

repères dans le paysage agricole français

Effet de la rotation sur le potentiel de rendement des cultures Synthèse d'essais de longue durée

Irène Félix

ARVALIS – Institut du végétal, domaine du Chaumoy, 18 570 le Subdray
i.felix@arvalisinstitutduvegetal.fr

Depuis les années 1960, les systèmes agricoles ont profondément évolué dans le sens d'une spécialisation progressive des régions de production, dans le monde comme en France. En conséquence, la diversité des cultures produites dans une région ou sur une exploitation s'est réduite, les rotations se sont simplifiées et raccourcies (Pointereau *et al.*, 2006 ; Mignolet *et al.*, 2012).

La réalité française demeure cependant complexe et plurielle. Les motifs de successions de culture restent divers et ne sont que rarement strictement répétitifs. Sur la période 2001-2005, sur 14 000 parcelles représentant 11 millions d'hectares, ce sont plus de 34 groupes de successions qui ont été caractérisés (Jouy et Wissocq, 2011). Les travaux portant sur la modélisation des décisions des agriculteurs (Dury et Bergez, 2012) montrent que si les assolements agricoles découlent de l'allocation spatiale de différents schémas de successions de cultures – incluant séquences et rotations de culture – ces schémas sont régulièrement modifiés à la suite d'événements climatiques ou d'opportunités de marché. En conséquence, le concept de rotation, tel que mis en essai, reste une représentation partielle et simplifiée de la réalité agricole.

Pour autant, le mouvement qui tendait à recentrer les productions, végétales et animales là où elles étaient le plus rentables, a eu pour conséquence une évolution progressive de leurs conditions de productions. Alors qu'un blé assolé en Beauce était particulièrement rentable et compétitif par rapport à un blé produit dans une région périphérique, qu'en est-il, 40 ou 50 ans plus tard,

d'un blé qui aurait continûment été cultivé en monoculture ? Ou d'un maïs, initialement introduit en rotation avec la prairie dans les sols de limons fragiles, s'il avait tendu à être cultivé en monoculture ? Ou encore d'une tête d'assolement, colza ou pois, revenant fréquemment sur une même parcelle ?

On constate depuis 1995 un ralentissement des gains annuels de rendements régulièrement observés entre 1950 et 1990 sur les grandes cultures et singulièrement sur le blé. Si une part de ce ralentissement a pu être attribuée au climat des deux dernières décennies (Brisson *et al.*, 2010) la question reste posée de l'effet additionnel d'éléments régionaux ou locaux sur les conditions de production (Michel et Makowski, 2013) : quelle part attribuer à l'évolution des techniques de cultures ? À l'évolution des structures d'exploitation ? À l'érosion éventuelle de la fertilité des sols ?

Pour éclairer ce dernier point, il est proposé une relecture des résultats des essais rotations les plus facilement accessibles (voir ci-après), mis en place et archivés au cours des quarante dernières années. On s'attachera à répondre à la question suivante : la simplification des rotations peut-elle avoir eu une influence sur la fertilité des sols ? On entend par fertilité des sols (d'après Sébillotte, 1989) l'aptitude du milieu à assurer un processus de production. Cette aptitude prend en compte le potentiel de production, le coût d'expression de ce potentiel avec ses externalités négatives, par exemple la pression environnementale associée, et la probabilité de l'atteindre.

La mémoire d'Arvalis

Ce travail ne prétend pas à l'exhaustivité sur le sujet. Il s'est concentré sur la mémoire disponible à Arvalis, soit qu'elle ait déjà fait l'objet de publications de synthèse, soit que des compte-rendus annuels ou pluriannuels exploitables aient pu être retrouvés. Ont été ajoutées quelques publications européennes dont nous disposons dans des contextes proches (Belgique, Suisse, Royaume-Uni).

Les tableaux 1 à 5 ci-après recensent les 34 essais exploités et indiquent la source des informations collectées. Tous les essais ou modalités retenus sont en système labouré.

Sauf indication particulière, les comparaisons sont faites sur des cultures semées à la même date, dès lors avec les mêmes variétés, et conduites de façon à ce que le potentiel de la culture puisse pleinement s'exprimer. En particulier, les fertilisations sont homogénéisées pour être non limitantes sur l'ensemble des rotations, ou sont ajustées, pour l'azote, en fonction de chaque rotation selon la méthode du bilan de façon à n'être ni limitantes ni excessives. Dans les essais anglais, des courbes de réponse à l'azote sont mises en place sur les différentes modalités de la rotation : sont alors retenus les meilleurs rendements pour chaque modalité.

De la même façon, la protection contre les bioagresseurs est raisonnée, dans le contexte technique des essais, pour réduire au maximum la nuisibilité des adventices, des maladies et des ravageurs.

On notera que tous les essais sont conduits en sec, y compris ceux concernant le maïs, mettant ainsi en évidence des éventuels effets des rotations sur la disponibilité de l'eau pour les cultures.

Pour permettre une présentation synthétique des résultats, le choix a été fait d'exprimer, dans chaque essai, le rendement moyen de chacune des cultures d'une rotation en valeur relative par rapport au rendement d'une modalité de référence. Cette modalité de référence, présente dans tous les essais, est :

- pour le blé, le blé assolé
- pour le maïs, le maïs en monoculture, avec fertilisation minérale
- pour les têtes de rotation, la ou les rotations où la culture considérée est présente avec une fréquence de retour au plus égale à une fois tous les quatre ans.

Dans un deuxième temps, on reviendra sur les observations faites dans les essais, en quantité et en qualité très variables, pour tenter d'expliquer les écarts de rendement entre les rotations.

L'état des archives sur ces essais, l'évolution des techniques et produits utilisés rendraient délicat et fastidieux le retour à des calculs économiques comparatifs sur les rotations. Mais surtout, la comparaison économique entre rotations n'était pas l'objet des protocoles mis en œuvre : en recherchant explicitement à lever tous les facteurs limitants du rendement, quitte à être en situation de sur-fertilisation ou de sur-protection, les expérimentateurs ne visaient pas une comparaison économique des rotations. Ils avaient pour objectif d'établir si et à quelles conditions il était agronomiquement possible, dans certains cas de supprimer la prairie, dans d'autres de raccourcir des rotations. Toute étude économique éventuellement conduite ultérieurement sur ces données, comme toute comparaison d'usage de produits phytosanitaires (calculs d'IFT) devra impérativement prendre en compte cette réalité.



La Champagne berrichonne, un exemple de systèmes à courtes rotations

Tableau 1. Caractéristiques des essais utilisés par culture. Blé et orge.

Site	Organisme	Source	Modalités mises en essai	Modalités retenues	Sol	Période	Nombre d'années retenues(*)
Prudemanche (28)	ITCF, CA28	Remuaux, 1993	- monoculture de pois - pois, blé - pois, blé, blé - pois, blé, blé, blé - monoculture de blé	Blé assolé, deuxième blé, monoculture de blé	sol limoneux lessivé sur argile à silex	1982-1990	7
Rouvroy-les-Merles (60)	ITCF	Fichier excel, ARVALIS	- monoculture de blé, avec ou sans plantes de coupure - blé, maïs - blé, betterave - monoculture de maïs Pour la monoculture de blé, des déclinaisons en labour et non labour, pailles enfouies ou enlevées ; avec ou sans engrais vert	Monoculture de blé et blé de maïs en labour, pailles enfouies, sans engrais vert (1)	limon argileux	1975-1987	11
Jeu-les-Bois (36)	SUACI des Bordes - ITCF	Vallet, 1990	- trois ans de dactyle, blé, blé, orge - fumier avant dactyle - pailles de céréales enlevées - maïs, blé, blé, orge - fumier avant maïs, pailles de céréales enlevées, maïs en grain en début d'essai, en ensilage ensuite	Deuxième blé de rotation avec prairie et deuxième blé de rotation céréalière (2)	argile limono-sableuse	1978-1987	7
Les Grandes Règes, Jeu-les-Bois (36), blé	SUACI des Bordes - ITCF	Félix I. <i>et al.</i> , 2002	- trois ans de ray grass, (fumier) maïs ensilage, blé, orge pailles enlevées - coiza, blé, orge pailles enfouies	Blé de rotation mixte et blé de rotation céréalière	sablo-limoneux	1987-1998	7
Les Grandes Règes, Jeu-les-Bois (36), orge	SUACI des Bordes - ITCF	Félix I. <i>et al.</i> , 2002	idem	Orge de rotation mixte et orge de rotation céréalière	sablo-limoneux	1987-1998	7
Aulnay-aux-Planches (51), blé	ITCF	Fichier excel, ARVALIS	- betterave, blé, pois, orge - monoculture de blé, avec ou sans plante de coupure ou engrais vert - monoculture de betterave, avec ou sans coupure - monoculture d'orge, avec ou sans coupure	Blé de betterave et monoculture stricte de blé	craie	1977-1988	12
Aulnay-aux-Planches (51), orge	ITCF	Fichier excel, ARVALIS	idem	Orge de pois et monoculture stricte d'orge	craie	1977-1988	12

(*) Des accidents survenus dans l'essai ont pu conduire les rédacteurs des comptes-rendus de synthèses à éliminer des années : nous avons respecté ce choix. Par ailleurs, quand l'information est disponible, il n'est pris en compte les rendements des cultures qu'à partir du moment où la différenciation selon la rotation a pu se manifester c'est-à-dire au bout de deux voire trois ans.

(1) Dates de semis retardées pour les blés assolés par rapport à la monoculture.

(2) Pour les premiers blés de l'essai de Jeu-les-Bois, les décalages de dates de semis entre blé de dactyle (semés tôt) et blé de maïs (semés parfois plus tard), introduit un biais dans les comparaisons de potentiel de rendement.

(3) Les informations disponibles dans l'article cité en référence ne permettent pas de renseigner de qui différencie la série Satoias 1 de la série Satoias 2

Tableau 1 (suite). Caractéristiques des essais utilisés par culture. Blé et orge.

Site	Organisme	Source	Modalités mises en essai	Modalités retenues	Sol	Période	Nombre d'années retenues*
Saint-Pouange (10)	GRCETA de l'Aube, lycée agricole	in Verjux, 1996	- monoculture de blé - blé, betterave	Blé de betterave et blé en monoculture	craye	1981-1986	6
Auzeville (31)	ITCF	in Verjux, 1996	- monoculture de blé - blé, maïs	Blé de maïs et blé en monoculture	limon argilo-sableux	1972-1979	7
Satolas 1 (69)	ITCF	in Verjux, 1996	- monoculture de blé - blé, pois - blé, colza	Blé de pois et blé en monoculture	sable limono-argileux	1978-1988	9
Satolas 2 (69)	ITCF	in Verjux, 1996	idem	Blé de pois et blé en monoculture (3)	sable limono-argileux	1978-1988	11
Satolas 3 (69)	ITCF	in Verjux, 1996	idem	Blé de colza et blé en monoculture	sable limono-argileux	1978-1988	11
Cram Chaban 1 (17)	ITCF	in Verjux, 1996	- monoculture de blé - blé, pois - blé, colza	Blé de pois et blé en monoculture	grotes	1979-1987	9
Cram Chaban 2 (17)	ITCF	in Verjux, 1996	idem	Blé de colza et blé en monoculture	grotes	1979-1987	9
Carnejeane (04)	ITCF	in Verjux, 1996	- colza, blé, pois, blé, orge - monoculture de blé tendre - monoculture de blé dur - pois, blé, orge - pois, blé, blé, orge (4)	Blé de colza et blé en monoculture	argilo-calcaire	1978-1983	6
Boigneville (91)	ARVALIS	Labreuche <i>et al.</i> , 2012	- monoculture de blé - monoculture de maïs - blé, maïs Modalités avec pailles enfouies ou brûlées en monoculture Trois modalités de travail du sol	Blé de maïs et blé en monoculture labouré	limon argileux	1971-en cours	39
Guichainville (28)	ARVALIS, GRCETA de l'Eurevain, CA 27	Fichier excel, ARVALIS	- maïs (puis pois), blé, blé	Blé assolé, deuxième blé	limons	1979-2003	24

Tableau 1 (suite). Caractéristiques des essais utilisés par culture. Blé et orge.

Site	Organisme	Source	Modalités mises en essai	Modalités retenues	Sol	Période	Nombre d'années retenues*
Guichainville (28)	ARVALIS, GRCEITA de l'Evreucin, CA 27	Fichier Excel, Anvalis	- maïs (puis pois), blé, blé	Blé assolé, deuxième blé	limons	1979-2003	24
Oradour Saint-Genest (87)	ITCF	Chambon, 1989	- quatre ans de prairie, maïs ensilage, blé, blé, triticale - colza, blé, maïs grain, triticale	Premier blé de rotation céréalière et blé de rotation mixte	limon sableux	1985-1989	1
Gembloux (Belgique)		Rixhon, 1972, cité par Verjux, 1996	- monoculture de blé - blé assolé	Blé en monoculture et blé assolé	?	?	7
Changins 1 (Suisse)		Vex, 1975, cité par Verjux, 1996	- monoculture de blé - blé assolé	Blé en monoculture et blé assolé	?	?	4
Changins 2 (Suisse)		Vex, 1975, cité par Verjux, 1996	- monoculture de blé - blé assolé	Blé en monoculture et blé assolé	?	?	10
Woburn (Royaume-Uni)		Johnston et Poulton, 2005	- rotation de grandes cultures en continu - introduction en coupure d'une prairie sur 6 ans Modalités complémentaires de différenciation avec apports organiques sur rotation céréalière ; après la phase de différenciation, mise en place de courbes de réponse aux fertilisants minéraux sur les cultures suivantes	Blés suivant la phase de différenciation, sur deux périodes (1974 et 1988) ; pour chaque modalité, il est retenu le meilleur rendement de la courbe de réponse	limon sableux	1965-1988	2
Rothamsted (Royaume-Uni)		Johnston et Poulton, 2005	- monoculture de blé - monoculture interrompue par deux ans de prairie Pour chaque modalité, mise en place d'une courbe de réponse à l'azote	Blé en monoculture et blé de prairie ; pour chaque modalité, il est retenu le meilleur rendement de la courbe de réponse à l'azote	limon argileux	Monoculture depuis 1852 ; différenciation 1968-2000	31

* : des accidents survenus dans l'essai ont pu conduire les rédacteurs des compte-rendus de synthèses à éliminer des années : nous avons respecté ce choix ; par ailleurs, quand l'information est disponible, il n'est pris en compte les rendements des cultures qu'à partir du moment où la différenciation selon la rotation a pu se manifester c'est-à-dire au bout de deux voire trois ans.

(1) dates de semis retardées pour les blés assolés par rapport à la monoculture.

(2) pour les premiers blés de l'essai de Jeu-les-Bois, les décalages de dates de semis entre blé de dactyle (semés tôt) et blé de maïs (semés parfois plus tard), introduit un biais dans les comparaisons de potentiel de rendement.

(3) les informations disponibles dans l'article cité en référence ne permettent pas de renseigner de qui différencie la série Satolas 1 de la série Satolas 2.

(4) seules les données de comparaison entre blé assolé et blé en monoculture sont disponibles dans la publication citée en référence.

Tableau 2. Caractéristiques des essais utilisés par culture. Maïs.

Site	Organisme	Source	Modalités mises en essai	Modalités retenues	Sol	Période	Nombre d'années retenues*
Rouvroy les Merles (60)	ITCF	Fichier excel, ARVALIS	<ul style="list-style-type: none"> - monoculture de blé, avec ou sans plantes de coupure - blé/maïs - blé/betterave - monoculture de maïs Pour la monoculture de blé, des déclinaisons en labour et non labour, pailles enfouies ou enlevées ; avec ou sans engrais vert	Monoculture de maïs et maïs de blé en labour, pailles enfouies, sans engrais vert	Limon argileux	1975-1987	11
Boigneville (91)	ARVALIS	Labreuche <i>et al.</i> , 2012	<ul style="list-style-type: none"> - monoculture de blé - monoculture de maïs - blé, maïs Pour chacune des rotations, trois modalités de travail du sol (labour, travail superficiel, semis direct)	Maïs de blé et maïs en monoculture, labouré	Limon argileux	1971-1994	7
Sereslous (40)	INRA	Fichier excel, d'après Plenet <i>et al.</i> , 1993	<ul style="list-style-type: none"> - monoculture de maïs, résidus enfouis - monoculture de maïs grain résidus enlevés - maïs grain avec ray grass d'Italie en culture dérobée - maïs grain 4 ans, prairie temporaire 4 ans 	Monoculture de maïs pailles enfouies ; maïs grain en monoculture avec ray grass dérobé ; maïs grain en rotation longue avec la prairie ; années communes aux trois modalités	Limon sableux	1968-1991	12
Doazit (40)	INRA	Fichier excel, d'après Plenet <i>et al.</i> , 1993	<ul style="list-style-type: none"> - monoculture de maïs, résidus enfouis - monoculture de maïs grain résidus enlevés - maïs grain avec ray grass d'Italie en culture dérobée - maïs grain 4 ans, prairie temporaire 4 ans 	Monoculture de maïs pailles enfouies ; maïs grain en monoculture avec ray grass dérobé ; maïs grain en rotation longue avec la prairie ; années communes aux trois modalités	Sable limoneux	1968-1991	15
Avrillé (49)	ESA d'Angers	Masson <i>et al.</i> , 1996	<ul style="list-style-type: none"> - ray-grass anglais fauché 4 ans, maïs ensilage - monoculture de maïs - monoculture avec fumier 	Maïs assolé et maïs en monoculture, en fertilisation minérale	Limon argilo-sableux	?-1991 (1)	4
La Jaillière (44)	ITCF	Masson <i>et al.</i> , 1996	<ul style="list-style-type: none"> - fétuque fauchée 5 ans, maïs ensilage, ray grass d'Italie 2 ans - monoculture de maïs - monoculture avec fumier 	Maïs assolé et maïs en monoculture, en fertilisation minérale	Limon argilo-sableux	?-1989 (1)	1

Tableau 2 (suite). Caractéristiques des essais utilisés par culture. Maïs.

Site	Organisme	Source	Modalités mises en essai	Modalités retenues	Sol	Période	Nombre d'années retenues*
Derval (44)	EDE 44	Masson <i>et al.</i> , 1996	- prairies de 4 ans, maïs ensilage - monoculture de maïs ensilage - monoculture avec fumier	Maïs assolé et maïs en monoculture, en fertilisation minérale	Limon argilo-sableux	?-1990 (1)	1
Keirfévèze (22)	CA22	Masson <i>et al.</i> , 1996	- ray grass anglais fauché 4 ans, maïs ensilage 4 ans - monoculture de maïs ensilage - monoculture avec fumier	Maïs assolé et maïs en monoculture, en fertilisation minérale	Limon moyen sableux	1984-1995	9
Plelo (22)	ITCF	Masson <i>et al.</i> , 1996	- ray grass anglais fauché 4 ans, maïs ensilage - monoculture de maïs ensilage - monoculture avec fumier	Maïs assolé et maïs en monoculture, en fertilisation minérale	Limon moyen sableux	?-1991 (1)	5
Vitré (14)	ITCF, Lycée Agricole	Masson <i>et al.</i> , 1996	- ray grass anglais fauché 3 ans, maïs ensilage 3 ans, blé - monoculture de maïs ensilage - monoculture avec fumier	Maïs assolé et maïs en monoculture, en fertilisation minérale	Limon moyen	?-1992 (1)	6
Sud-Ouest	CACG	Le Gall, 1997	- trois à cinq ans de prairie, maïs grain - monoculture de maïs grain	Maïs assolé et maïs en monoculture	Limon (boulbène)	?	?
Quimper (29)	INRA	Le Gall, 1997	- monoculture de maïs ensilage en fertilisation minérale - monoculture avec fumier	Maïs en monoculture, avec fertilisation minérale et avec fumier	Sablo-limoneux sur granite	1978-1986	8
Quimper (29)	INRA	Viaux <i>et al.</i> , 1999	- monoculture de maïs grain - maïs et ray grass d'Italie (6 mois et 18 mois) - maïs en rotation avec blé ou pois	Monoculture de maïs grain, maïs en rotation, maïs avec ray grass de 18 mois	Sablo-limoneux sur granite	1986-1993	1 (1993)

(1) Série d'essais mise en place entre 1984 et 1986. La date de démarrage de chacun des essais n'est pas disponible.

Tableau 3. Caractéristiques des essais utilisés par culture : pois, colza, betterave.

Site	Organisme	Source	Modalités mises en essai	Modalités retenues	Sol	Période	Nombre d'années retenues*
Pois							
Prudemanche (28)	ITCF, CA28	Remuaux, 1993	- monoculture de pois - pois, blé - pois, blé, blé - pois, blé, blé, blé - monoculture de blé	Monoculture de pois ; pois en rotation de deux ans, trois ans et quatre ans	Sol limoneux lessivé sur argile à silex	1982-1990	
Hessange (57)	ITCF	ITCF, 1988	- colza, blé, pois, blé - colza, blé, colza, pois de printemps - colza, pois de printemps, féverole d'hiver, pois de printemps	Moyenne des rendements du pois dans les rotations avec retour tous les 4 ans ; moyenne des rendements du pois en rotation tous les deux ans	Argile limono-sableuse	1978-1985	6
Sainte-Aoustrille (36)	ITCF	ITCF, 1978-1985	- colza, blé, pois, blé - colza, blé, colza, pois - colza, féverole, tournesol, pois	Moyenne des rendements du pois en rotation tous les quatre ans ; moyenne des rendements du pois en rotation avec protéagineux (1) tous les deux ans	Argilo-calcaire	1978-1985	6
Colza							
Hessange (57)	ITCF	ITCF, 1988	- colza, blé, pois, blé - colza, blé, colza, pois de printemps - colza, pois de printemps, féverole d'hiver, pois de printemps	Moyenne des rendements du colza dans les rotations avec retour tous les 4 ans ; moyenne des rendements du colza en rotation tous les deux ans	Argile limono-sableuse	1978-1985	6
Sainte-Aoustrille (36)	ITCF	ITCF, 1978-1985	- colza, blé, pois, blé - colza, blé, colza, pois - colza, féverole, tournesol, pois	Moyenne des rendements du colza en rotation tous les quatre ans ; moyenne des rendements du colza en rotation tous les deux ans	Argilo-calcaire	1978-1985	6
Betterave							
Aulnay (51) - blé	ITCF	Fichier excel, ARVALIS	- betterave, blé, pois, orge - monoculture de blé, avec ou sans plante de coupure ou engrais vert - monoculture de betterave, avec ou sans coupure - monoculture d'orge, avec ou sans coupure	Monoculture de betterave ; betterave assolée en rotation de 4 ans	Craye ?	1977-1988	10

(1) Dans cet essai, on a traité le pois dans une rotation avec protéagineux tous les deux ans (colza, féverole, tournesol, pois) comme un pois avec retour tous les quatre ans.

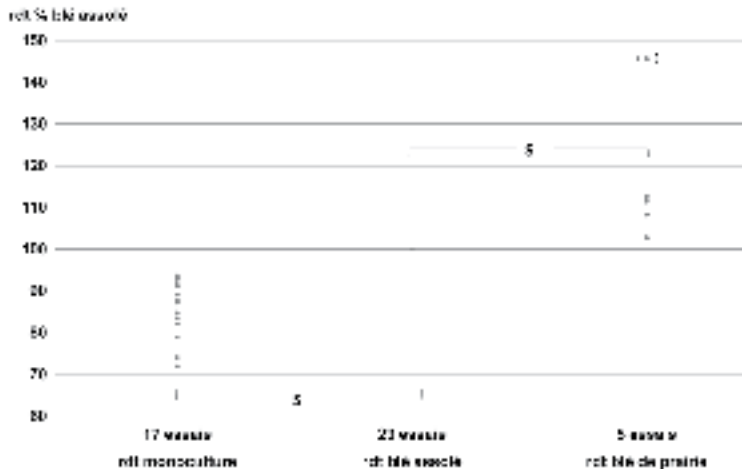


Figure 1. Rendement du blé dans une succession de cultures – essais rotation de longue durée Arvalis et partenaires.

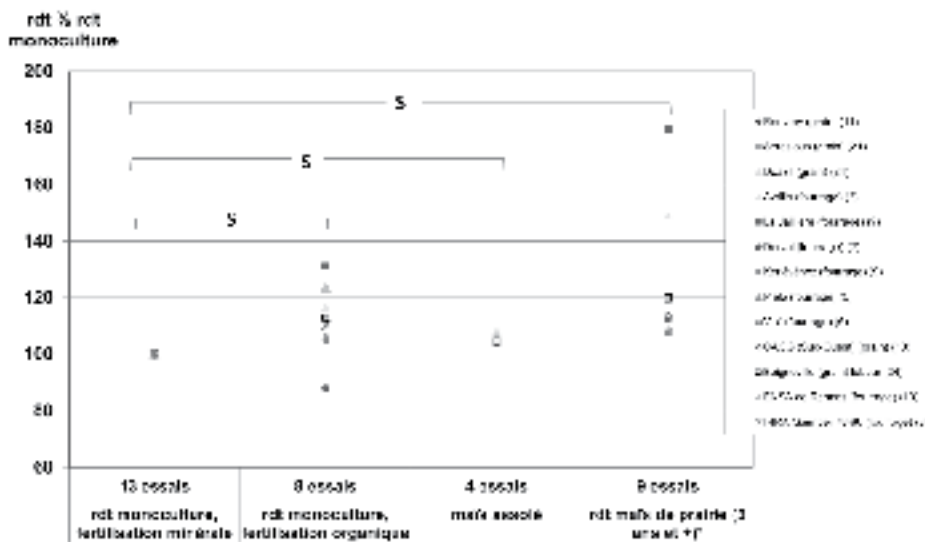


Figure 2 . Rendement du maïs dans une succession de cultures – essais rotation de longue durée Arvalis et partenaires.

Chaque site est représenté par la moyenne pluriannuelle des rendements obtenus sous une rotation, exprimée en % du rendement de la rotation de référence. Le chiffre figurant entre parenthèses à la suite du nom de lieu indique la durée, en années, de l'essai. Les mentions S (significatif) et NS (non significatif) se rapportent aux tests statistiques permettant de comparer les séries de rendements des différentes rotations par rapport à la référence (seuil 5 %). La parenthèse entourant le résultat de l'essai de Woburn (Royaume-Uni) pour le blé indique que ce résultat a été écarté de l'analyse statistique. Sur blé, les comparaisons avec prairie sont toutes conduites dans des sols de limons. Source : Arvalis.

L'effet des rotations sur le rendement

Sur l'ensemble des cultures, le regroupement des résultats met en évidence un gradient de rendement selon la fréquence de retour de la culture dans la rotation. Ce gradient est d'importance plus ou moins marquée selon les cultures et selon les essais (figs. 1 et 2).

Sur blé, le rendement d'une monoculture est de 5 à 25% inférieur au rendement d'un blé assolé (effet significatif). Les blés de prairie, représentés en petit nombre dans notre base de données, toujours en sols de limons à structure fragile, sont en moyenne plus productifs que les blés en rotation de grandes cultures. L'analyse statistique faite sur les seuls essais continentaux met en évidence une différence significative entre ces modalités.

L'introduction de l'essai anglais de Woburn, avec un écart encore plus marqué entre blé assolé et blé de prairie, altère le résultat statistique mais confirme l'effet agronomique de la prairie, particulièrement fort dans des sols de limons et sous climat humide.

En comparaison avec un maïs en monoculture, le rendement du maïs s'améliore de façon significative quand il s'insère dans une rotation incluant d'autres cultures, blé ou prairie de moins de dix-huit mois. L'effet est encore plus marqué pour les rotations incluant des prairies de moyenne ou longue durée, 18 mois au minimum, le plus souvent au moins trois ans. Comme pour le blé, ces observations sont principalement concentrées sur

des sols de limons de l'Ouest de la France, dans des situations pédoclimatiques particulièrement exposées aux risques d'excès d'eau.

On observera par ailleurs, toujours en sols de limons et de sables, l'effet significativement favorable des apports organiques en substitution des engrais minéraux sur le rendement du maïs.

Un des essais conduits par l'Inra de Quimper n'a pas été regroupé ici en raison de son comportement extrême. Dans un contexte de résistance à l'atrazine, la prolifération de morelle limite fortement le rendement de la monoculture de maïs (4,1 t MS/ha). Ce facteur limitant est levé en rotation avec prairie avec des rendements de 12 à 16 t MS/ha. Sur pois, betterave et colza (fig. 3),

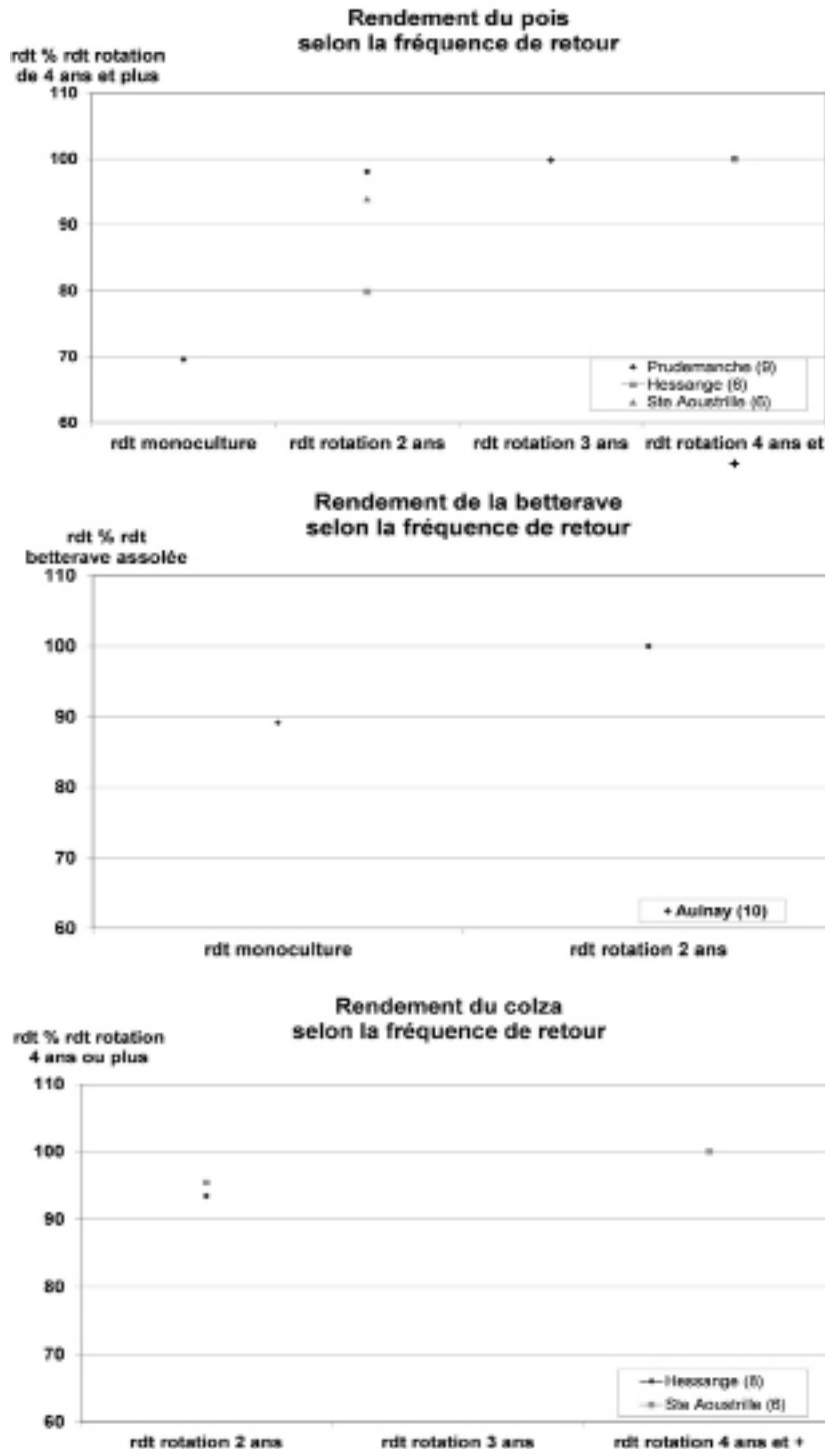


Figure 3. Rendements respectifs du pois, de la betterave et du colza (% du rendement de la culture en rotation longue) – 4 essais.

Rendements (quintaux)

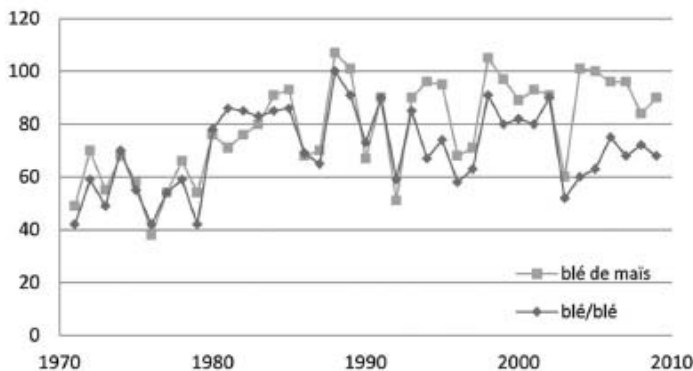
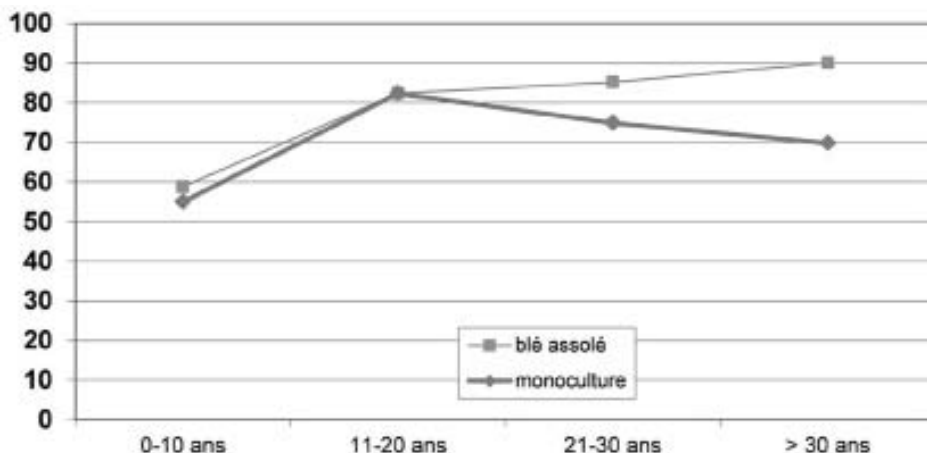


Figure 4. Évolution du rendement du blé assolé et de la monoculture de blé à Boigneville (91) sur quarante ans d'essais par année et par séquence de dix années (modalité labourée).



la référence correspond à une rotation où la culture revient au plus tous les quatre ans (colza et pois) ou tous les deux ans (betterave). L'augmentation de la fréquence de retour de la culture est toujours un facteur de fragilité, avec des rendements en tendance en baisse par rapport à la référence.

L'effet variable de la durée sur les écarts de rendement

Une synthèse faite précédemment (Verjux, 1996) avait montré qu'il n'y avait pas d'aggravation au cours du temps des pertes de rendement en monoculture de blé sur des périodes de 10 à 15 ans. Les observations faites sur l'essai de Boigneville, conduit sur un temps plus long, invitent à réinterroger cette conclusion (fig. 4).

Dans cet essai, on constate que, si le rendement du blé assolé progresse de décennie en décennie, sous l'effet conjugué du progrès technique et génétique, le rendement de la monoculture de blé diminue en valeur absolue à partir de la troisième décennie, c'est-à-dire dans le cas présent à partir des années 1990. En 2010, il a fallu renoncer à récolter, le blé étant étouffé par le ray grass. En moyenne, en monoculture, ce sont plus de 12 quintaux qui ont été perdus entre les années

1981-1990 et les années 2001-2009, quand le rendement du blé assolé gagnait en moyenne 8 quintaux.

L'ensemble des données disponibles sur blé et maïs ont en conséquence été retraités avec un modèle linéaire mixte prenant en compte la durée de l'essai comme covariable (logiciel R). Les conclusions sont les suivantes :

- l'effet significatif de la rotation sur le rendement du blé comme du maïs est confirmé ;
- l'écart de rendement entre blé ou maïs en monoculture et blé ou maïs assolé est en moyenne de 13 q/ha pour chacune des deux cultures, au profit de la culture assolée.
- il augmente de 9 q/ha pour le blé en rotation avec prairie comparativement au blé assolé et de 19 q/ha pour le maïs en rotation avec prairie comparativement au maïs en monoculture ;
- cet écart de rendement s'accroît avec le temps pour le blé de prairie. En ce qui concerne l'écart blé assolé et monoculture de blé, l'analyse n'a pu être faite que sur une période de 14 ans pour intégrer le plus grand nombre d'essais ; sur cette période, il n'y a pas d'évolution significative de l'écart de rendement ;
- pour le maïs, l'écart de rendement entre maïs en monoculture et maïs assolé s'accroît au



cours du temps avec une pente de 0,6% par an : cela peut se traduire par une perte relative de 12% du potentiel de rendement en 20 ans. L'écart entre maïs en monoculture et maïs en rotation avec prairie ne s'accroît pas significativement au cours du temps pour le jeu de données dont nous disposons.

Expliquer les écarts de rendement

Les facteurs explicatifs des écarts de rendement entre les rotations semblent être de nature assez sensiblement différente selon qu'il s'agit d'expliquer des écarts entre cultures assolées et monoculture (ou, pour les têtes d'assolement, forte

fréquence de retour) ou qu'il s'agit d'interpréter les effets de l'introduction d'une prairie dans la rotation. Les tableaux qui suivent reprennent les informations, retranscrites dans les comptes-rendus avec une précision très variable, qui permettent d'interpréter les écarts de rendement.

La monoculture de blé

Pour ce qui concerne la monoculture de blé, de nombreuses synthèses ont déjà été publiées, souvent à partir des mêmes essais que ceux présentés ici (tabl. 4).

Tableau 4. Les facteurs limitants en monoculture de blé (entre parenthèses, nombre de sites concernés).

Composantes du rendement	Sol	Alimentation minérale	Enherbement	Maladies et ravageurs
<ul style="list-style-type: none"> - diminution du nombre d'épis/m² (10) - diminution du poids de mille grains (10) 	Sol plus compact, enracinement moins bien réparti (1)	<ul style="list-style-type: none"> - moins bonne capacité à exploiter le phosphore du sol (1) - alimentation azotée déficiente en début de cycle (cité par Verjux, 1996) 	Ray grass (1)	<ul style="list-style-type: none"> - piétin échaudage : pression équivalente (1 essai) ou plus forte en monoculture (2 essais) ; nombreuses citations non chiffrées faisant état d'une augmentation de la pression en monoculture - nématodes : pression équivalente (1 essai) ou plus forte (1 essai) en monoculture - piétin verse : pression plus forte en monoculture (1 essai) - helminthosporiose : pression plus forte en monoculture (1 essai) - effets sanitaires supplémentaires non identifiés d'impact négatif en monoculture (1 essai) - fusariose de l'épi sur blé : pression plus faible en monoculture de blé comparée à une rotation blé/maïs (1 essai)

Tableau 5. Les facteurs limitants en cas de retour fréquent des cultures têtes d'assolement et leurs effets observés sur le rendement et la qualité des récoltes (entre parenthèses, nombre de sites concernés).

Composantes du rendement	Sol	Alimentation minérale	Enherbement	Maladies et ravageurs
<p>Pois, retour fréquent : diminution du nombre de gousses/tige et du PMG (1)</p> <p>Orge, maïs et betterave : pas d'observation</p>	<p>Pois à retour fréquent : sol plus compact, enracinement moins développé (1)</p> <p>Rotations à base d'oléoprotéagineux : baisse tendancielle de la teneur en matière organique du sol pour des rotations comprenant trois ou quatre oléagineux en quatre ans par rapport à des rotations comprenant deux ou trois pailles (2)</p>	<p>Pois à retour fréquent : baisse de la teneur en protéines en monoculture et en pois tous les deux ans en comparaison avec un pois tous les trois ou quatre ans (1)</p>	<p>Pois à retour fréquent : plus de matricaires (1), renouées (2), vulpin (1 cas + 1 cas contraire), mouron (1), petite cigüe (1), laiteron (1), sanves (1), anthrisque (1), bleuet (1)</p> <p>Maïs en monoculture : spécialisation de flore, plus de morelles (1)</p>	<p>Pois à retour fréquent – nécroses sur collet et racines : pythium (2), phomas (1), nématodes de type <i>Pratylenchus</i> (2), fusarium (1) ; – maladies sur feuilles et tiges : mildiou (1), antracnose (1) ; – ravageurs : augmentation des populations de thrips (1)</p> <p>Maïs en monoculture – maladies du feuillage : kabatiellose (1) ; – système racinaire : pas d'augmentation de la population de nématodes (<i>Heterodera</i>) grâce au développement d'un champignon antagoniste (1)</p> <p>Colza à retour fréquent – maladies des tiges : plus de sclérotinia (1) ; – ravageurs : plus de limaces (1)</p>

En monoculture, la formation du rendement du blé est affectée dès la mise en place du nombre d'épis. Les compensations parfois constatées sur la fertilité épi ne suffisent pas pour restaurer un nombre de grains/m² comparable à celui du blé assolé. Souvent, les écarts de rendement sont encore aggravés par une diminution du poids de mille grains, alors même que la baisse du nombre de grains aurait pu conduire à des compensations sur cette composante. Ces observations suggèrent une perturbation de la plante à toutes les phases du cycle.

Le développement du parasitisme du pied et des racines expliquerait pour une grande part les pertes de rendement : le piétin échaudage est la principale maladie du blé de blé ou de la monoculture du blé, toujours peu ou pas maîtrisée par la génétique comme par des traitements de semences. Elle n'est toutefois pas systématiquement observée. D'autres parasites des racines, tels que les nématodes, peuvent se développer, eux aussi sans solution de protection chimique. Il existe cependant une interaction complexe entre rotation, travail du sol et biologie des bioagresseurs : dans certains cas, relevés dans cette série d'essais, la monoculture de blé permet d'éviter des pressions parasitaires dues à des successions de culture sensibles telles que la succession maïs/blé pour la fusariose de l'épi du blé.

Conséquence de l'affaiblissement du système racinaire, le blé de blé¹ absorbe plus difficilement les éléments minéraux (il est ainsi jugé plus exigeant en phosphore que le blé assolé), talle

moins, exploite moins bien l'eau stockée dans le sol et remplit moins bien son grain. Cette situation peut être aggravée par une détérioration de l'état structural du sol en monoculture, comme constaté à Prudemanche (28). Cette détérioration de l'état structural des parcelles, observée en monoculture de blé comme en monoculture de pois, est expliquée par les auteurs comme une conséquence de l'absence d'alternance des systèmes racinaires des cultures. Faute d'observations sur les autres essais, cette piste ne peut être confirmée.

Les résidus pailleux du blé, riches en carbone et pauvres en azote, organisent l'azote minéral disponible dans le sol après les récoltes. De ce fait, l'alimentation azotée précoce de la culture est moins favorable que lorsque le blé suit un pois ou un colza. Cet écart est réputé compensé par la fertilisation apportée sur les essais. Il se peut toutefois que le rythme de mise à disposition de l'azote pour la plante en soit affecté.

Une forte spécialisation de la flore adventice peut, dans certaines situations (Boigneville en non-labour puis en labour), contribuer à limiter les rendements en monoculture de blé. Ce cas de figure reste rare dans les essais étudiés.

La fréquence de retour des cultures têtes de rotations

Qu'il s'agisse de pois, de colza ou de maïs, les essais mettent en évidence l'effet premier du développement du parasitisme quand la fréquence de retour de la culture augmente. Si certaines des maladies repérées dans ces essais (mildiou du pois, sclérotinia du colza, tabl. 5) ont pu être maîtrisées depuis les époques de réalisation des essais, il y a dix, vingt ou trente ans, d'autres restent sans

1. Expression courante chez les agronomes qui désigne une culture de blé à la suite de blé en monoculture, par opposition au blé assolé



réponses (nématodes). Avec des rotations courtes maintenues sur de plus longues périodes, d'autres bioagresseurs sont apparus depuis la période des essais : *Aphanomyces* sur pois, hernie du colza, chrysomèle sur maïs, etc. Les solutions chimiques et génétiques proposées ont parfois été transitoires (résistances du sclérotinia) et sont, en tout état de cause, coûteuses à mettre au point et à utiliser (tabl. 5).

Les observations sur les composantes de rendement, sur le sol et l'alimentation des plantes sont rares.

La spécialisation de la flore est constatée dans plusieurs essais, sans, à une exception près, provoquer de réelles chutes de rendement. Pour les essais à base d'oléo-protéagineux, la durée des essais était en général trop courte pour que la prolifération d'une espèce devienne réellement problématique. Pour le maïs, la nuisibilité des adventices a rarement été observée, dans des essais presque systématiquement labourés. Comme mentionné plus haut, l'essai de l'Inra de Quimper (29) fait exception avec le développement de morelles résistantes à l'atrazine, herbicide de référence à l'époque des essais. L'ajout de bentazone en complément de l'atrazine (in Viaux *et al.*, 1999) permet de réduire les pertes de rendement en monoculture, sans que le potentiel n'atteigne celui du maïs assolé.

Ainsi, si on retient la définition de la fertilité rappelée plus haut comme « l'aptitude du milieu à assurer un processus de production, prenant en compte le coût d'expression de ce potentiel », alors on doit constater la baisse de la fertilité du milieu lorsque la culture revient trop fréquemment.

L'introduction ou le maintien de la prairie dans la rotation

La plupart des essais dans lesquels sont introduites des comparaisons entre rotations de cultures annuelles et rotations avec prairie sont implantés dans des sols de limons plus ou moins fragiles (tabl. 6).

Dans ce contexte, l'introduction d'une prairie dans la rotation a principalement des effets bénéfiques sur le sol. La différenciation des teneurs en matières organiques au profit de la rotation avec prairie n'est pas systématique : elle dépend de la durée de l'essai, du traitement des pailles et plus généralement de la quantité de résidus restitués. Même en l'absence d'évolution des teneurs en matières organiques ou des quantités de biomasse microbienne (une seule mesure disponible), une amélioration de l'état structural du sol est constatée, pour autant que les observations ne soient pas faites juste après un travail du sol.

À cet égard, on notera, pour le regretter, que les observations peu concluantes sur les sols dans

Tableau 6. Les facteurs favorisant le rendement des cultures en rotation avec prairie (entre parenthèses, nombre de sites concernés).

Composantes du rendement	Sol	Alimentation minérale	Enherbement	Maladies et ravageurs
Blé et orge : augmentation du nombre d'épis/m ² et du PMG (1) Maïs : augmentation du nombre de grains/rang, du nombre de grains/épi et du PMG (6)	– matières organiques : différenciation des teneurs au profit de la rotation avec prairie (8 essais) ; pas de différenciation (3 essais) – amélioration de la stabilité structurale (1) – amélioration de la vitesse de percolation (1) – amélioration de la structure du sol (4 essais) ; pas d'amélioration (5 essais)* – pas de différenciation de la quantité de biomasse microbienne (1 essai) – amélioration de l'enracinement (3)	Blé et orge : meilleure assimilation du phosphore (2) ; plus de mycorrhization des racines (1)	Différenciation progressive de la flore : sans impact sur la maîtrise des adventives (1) ; avec impact (1)	Blé et orge : peu d'écarts, pressions légèrement supérieures en rotation avec prairie en raison d'une biomasse plus forte au tallage (1)

les essais de l'Ouest de la France ont été faites juste après labour et semis, et seulement sur l'horizon labouré.

Conséquence de l'amélioration de l'état structural du sol, la vitesse de percolation de l'eau, mesurée à Jeu-les-Bois (36) augmente. Sur blé et orge comme sur maïs, on observe des différences d'enracinement donc de capacité à explorer le volume de sol, avec des effets sur la mise en place des composantes de rendement et notamment sur le poids de mille grains. Sur orge aux Grandes Règes (36 – limon drainé, sensible à l'excès d'eau) comme sur maïs à Sereslous (40 – limon sableux), les écarts de rendements sont plus marqués en années humides.

L'essai des Grandes Règes (36) (Félix *et al.*, 2002), apporte une information complémentaire sur l'effet de l'état structural du sol sur le rendement des cultures, en même temps qu'une alternative à l'introduction d'une prairie dans la rotation pour maintenir de hauts rendements de céréales à paille. Dans cet essai où quatre modalités de chaulage étaient comparées sur chacune des deux rotations, les écarts de rendement entre rotations sont accentués en cas sur les faibles niveaux de chaulage et atténués aux niveaux les plus élevés. Le rapport de synthèse conclut que le maintien d'un pH d'eau supérieur à 6,5 à 6,8 en rotation céréalière permet d'atténuer, sans les annuler, les écarts de rendement entre rotations.

Les courbes de réponse à l'azote mises en place sur l'essai de Woburn au Royaume-Uni (Johnson *et al.*, 2005) sur des traitements préalablement différenciés (introduction ou non de la prairie) restent parallèles entre ces deux modalités : l'introduction de la prairie, ici, de légumineuses, conduit donc à un déflaonnement des rendements qui n'est pas compensable par une augmentation de la dose d'azote. L'hypothèse avancée par les auteurs est que la distribution dans

le sol des éléments minéraux issus de la décomposition des résidus de culture pourrait être plus favorable à l'alimentation et à la croissance de la culture que ce qui peut être produit avec un apport d'engrais minéral.

Dans ce même essai, l'enrichissement du sol en matières organiques, par apports de pailles ou de fumier, permet d'atteindre des niveaux de rendement intermédiaires entre les parcelles avec fertilisation minérale et celles avec introduction de prairie dans la rotation. Ce résultat est concordant avec les observations mentionnées plus haut sur les effets des apports de fumier dans les rotations en monoculture de maïs dans le réseau de l'Ouest de la France (cf. fig. 2).

Notons enfin que les observations concernant le développement des bioagresseurs sont rares et ne semblent ne pas pouvoir expliquer de façon principale les écarts de rendement en faveur des rotations avec prairie. Aux Grandes Règes (36), elles vont au contraire dans le sens d'une pression plus forte de maladies du feuillage, à mettre en relation avec un couvert végétal plus dense en rotation avec prairie.

Conclusion

L'exploitation des données de 34 essais conduits en France et dans les pays voisins au cours des quarante dernières années permet de confirmer l'effet significatif de la rotation sur le potentiel de rendement des cultures, effet qui s'accroît parfois dans le temps. Sous réserve de l'existence de débouchés et d'une organisation logistique adéquate, l'évolution des rotations constitue donc un levier pour répondre à l'objectif de produire plus dans les années à venir.

Pour le blé, la culture en blé de blé ou en monoculture de blé réduisent respectivement de 5

(non significatif) et 15% (significatif) le potentiel de rendement sur les surfaces considérées. Pour la monoculture, la perte de rendement sur une durée plus longue (plus de vingt ans) dépasse à Boigneville 20 q/ha soit près de 25% du potentiel de rendement. Les problèmes sanitaires mis en évidence depuis plusieurs décennies n'ont jamais trouvé de réponse chimique ou génétique totalement satisfaisante.

Sur blé comme sur maïs, la suppression de la prairie, en particulier dans des sols de limons, a pour principale conséquence la dégradation progressive de l'état structural du sol. Elle ampute le potentiel de rendement dans une fourchette très large, de 10 à 50% des rendements, voire au-delà. Pour d'éventuelles simulations, les chiffres de -10% sur blé et orge et -15% sur maïs sont des minima qui peuvent être proposés. Dans les sols de limons, l'effet de la suppression de la prairie peut être amoindri, sans être supprimé, par un entretien calcique du sol, dépassant les niveaux de pH cibles pour éviter la toxicité aluminique, ou par un entretien organique régulier du sol.

On peut penser, à la lumière d'essais de longue durée sur les cultures intermédiaires, qu'une couverture prolongée du sol permettant de restituer plus de carbone au sol, pourrait, sous réserve d'une bonne maîtrise technique, avoir, de même, un effet compensateur.

Le raccourcissement des rotations conduit inéluctablement à l'émergence de nouvelles questions techniques qui, si elles peuvent parfois être résolues grâce à des réponses chimiques ou génétiques, restent coûteuses à mettre en place. Les essais exploités ici, souvent d'une durée courte à moyenne, suffisent à repérer l'émergence de nouveaux problèmes mais en minimisent les conséquences sur les rendements, qui se révèlent sur des durées plus longues. Les exemples de l'*Aphanomyces* sur pois ou du géranium sur colza survenus ultérieurement aux périodes d'essais, dans les exploitations agricoles, en sont des illustrations. Ils illustrent la perte « d'aptitude d'un milieu à assurer le processus de production » qui lui est assigné ■

Références bibliographiques

- Arvalis-Institut du végétal. Essais d'Aulnay-aux-Planches (51) et de Rouvroy-les-Merles (60). Fichiers excel, non publié.
- Bodet J.M., Coulouan A., Masson E., 1993. Effet du précédent prairie sur la production de maïs dans l'Ouest de la France. *Perspectives agricoles*, 179, 51-57.
- Brisson N., Gate P., Gouache D., Charmet G., Huard F., 2010. Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. *Field Crops Research*, 119, 1, 201-212.
- Chambon D., 1989. *Mise en valeur des sols hydromorphes de la Basse Marche*. Rapport de stage, ITCF.
- Dury J., Bergez J.E., 2012. Assolement dans les exploitations de grande culture irriguées : modélisation des décisions des agriculteurs. *Agronomie, environnement et sociétés*, 2, 2, 47-61.
- Félix I., Rémond T., Lafrechoux M., Servant J., Richard L., Courbe C., 2002. Grandes Règes (36). *Synthèse*. Rapport interne SUACI des Bordes, ITCF et chambres d'agriculture.
- ITCF, 1978-1985. Comptes-rendus annuels de l'essai de Sainte-Aoustrille (36). *Rotation oléagineux-protéagineux-céréales*. Rapports internes ITCF.
- ITCF, 1988. Essais rotations oléagineux-protéagineux-céréales, plateau lorrain (Hessange, 57). Bilan détaillé de 8 années d'expérimentation. Rapport interne ITCF.
- Johnston A.E., Poulton P.R., 2005. *Soil Organic Matter: its importance in sustainable agricultural systems*. International Fertiliser Society Conference, Cambridge, 14th december 2005. Proceedings n°565, International Fertiliser Society, York, UK, 45 p.
- Jouy L., Wissocq A., 2011. Observatoire des pratiques. 34 types de successions culturales en France. *Perspectives agricoles*, 379, 44-45.
- Labreuche J., 2012. Synthèse 1971-2011 de l'essai travail du sol de longue durée de Boigneville (91). Rapport interne ARVALIS-Institut du végétal.
- Le Gall A., 1997. La place du maïs ensilage dans les systèmes fourragers laitiers. Institut de l'élevage, 58 p.
- Michel L., Makowski D., 2013. Comparison of Statistical Models for Analyzing Wheat Yield Time Series. *PLoS One* 8(10), e78615. doi:10.1371/journal.pone.0078615
- Mignolet C., Schott C., Benoit M., Meynard J.M., 2012. Transformations des systèmes de production et des systèmes de culture du bassin de la Seine depuis les années 1970 : une spécialisation des territoires aux conséquences environnementales majeures. *Innovations agronomiques*, 22, 1-16.
- Plenet D., Lubet E., Juste C., 1993. Effet à long terme de la monoculture sur le rendement en grain du maïs en conditions non irriguées. *Agronomie*, 13, 673-683.
- Pointereau P., Bisault L., 2006. Trente ans de paysages agricoles. La monoculture et ses dangers pour l'environnement, [http://www.solagro.org/site/im_user/0311_\\$_209monoculture07.pdf](http://www.solagro.org/site/im_user/0311_$_209monoculture07.pdf)
- Remiaux M., 1993. Etude de la rotation pois-blé. Synthèse de l'essai. *Rapport interne ITCF*, CA28.
- Sébillotte M., 1989. *Fertilité et systèmes de production*. Inra Editions, Paris, 370 p.
- Vallet S., 1990. *Effets de la prairie temporaire dans la rotation*. Rapport de BTS, lycée agricole de Châteauroux – ITCF.
- Verjux N., 1996. Productivité : toujours inférieure à celle d'un blé assolé. *Perspectives agricoles*, 216, 74-77.
- Viaux P., Bodet J.M., Le Gall A., 1999. Complémentarité herbe-cultures dans les rotations. *Fourrages*, 160, 345-358.