des formes de P extraites. Parmi les formes de P occluses, on remarque le passage de 40 à 74 p.p.m. de la fraction P-Fe et de 11 à 19 p.p.m. de la fraction P-Al qui serait l'amorce d'un phénomène d'immobilisation de la fumure apportée. Le tableau ci-après montre bien les divers phénomènes d'évolution des diverses formes de P du sol, après un apport d'une très forte fumure phosphatée.

Référence	Formes de P non occluses			Formes de P occluses		
	Al	Fe	Ca	Fe	Al	Fe-Al
Sol vierge	100	100	100	100	100	100
Sol fertilisé incubé 1 semaine	3 255	334	166	500	125	131
Sol fertilisé incubé 1 mois	3 686	468	244	338	113	92
Sol fertilisé incubé 6 mois	4 060	1 070	288	925	236	133

TABLEAU : Indice d'évolution des diverses formes de P du sol (l'indice 100 est accordé à chaque forme du sol vierge. L'indice du sol fertilisé est calculé par rapport à l'indice 100 en effectuant le % d'augmentation en P de chaque forme du sol)

Les fractions de P extraites les plus radio-actives sont P-Al et P-Fe, leurs échanges avec la solution de sol sont donc très intenses par rapport à ceux des autres fractions. L'activité globale de la fraction de phosphore du sol liée au calcium est faible et du même ordre de grandeur que celle de la fraction P-Fe-Al occlus. Les autres formes de P extraites n'ont qu'un rôle négligeable dans les échanges isotopiques avec la solution de sol. L'activité spécifique la plus forte est celle de la fraction liée à l'aluminium ce qui montre la grande mobilité de cette fraction; la fraction P-Fe ayant une activité globale comparable uniquement à cause de son importance relative. Contrairement aux phénomènes observés pour la répartition du ^{31}P , la fertilisation phosphatée ne modifie pas l'ordre de mobilité des diverses fractions extraites, c'est ainsi que les fractions où les échanges avec la solution de sol sont les plus intenses, sont toujours P-Al et P-Fe.

Pour 5 000 ipm introduits au départ par gramme de sol, l'activité globale et spécifique de chaque fraction extraite varie de façon considérable et irrégulière selon le traitement subi et la durée d'incubation et il est délicat d'en tirer des conclusions. On peut toutefois noter l'augmentation régulière (si l'on excepte le sol témoin) de l'activité spécifique de la fraction P-Al, ce qui pourrait être en relations avec le phénomène de saturation des sites de P du sol très facilement échangeable, suivie d'un rapprochement de la courbe de cinétique de l'axe des abscisses quand la durée d'incubation augmente.

3.2.2 - Sol hydromorphe moyennement organique (Mahitsy)

Sol hydromorphe moyennement organique (Mahitsy)		Formes de P non occluses			Formes de P occluses			Somme des formes de P extraites
		Al	Fe	Ca	Fe	Al	Fe-Al	
Sol témoin	p.p.m. P	157	120	50	55	7	51	440
	%	36	27	11	13	2	12	
	Activité pour 5 000 l.p.m. de départ	678	757	122	28	73	133	
	Activité spécifique	4,3	6,31	2,03	0,51	3,28	2,61	
Sol fertilisé incubé 1 semaine	p.p.m. P	785	141	27	40	32	53	1 078
	%	73	13	35	4	3	5	
	Activité pour 5 000 l.p.m. de départ	807	656	16	14,8	32	35	
	Activité spécifique	1,03	4,66	0,61	0,37	1,0	1,79	
Sol fertilisé incubé 6 mois	p.p.m. P	582	490	125	235	27	74	1 533
	%	38	32	8,2	15	2	5	
	Activité pour 5 000 l.p.m. de départ	1100	774	73	16	47	137	
	Activité spécifique	1,96	1,47	0,58	0,07	1,74	1,85	

Les phénomènes de passage du P soluble apporté par la fumure vers les formes P-Al, P-Fe sont accélérés dans le sol de Mahitsy, c'est ainsi qu'après 1 semaine, 65 % environ et la totalité en 6 mois du P apporté sont passés dans le "pool phosphate minéral" du sol. La fraction P-Al "absorbe" très rapidement (moins d'une semaine) une grande quantité du P apporté qui est ensuite redistribué vers P-Fe et peut-être vers P-Ca. La vitesse de passage vers P-Fe est toutefois moins importante que celle observée pour le sol d'Ambatobe. Contrairement aux phénomènes observés sur sol ferrallitique, la fraction P-Ca augmente de façon non négligeable (de 50 à 125 p.p.m.) pendant les 6 premiers mois d'incubation, après une chute pendant la première semaine. En ce qui concerne les formes de P occluses, le phénomène d'immobilisation dans la forme P-Fe est plus accentué sur ce sol (235 p.p.m. de P immobilisés en 6 mois).

Les indices d'évolution des diverses formes de P sont consignés dans le tableau ci-dessous :

Références	Formes de P non occluses			Formes de P occluses		
	Al	Fe	Ca	Fe	Al	Al-Fe
Sol vierge	100	100	100	100	100	100
Sol fertilisé incubé 1 semaine	500	117	54	73	457	104
Sol fertilisé incubé 1 mois	3/1	408	250	427	386	145

Ils montrent bien l'évolution des diverses formes de P en fonction du temps; ce sol étant beaucoup plus riche en phosphore que le précédent, à l'état naturel, ils atteignent des valeurs moins élevées que pour le sol d'Ambatobe.

Tout comme dans le cas précédent, les fractions de P les plus actives restent P-Al et P-Fe, l'activité des autres fractions étant négligeable, sauf en ce qui concerne celle des formes occluses dans les oxydes de fer et d'Aluminium.

La fertilisation phosphatée ne modifie pas l'ordre de mobilité des diverses fractions extraites, on peut observer après une semaine d'incubation que l'activité spécifique de la fraction P-Al est inférieure à celle de la fraction P-Fe, l'ordre habituel étant rétabli après 6 mois d'incubation, ceci est dû à la grande accumulation de Phosphore dans la fraction P-Al après une semaine d'incubation.

3.2.3 - Synthèse

Le fractionnement selon CHANG et JACKSON des échantillons ayant reçu au laboratoire une très forte fumure phosphatée met en évidence, pour 2 sols différents, le même mécanisme de passage du P apporté sous forme soluble, dans les fractions minérales de phosphate du sol. Les ions phosphates entrent très rapidement dans le "pool des phosphates minéraux du sol" par l'intermédiaire de la fraction P-Al et sont ensuite redistribués vers la fraction P-Fe. Ce phénomène est très sensible et très rapide sur sol hydromorphe; dans ce dernier cas, le passage du P de la fumure vers la forme P-Ca n'est pas négligeable, après 6 mois d'incubation. Enfin, des phénomènes d'immobilisation dans les formes occluses commencent à se faire jour après 6 mois d'incubation. Ces résultats confirment l'étude de CHANG et CHU qui, sur des sols acides, ont montré le rôle important de la fraction P-Al dans la fixation de phosphates solubles par le sol. Selon ces auteurs, ce phénomène serait dû à l'importante surface relative liée à l'aluminium, de la phase solide en contact avec la solution de sol; la redistribution du P ayant ensuite lieu au prorata des activités ioniques des ions Ca, Fe et Al du sol.

4 - CONCLUSIONS

L'étude comparative des cinétiques d'échange isotopique sur les sols enrichis en phosphore au laboratoire, nous a conduit à émettre l'hypothèse de l'existence dans le sol de sites de fixation du phosphore; ces sites de fixation sont de plusieurs sortes et peuvent être caractérisés par une énergie de liaison du phosphore avec le sol plus ou moins importante. Lors de l'apport d'une fumure phosphatée, les sites à énergie la plus faible sont saturés en phosphore qui passe ensuite sur des sites à énergie de liaison plus importante. Les conditions d'hydromorphie peuvent modifier la répartition de ces sites et les rendre plus accessibles aux ions phosphates, elles peuvent donc augmenter la proportion de sites de fixation du phosphore "facilement échangeable" du sol.

Dans la deuxième partie de cette étude, nous avons vu que dans les sols étudiés, les fractions de phosphore de sol liées au fer ou à l'aluminium étaient en grande partie responsables des phénomènes d'échange isotopique du phosphore avec la solution de sol et d'absorption de celui-ci sur la phase solide du sol. Ces constatations confirment les hypothèses émises par CHANG et CHU qui, sur des sols acides, indiquent l'importance de la fraction P-Al dans la fixation des phosphates solubles par le sol et plus récemment les travaux entrepris aux U.S.A. sur la transformation des phosphates dans les sols submergés.

REMERCIEMENTS

Les travaux présentés ici n'ont pu être entrepris que grâce à l'appui apporté par :

- d'une part : l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (I.A.E.A. Vienne) sous forme d'une importante aide financière (contrat de Recherches 727/RB)

d'autre part : le Laboratoire des Radio-isotopes de Tananarive et le C.E.A. de France sous forme de prêt de matériel et de fourniture des sources de Radiophosphore nécessaires à l'expérimentation. Nous tenons à remercier sincèrement MM. les Directeurs et Chefs de Service de ces organismes pour leur aide précieuse.

BIBLIOGRAPHIE

1. DABIN : *Cours de chimie du sol O.R.S.T.O.M.*
2. P. ROCHE, J. VELLY, J. DELTON : *Fertilisation de Redressement et entretien de la Fertilité* (Doc. I.R.A.M. N° 764).
3. Jean-Claude FARDEAU et Paul MARINI : *Sur la détermination des cinétiques d'échange isotopique des ions phosphates d'un sol* (C.R. Acad. Sc. de Paris - t. 267 pp. 324-327 (15 Juillet 1968)).
4. Jean-Claude FARDEAU et Paul MARINI : *Détermination par échange isotopique en retour du compartiment des ions phosphates les plus mobiles du sol.* (C.R. Acad. Sci. Paris - t. 267 pp. 427-430 (22 Juillet 1968)).
5. CHANG et JACKSON : *Fractionation of soil phosphorus* (soil-Science 1957 - vol. 84 n° 2, pp. 133-144).
6. *Fractionnement des différentes formes du phosphore du sol : Technique mise au point au Service de sol de BONDY d'après la méthode de CHANG et JACKSON.*
7. R. CHAMINADE : *Bilan de trois années d'expérimentation en petits vases de végétation* (L'Agronomie Tropicale n° 11 - Novembre 1955, pp. 1101-1152).
8. CHANG et CHU : *The fate of soluble phosphate applied to soils.* (The journal of soil Science Vol. 12, n° 2, Sept. 1961).
9. *Phosphate transformation in waterlogged soils* (Rapport annuel 1969) : Rice experiment station Crowley (Louisiana) pp. 57-62.