

Apport d'un essai de longue durée pour la gestion à long terme du phosphore dans les systèmes de culture à bas niveaux d'intrants du sud de la France.

COLOMB Bruno

UMR1248 AGIR INRA/ENSAT, BP 52627 Auzeville, F-31326 Castanet Tolosan,
colomb@toulouse.inra.fr

Selon une compilation réalisée par P. Castillon (non publiée, communication personnelle), près de 105 essais pluriannuels pour l'étude de la réponse des cultures à la fertilisation phosphatée ont été mis en place pendant les cinquante années entre 1946 et 1996. L'essai de Toulouse Auzeville, créé en 1969, fait partie du petit nombre d'essais toujours en vigueur, ayant acquis le statut d'essai de longue durée, voir de très longue durée (plus de 30 ans).

Diverses publications, portant sur une partie des résultats, lui ont permis de participer, comme tant d'autres, à la formulation et à l'évolution des modes de raisonnement de la fertilisation phosphatée des grandes cultures depuis le début des années 70 (Blanchet et al., 1973 ; Bosc et Blanchet, 1976 ; Bosc, 1981 ; Boniface et Trocmé, 1988 ; Colomb et al., 1995, 1998, 2000 ; Plénet et al., 2000).

Après un rappel du contexte pédoclimatique et cultural de l'essai, sont exposés ici les résultats les plus importants, qui peuvent s'intégrer dans le corps de référence requis par les systèmes de conseil en fertilisation basés sur les analyses de terre (Castillon et al., 1993 ; Denoroy et al., 2004). Pour plus détail, on se reportera à une synthèse récente des données acquises sur le dispositif durant la période 1969 à 2003 (Colomb et al., 2007).

Contexte

L'essai P a été mis en place en 1969 à Auzeville (43.5°N, 1.43°E) de manière concomitante avec un premier dispositif expérimental dédié aux systèmes de grandes cultures, sur le Centre INRA nouvellement créé à proximité de Toulouse (Marty et al., 1975, 1982). Depuis lors, le choix des cultures et des itinéraires techniques appliqués sur l'essai P ont toujours été proches des variantes de systèmes de culture « économes », peu « intensifs » ou à « bas niveaux d'intrants » testés dans le cadre des diverses expérimentations dédiées aux systèmes de cultures, conduites à proximité sur le même site (Debaeke et Hilaire, 1997; Nolot et Debaeke, 2003).

Le sol, développé sur des alluvions de la vallée de l'Hers, présente une hétérogénéité de composition minérale notable (table 1) dans l'horizon de surface. La teneur en argile manifeste un gradient de 200 à 300 g/kg selon le grand axe longitudinal de l'essai. Les quatre blocs de traitement initiaux se répartissent le long du gradient, celui-ci ayant été repéré dès la création de l'essai.

Table 1 : Propriétés et concentrations initiales en phosphore du sol de l'essai d'Auzeville.

Propriétés du sol	Unités	Min	Moyenne	Max
Argile	g/kg	204	258	302
Limon fin	g/kg	147	168	192
Limon grossier	g/kg	141	167	190
Sable fin	g/kg	170	198	220
Sable grossier	g/kg	84	164	278
CEC	cmol(+)/kg	10,4	15,6	18
CaCO ₃	g/kg	0	17,4	73
pH (rapport sol/eau 1:10)	-	6,6	7,8	8,4
Carbone total	g/100g	0,82	0,9	0,97
Azote total	g/100g	0,101	0,119	0,134
C/N	g/g	6,9	7,6	8,1
Total P	mg/kg	402	546	690
P organique	mg/kg	129	159	197
P Olsen	mg/kg	4,4	6,2	9,2

La teneur en carbonate de calcium varie de 0 % à 75 g/kg, ce qui détermine des valeurs de pH variant de 6.4 à 8.4 (figure 1). Cette variation est en relation directe avec le niveau d'apparition en profondeur de la molasse, horizon BTca calcaire, entre 0.40 et 1.2 mètre. Par chance il y a, pour chaque traitement P, autant de parcelles élémentaires dans les zones de sol carbonaté que dans les zones de sol décarbonaté. La teneur en carbone et en azote total varie étroitement en fonction des teneurs en argile et en carbonate de calcium, compte tenu du phénomène de protection qu'exercent ces deux éléments sur les composés organiques du sol. La minéralisation des composés organiques produit en moyenne 80 unités d'azote par an, en dehors des années climatiques exceptionnelles.

La réserve utile en eau est environ de 150 mm par mètre de profondeur. Le profil ne présente pas d'obstacle particulier à la croissance en profondeur des racines, en dehors d'une certaine compacité générale (densité apparente 1,35 à 1.45), tempérée par une forte aptitude à la fissuration du sol.

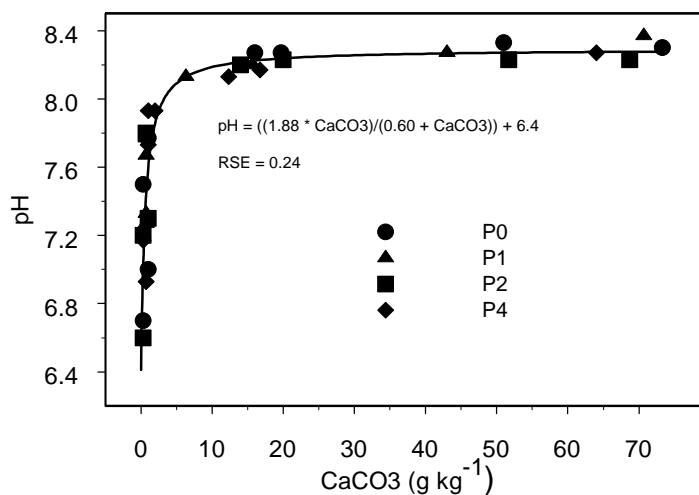


Figure 1 Teneur en carbonate de calcium et pH des parcelles de l'essai d'Auzeville.

Les températures annuelles minimales, moyennes et maximales, enregistrées depuis 1969 par une station de mesure située à proximité de l'essai, sont respectivement de 8.5, 13.1 et 17.9° C. Les précipitations annuelles moyennes ont été sur la période 1969-2003 de 700 mm, et l'ETP (Penman) de 885 mm. L'ETP mensuelle est supérieure aux pluviométries de mars à septembre. La grande variabilité du niveau des précipitations et de leur répartition est un déterminant fort de la production des diverses cultures. Des indicateurs de stress hydrique subis par les cultures au moment de la floraison et au cours de la phase de remplissage du grain ont été calculés à l'aide d'un modèle de bilan hydrique simplifié (Nolot & Debaeke, 2003). Vingt deux cultures ont souffert d'un stress hydrique modéré à fort durant au moins l'une des deux phases du cycle (Colomb, 2007).

Un gradient de fertilité phosphorique selon le grand axe de l'essai a été identifié en 1969, avec des teneurs en phosphore extraits au réactif Dyer sur 15 échantillons variant de 50 à 150 mg P₂O₅/kg. En 1988, des extraits au réactif Olsen (1954) imposés aux mêmes échantillons ont révélé des teneurs comprises entre 4,4 et 9,2 mg P/ kg, avec une teneur moyenne de 6,2 mg P/ kg .

Itinéraires de fertilisation appliqués :

Initialement, quatre régimes de fertilisation ont été retenus. Le traitement P1 consistait à apporter annuellement une quantité de P compensant strictement le niveau moyen des exportations de P associées à la récolte des grains (17.5 kg de P /ha). Dans les traitements P2 et P4 les doses annuelles d'apport correspondaient respectivement à deux et quatre fois le niveau des exportations. Dans le traitement P0 aucun apport d'engrais P n'est effectué. Les parcelles d'origine (50 m de long par 6 m de large) ont été placées côte à côte en quatre blocs adjacents. Un premier changement dans les doses d'apports a eu lieu en 1992, avec une forte diminution des doses apportées en P1, P2 et P4 qui passent respectivement à 11, 22 et 22 kg de P/ha, puis un second en 1994 visant à relever l'apport en P4 à 33 kg de P / ha. Depuis lors, les régimes de fertilisation sont inchangés. Les apports s'effectuent manuellement, sous forme de superphosphate contenant 25 % de P₂O₅, à l'automne sur les céréales, en fin d'hiver ou début de printemps avant les cultures d'été. Par une division des parcelles élémentaires dans le sens de la plus grande dimension, le nombre de répétitions par traitement a été porté à huit à partir de 1990.

La table 2 présente les cultures pratiquées depuis 1969, le nom de variétés utilisées, ainsi que les apports d'eau et d'azote effectués. Ces apports ont été limités, en cohérence avec le caractère peu intensif du système de culture appliqué sur le dispositif.

Table 2	Année	Culture	Cultivar	N input kg/ha	Irrigation mm	Production kg/ha				Concentration en P des grains (%MS)				
						Signif.	P0	P1	P2	P4	P0	P1	P2	P4
1	1969	Blé	ET. de CHOISY	160	0	S	2952	3548	3625	3610	0,34	0,39	0,40	0,41
2	1970	Maïs	INRA 400	200	0	NS	6690	6710	6900	6930	0,21	0,26	0,27	0,28
3	1971	Maïs	INRA 400	200	0	S	5300	5870	6020	6650	0,20	0,25	0,26	0,27
4	1972	Tournesol	INRA 6501	40	120	S	2400	3000	3300	3600	0,43	0,60	0,60	0,61
5	1973	Soja	AMSOY	0	0	NS	3458	3320	3402	3150	0,48	0,65	0,79	0,86
6	1974	Sorgho	INRA 450	40	0	S	4898	5560	5695	6028	0,26	0,35	0,38	0,42
7	1975	Blé	TOP	140	0	S	2892	4530	4575	4742	0,31	0,36	0,37	0,37
8	1976	Féverole	HYB S45-48B	0	0	S	2505	2625	2640	2552	0,39	0,63	0,72	0,79
9	1977	Blé	TOP	50	0	S	4175	4648	5045	5045	0,32	0,44	0,48	0,53
10	1978	Sorgho	NK121	100	0	S	4598	6162	6468	6468	0,39	0,50	0,54	0,60
11	1979	Blé	TOP	180	0	S	2928	3870	3710	3698	0,34	0,40	0,40	0,41
12	1980	Sorgho	NK121	200	0	S	4332	5808	6160	6340	0,39	0,57	0,63	0,69
13	1981	Féverole	TALO	0	0	S	2780	4142	4378	4268	0,40	0,54	0,59	0,64
14	1982	Blé	TOP	120	0	S	4135	4752	4722	4840	0,30	0,35	0,36	0,36
15	1983	Colza	JET NEUF	105	0	S	2442	3435	3338	3422	0,23	0,32	0,32	0,33
16	1984	Sorgho	NK121	150	0	S	4960	6295	6332	6425	0,20	0,28	0,30	0,33
17	1985	Tournesol	TOPFLOR	0	0	NS	3238	3340	3415	3455	0,47	0,60	0,65	0,67
18	1986	Blé	GALA	133	0	S	4588	5935	5838	5755	0,31	0,37	0,37	0,38
19	1987	Pois	FRISSON	0	0	S	502	2448	2795	2600	0,27	0,40	0,45	0,49
20	1987	Maïs	LG11	120	240	S	4798	5980	6902	6722	0,21	0,26	0,27	0,28
21	1988	Tournesol	PHARAON	0	0	NS	3005	3248	3242	2932	0,48	0,66	0,67	0,68
22	1989	Soja	SPOT	0	120	S	1875	2368	2412	2438	0,46	0,68	0,75	0,82
23	1990	Blé	VIZIR	80	0	S	2748	3858	4132	4178	0,33	0,38	0,39	0,40
24	1991	Maïs	SABRINA	160	185	S	7103	7706	8126	8120	0,24	0,28	0,31	0,33
25	1992	Maïs	FURIO	175	60	S	5680	6714	7312	7368	0,20	0,24	0,26	0,27
26	1993	Blé	SOISSONS	150	0	S	4690	6640	6696	6925	0,31	0,33	0,34	0,36
27	1994	Tournesol	SELECT	60	65	S	2333	2678	2918	2711	0,51	0,71	0,72	0,73
28	1995	Maïs	VOLGA	180	100	S	7103	10245	10566	10615	0,17	0,22	0,24	0,25
29	1996	Maïs	VOLGA	180	140	S	8685	9965	10251	9970	0,18	0,21	0,22	0,23
30	1997	Blé	NEODUR	220	0	S	2943	4629	4938	5191	0,33	0,41	0,44	0,45
31	1998	Maïs	VOLGA	200	190	S	8948	11182	10969	11023	0,16	0,21	0,22	0,24
32	1999	Maïs	VOLGA	220	230	S	4162	7443	7548	8395	0,22	0,27	0,28	0,29
33	2000	Tournesol	ALBENA	60	0	S	2506	2672	2960	3080	0,59	0,73	0,77	0,83
34	2001	Blé	SOISSONS	140	0	S	4135	4822	5099	5159	0,35	0,40	0,40	0,41
35	2002	Soja	DEKABIG	0	90	S	3597	4466	4606	4804	0,36	0,42	0,44	0,49
36	2003	Blé	PROVENZAL	180	30	S	3310	4586	5065	5364	0,28	0,38	0,43	0,42

(S) La production du traitement P0 diffère significativement de la production maximale (P<0.05) observée dans les traitements P2 et P4. (NS) Différence non significative.

Tous les résidus de récolte ont été incorporés au sol, soit par labour (profondeur moyenne 27.5 cm) soit par cover-crop. Les adventices ont été bien contrôlées par des herbicides et les alternances de cultures d'hiver et d'été. Les traitements fongicides ont été très rares, la prévention du développement des maladies reposant sur le choix des cultivars. Malgré cette précaution, un tournesol a été très affecté par *Diaporthe helianthi* en 1994. La rouille *Puccinia recondita* a limité fortement la production du blé en 2001. A noter que la grêle a sévèrement endommagé un tournesol en 1972 ainsi que la seule culture de pois mise en place sur le dispositif, avant un maïs la même année (1987).

II Résultats :

21 Différenciation de la production, de la composition des grains et des exportations en fonction des itinéraires de fertilisation appliqués.

La production maximale a été obtenue systématiquement sous les traitements P2 et P4 (table 2), ainsi que le traitement P1 hormis pour quatre cultures (1987, 1992, 2000 et 2003). Les rendements, faibles à moyens en valeurs absolues, sont du même ordre que ceux observés dans des situations similaires sur la même période.

La production relative observée en l'absence de fertilisation (P0) a été en moyenne de 0,77 (0,5 à 1, selon les années cultures), par rapport à la production maximale. Le blé dur (2 années) a été la culture la plus sensible (0,6) à cette absence. Le blé tendre, le maïs et sorgho ont manifesté une sensibilité moindre et voisine (0,74 à 0,77). Le tournesol a été la culture la moins sensible, avec un rendement relatif moyen de 0.83.

La non fertilisation a entraîné une baisse significative de la production 32 années sur 36 (table 2).

La concentration maximale en P des grains a été observée chaque année en P4.

Les concentrations relatives observées en P2, ont été proches (0,9 à 1.0) de la valeur de référence mesurée en P4 pour toutes les cultures.

Les concentrations relatives relevées en P1 ont été plus variables, avec des valeurs de 0,75 à 0,97. En l'absence de fertilisation (P0), les concentrations en P relatives des grains ont varié de 0,5 à 0,85.

Figure 2. Production relative (par rapport à la production maximale) observée pour les différentes cultures (WH : blé; MA : maïs; SB : soja; FB : féverole; RA : colza; SF : tournesol; SG : sorgho).

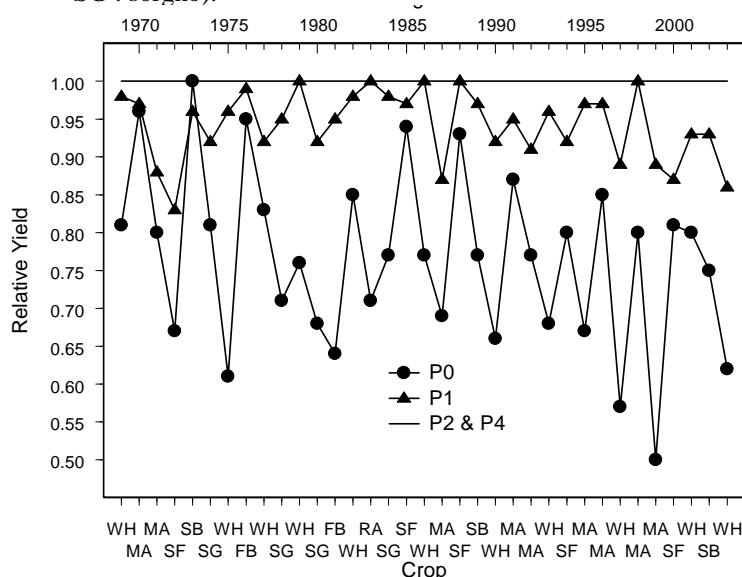
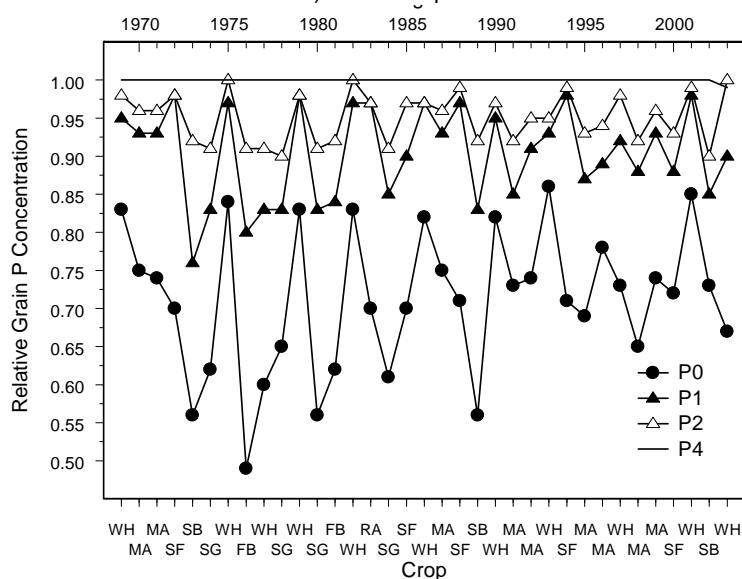


Figure 3. Concentration relative en P des grains (par rapport à la concentration maximale) observée pour les différentes cultures



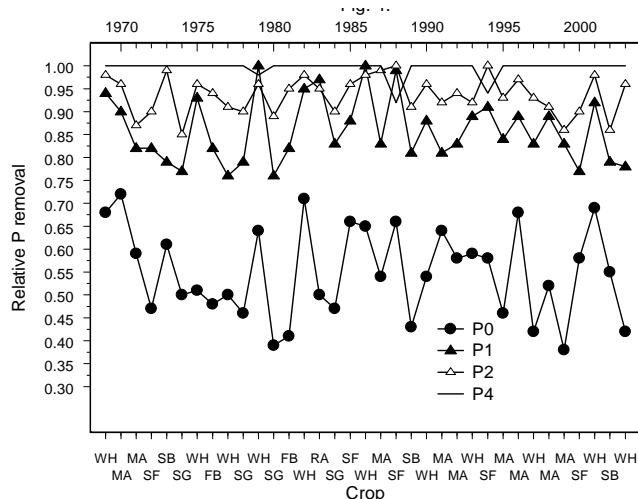


Figure 4. Concentration relative en P des grains (par rapport à la concentration maximale) observée pour les différentes cultures

Les exportations maximales en P associées à la récolte des grains ont été en moyenne de 21,9 kg de P/ha/an en P4. Les exportations relevées en P2 ont été proches (20,5 kg P/ha/an). Les exportations sous le régime P1 ont été plus variables (75 à 100% des exportations relevées en P4), avec une moyenne de 18,6 kg P/ha/an, voisine de la valeur anticipée par les créateurs de l'essai (17,1 kg P/ha/an). Les exportations moyennes annuelles en l'absence de fertilisation (P0) se sont élevées à 11,7 kg P /ha, soit 53% des exportations maximales (figure 4).

22 Evolution du P extractible Olsen au cours du temps et en fonction du bilan de P cumulé.

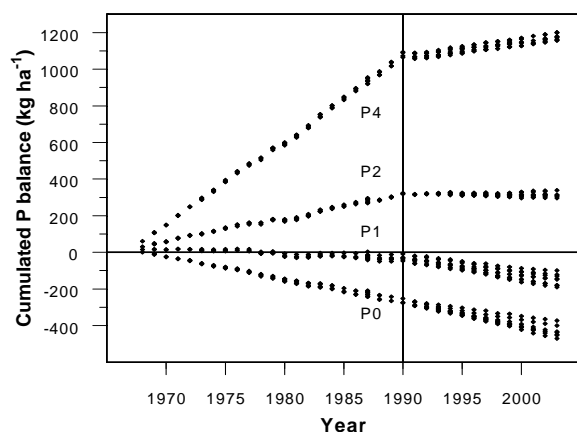


Figure 5. Evolution du bilan cumulé de P au cours du temps

L'évolution du bilan cumulé de P sous les différents traitements est représentée figure 5. Fin 2002, les bilans cumulés étaient de -432, -150, +320 et +1180 kg P / ha, respectivement pour P0, P1, P2 et P4.

L'impact de la réduction du niveau des apports annuels effectués en 1991 apparaît nettement sur la pente d'évolution du bilan pour les trois régimes de fertilisation.

Un changement de vitesse et/ou de sens d'évolution de la concentration en P Olsen des horizons de surface s'est manifesté rapidement après la réduction des apports annuels. L'intensité du changement a varié selon que les sols étaient carbonatés ou non (figure 6).

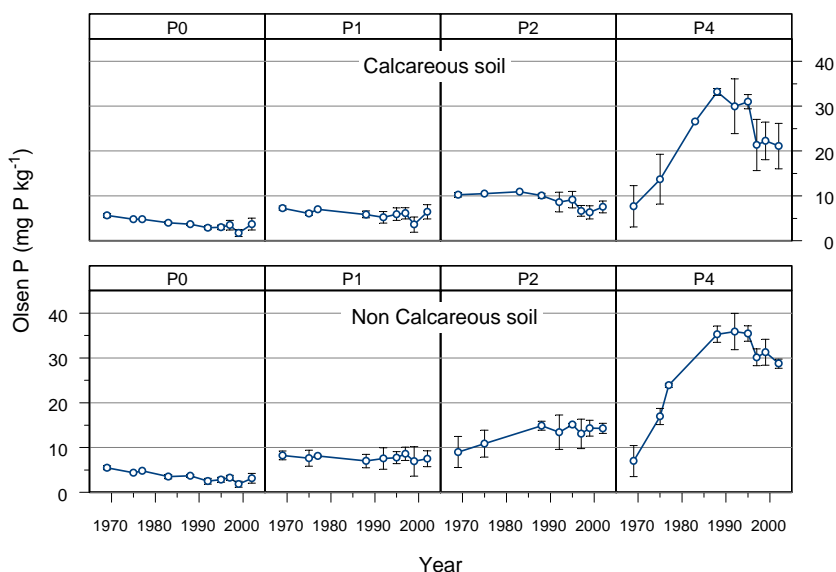


Figure 6. Evolution de la concentration en P Olsen de la couche de sol labourée.

La table 3 présente la vitesse d'évolution de la concentration en P Olsen en fonction du temps (résultats en gras, exprimés en mg P / kg terre / an) et en fonction du bilan de P cumulé (résultats entre parenthèses, exprimés en mg P / kg terre / 100 kg de P soit déficitaire, soit excédentaire) pour la période 1969 à 1991.

Table 3 : Vitesse d'évolution de la concentration en P Olsen du sol

	P0	P1	P2	P4
Sol carbonaté	- 0,10 (-0,78)	-0,065	0	+1,36 (+2,50)
Sol décarbonaté		0	+0,30 (+1,90)	1,47 (+3,00)

Le régime de fertilisation P1 a permis de maintenir le niveau de P Olsen à son niveau initial, dans les sols non carbonatés. Par contre, dans les sols carbonatés, une légère évolution négative s'est manifestée. Avec le régime P2, on a observé une stabilité des teneurs en P Olsen dans les sols

carbonatés et une évolution positive dans les sols non carbonatés. Sous le régime P4, l'augmentation des teneurs a été plus importante dans la zone décarbonatée que dans la zone de sol carbonaté.

Après 1991, la concentration en P Olsen sous le régime P2 reste stable dans les sols non carbonatés, mais diminue dans les sols carbonatés, à raison de -0,19 mg P / kg terre / an. En P4, l'évolution est devenue négative (-1,06 mg P / kg terre / an dans les sols carbonatés, -0,76 dans les sols non carbonatés), malgré un bilan annuel de P resté positif.

23 Les seuils de P Olsen en deçà desquels une baisse de la production peut être observée

Il existe diverses méthodes d'appréciation des teneurs du sol en P en deçà desquelles une diminution significative de la production végétale est à craindre (Mallarino et al. 1992).

La plus utilisée en France pour les grandes cultures dérive de l'ajustement de la production relative de grain en fonction de la teneur du sol en P au modèle de réponse dit de Mitscherlich (figures 7, 8 et 9).

Cette méthode, outre le choix d'un modèle formel (exponentiel en l'occurrence), requiert la sélection d'une valeur de production relative par rapport à la production observée en condition d'alimentation en P non limitante (0,95 en général), jugée non acceptable par les agriculteurs.

La valeur seuil de P Olsen la plus basse a été observée pour le maïs (6.9 mg P/kg), Des valeurs très proches ont été obtenues pour le soja (7.5) et le blé (7.8) et le sorgho (8.1). La valeur seuil calculée pour le tournesol (5 années de culture) est apparue la plus élevée (9.8 mg P/kg), et se démarque de toutes les autres significativement.

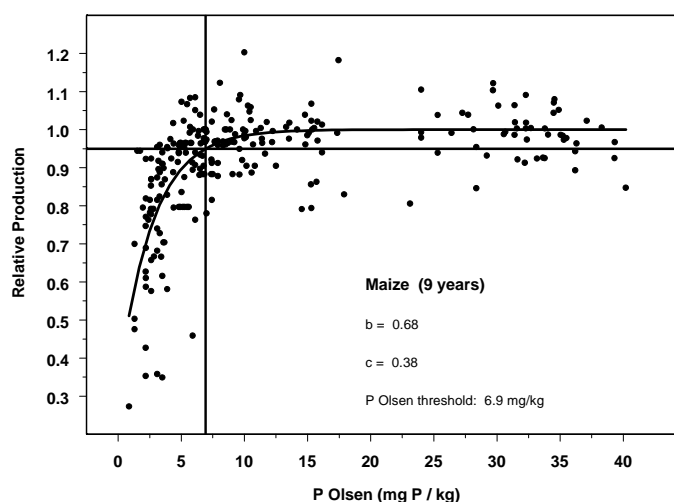


Figure 7. Production relative du maïs en fonction de la concentration en P Olsen

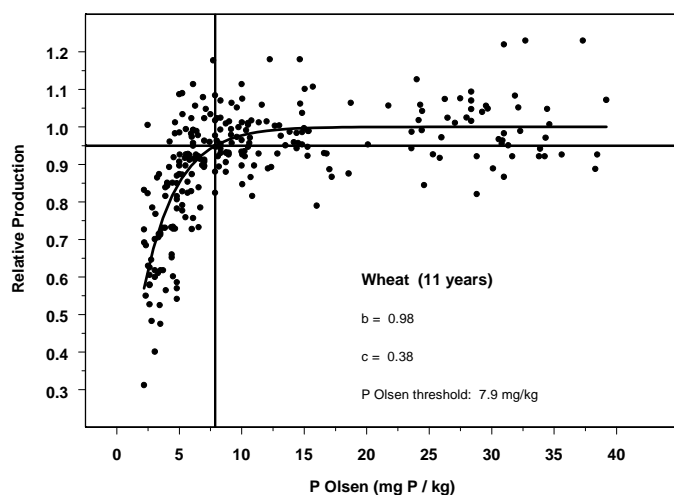


Figure 8 Production relative du blé en fonction de la concentration en P Olsen

La gamme de valeurs seuil identifiée, soit 7 à 10 mg de P/kg pour les diverses cultures, est étroite et se situe dans la partie inférieure de la palette de valeurs (8 à 20 mg P/kg) trouvée dans la littérature pour des cultures similaires (Jackson et al., 1991; Morel & Plenchette, 1992; Matar et al., 1992 ; ...).

A l'échelle de l'ensemble de la succession culturale la faible valeur moyenne des valeurs seuils peut s'expliquer en partie par l'absence de culture dite exigeante dans la rotation, et par le caractère restrictif des ressources hydriques qui limite le potentiel productif des cultures.

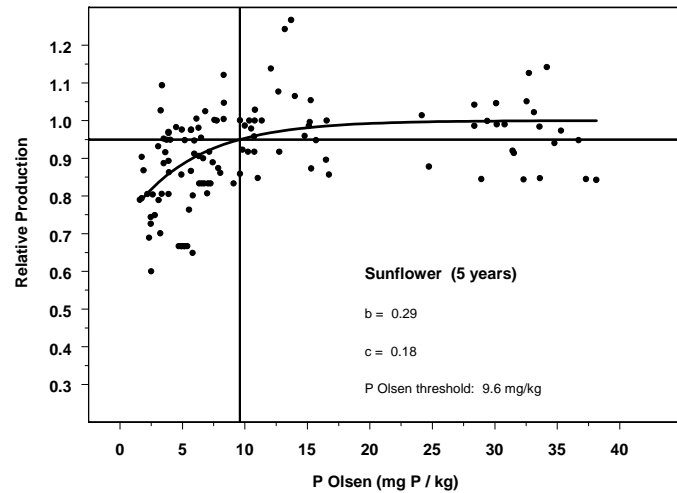
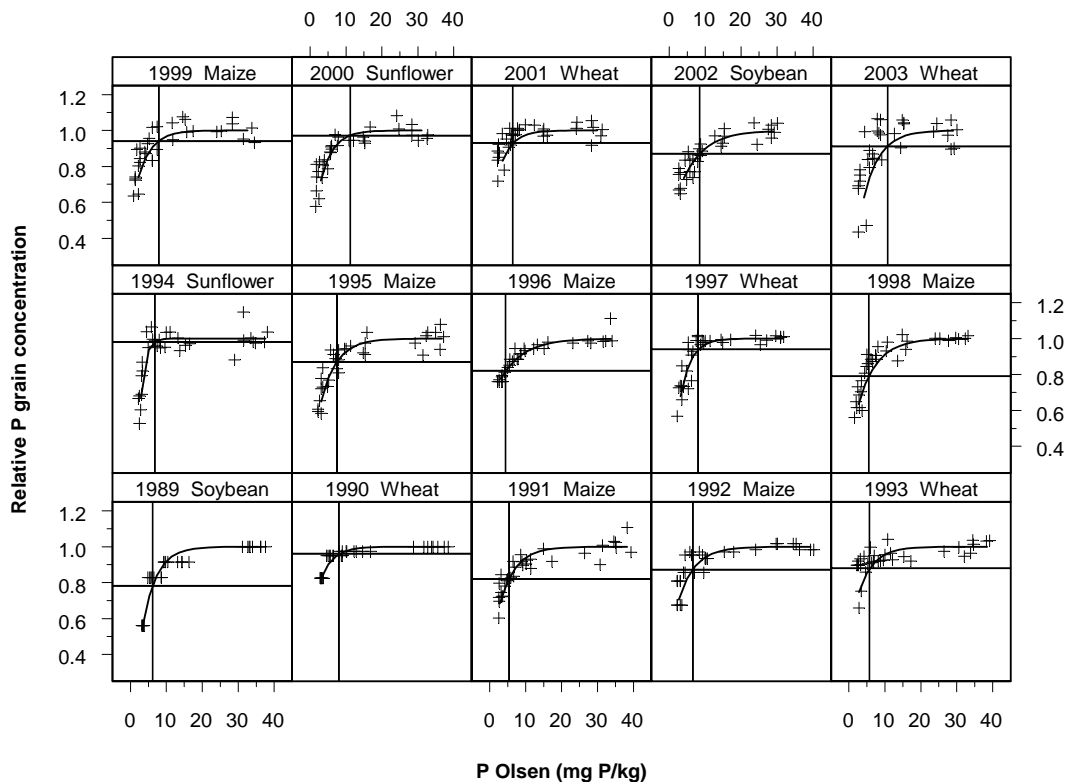


Figure 9 Production relative du tournesol en fonction de la concentration en P Olsen

24 Variabilité de la concentration des grains en P et des exportations en P en fonction de la concentration en P Olsen du sol.

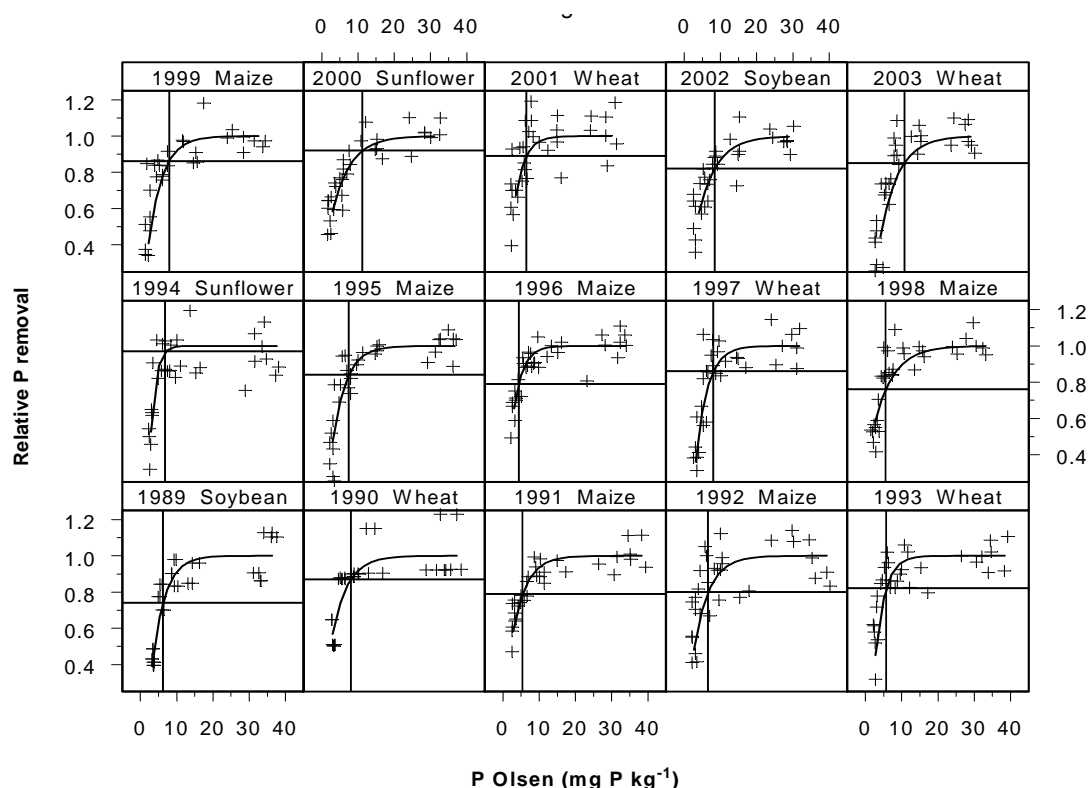
La concentration relative en P des grains à la récolte est étroitement déterminée par le niveau des concentrations en P Olsen du sol (figure 10). Le modèle de Mitscherlich permet de relier les deux variables avec des erreurs résiduelles faibles, pour les diverses cultures. A ce titre, il pourrait être utilisé pour l'estimation des concentrations en P des grains au sein des systèmes de diagnostic et de conseil en fertilisation.

Figure 10 Variabilité de la concentration relative des grains en P en fonction de la concentration en P Olsen du sol.



Produit de la production et de la concentration en P des grains, les exportations relatives sont aussi en très bonne relation avec les concentrations en P Olsen (figure 11).

Figure 11. Variabilité des exportations en P en fonction de la concentration en P Olsen du sol.



Sur les deux figures 10 et 11 les traits verticaux représentent les teneurs seuils de P Olsen correspondant à 95 % de la production maximale de grain observée pour chaque culture. Il apparaît clairement qu'enrichir le sol au-delà des teneurs seuils de P Olsen conduit à une augmentation de 5 à 25 % des exportations de P, non associée à une augmentation de la production, donc improductive et économiquement dommageable.

Conclusion :

L'essai de longue durée d'Auzeville est caractérisé par la simplicité de son protocole (comparaison de 4 itinéraires de fertilisation), sa durée (38 ans en 2007), son système de culture représentatif des systèmes mis en place sur sols argilo-calcaires alluviaux du Midi toulousain, peu ou non irrigués, dont les potentialités productives sont limitées par les disponibilités en eau.

Les résultats obtenus permettent cependant de dégager clairement des références utiles pour le diagnostic de fertilité phosphorique et la gestion de la fertilité phosphorique sur le long terme des parcelles dévolues à ce type de système de culture.

Au-delà du contexte régional, les références produites permettent de nourrir le débat sur la nécessité d'adapter les pratiques de fertilisation en fonction du potentiel de production des parcelles de grandes cultures. Une analyse des réponses culturales observées sur le dispositif en fonction de la concentration de la solution du sol en P est en cours, sur les bases exposées par C. Morel (2002). Une réactualisation complète des références est programmée après la récolte 2009, pour le quarantième anniversaire de l'essai.

Références

Blanchet, R., Bosc, M., Maertens, C., Gelfi, N., 1973. Rôle de la fertilisation dans la résistance des cultures à de mauvaises conditions physiques de sol. Phosphore et Agriculture 61, 45-54.

- Boniface, R., Trocmé, S., 1988. Enseignements fournis par des essais de longue durée sur la fumure phosphatée et potassique. 2- Essais sur la fumure phosphatée. In: Gachon, L. (Ed.), Phosphore et potassium dans les relations sol-plante. Conséquences pour la fertilisation. INRA, Paris, pp. 279-402.
- Bosc, M., 1981. Participation des divers états du phosphore et du potassium du sol à l'alimentation des plantes. Implications sur le diagnostic de la fertilité des sols. In: Actes du Séminaire CEE-Agrimed, Bari 28-30 septembre 1981, pp. 121-139.
- Bosc, M., Blanchet, R., 1976. Réponses de quelques cultures à la fumure phosphatée dans un sol diversement enrichi. Séance du 26 mai. Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France 10, 724-734.
- Castillon, P., Colomb, B., Decroux, J., Diab, M., Fardeau, J.C., Laurent, F., Masse, J., Plet, P., Villemin, P., 1993. Aide au diagnostic et à la prescription de la fertilisation phosphatée et potassique des grandes cultures. Comité Français d'Etude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée (COMIFER). Paris. 45 pp.
- Colomb, B., Bouniols, A., Delpech, C., 1995. Effect of various phosphorus availabilities on radiation-use efficiency in sunflower biomass until anthesis. *J. Plant Nutr.* 18(8), 1649-1658.
- Colomb, B., Cabelguenne, M., Calvet, R., Jouany, C., 1998. Modeling long-term soil labile phosphorus changes with EPIC in a western european cropping system. Contribution No 2462. Symposium No 14. In: CIRAD (Ed.), CD proceedings of the 16th World Congress of Soil Science 20-26:08/1998, Montpellier, France. 4 pp.
- Colomb, B., Kiniry, J.R., Debaeke, P., 2000. Effect of soil phosphorus on leaf development and senescence dynamics of field-grown maize. *Agron. J.* 92(3), 428-435.
- Colomb B., P. Debaeke, C. Jouany, J.M. Nolot. 2007. Phosphorus management in low input stockless cropping systems: Crop and soil responses to contrasting P regimes in a 36-year experiment in southern France. *Europ. J. Agronomy* 26 (2007) 154–165.
- Debaeke, P., Hilaire, A., 1997. Production of rainfed and irrigated crops under different crop rotations and input levels in southwestern France. *Canadian Journal of Plant science* 77, 539-548.
- Denoroy, P., Dubrulle, P., Colomb, B., Fayet, G., Schoeser, M., Marin-Laflèche, A., Pellerin, F., Pellerin, S., Boiffin, J., 2004. REGIFERT : interpréter les résultats des analyses de terre. INRA EDITIONS. Paris.
- Jackson, G.D., Kushnak, G.D., Carlson, G.R., Wichman, D.M., Jacobsen, J.S., 1991. Correlation of the Olsen phosphorus soil test: Winter wheat response. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 22, 907-918.
- Mallarino, A.P., Blackmer, A.M., 1992. Comparison of methods for determining critical concentrations of soil test phosphorus for corn. *Agron. J.* 84, 850:856.
- Marty, J.R., Cabelguenne, M., Puech, J., Hilaire, A., 1982. Irrigation et évolution des systèmes de culture dans la région toulousaine. *Bull. Tech. Inf. Minist. Agric.* 370, 563-571.
- Marty, J.R., Puech, J., Maertens, C., Blanchet, R., 1975. Etude expérimentale de la réponse de quelques grandes cultures à l'irrigation. *Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France* 61, 560-575.
- Matar, A., Torrent, J., Ryan, J., 1992. Soil and fertilizer phosphorus and crop responses in the dryland mediterranean zone. In: *Advances in Soil Science* (Vol. 18). Springer-Verlag, New York Inc., pp. 81-146.
- Morel, C., Plenchette, C., Fardeau, J.C., 1992. La fertilisation raisonnée de la culture du blé. *Agronomie* 12, 565-579.
- Morel, C., 2002. Caractérisation de la phytodisponibilité du phosphore du sol par la modélisation du transfert des ions phosphates entre le sol et la solution. Mémoire préparé en vue de l'obtention du diplôme d'habilitation à diriger des recherches. INRA Bordeaux et Institut National Polytechnique de Lorraine. 80 pages.
- Nolot, J.M., Debaeke, P., 2003. Principes et outils de conception, conduite et évaluation de systèmes de culture. *Cahiers Agricultures* 12, 387-400.
- Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, W.S., Dean, L.A., 1954. Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate. USDA circular 939. U.S. Govt Printing Office. Washington D.C.
- Plénet, D., Colomb, B., Mollier, A., 2000. Root and shoot growth of phosphorus-deficient maize. In: Maillard, P., Bonhomme, R. (Eds.), *Fonctionnement des peuplements végétaux sous contraintes environnementales*. Paris, France, 20-21 January 1998., pp. 305-324.