

Effet des passages de roues des engins de récolte sur la production de cultures de luzerne

N. Beaudoin¹, P. Thiébeau²

La récolte des champs de luzerne vouée à la déshydratation suit une logique industrielle. Les dates sont choisies pour optimiser la production fourragère et la productivité des chantiers de récolte et des usines. L'impact des engins de récolte est parfois spectaculaire. Leur incidence sur la production et la pérennité de la luzernière est à préciser.

RÉSUMÉ

L'impact des passages de roues sur l'état des pivots de luzerne et la production de l'année en cours est quantifié sur 27 couples de stations ("Roulé" - "Témoin"). Quel que soit l'état hydrique du sol lors des chantiers, la production des surfaces tassées est réduite de 15 à 20% lors de la première repousse qui suit la récolte, et de 10 à 30% lors de la seconde repousse. La qualité du fourrage récolté est inchangée. Les nombres de pieds de luzerne et de tiges par pied sur les zones "roulées" diminuent significativement par rapport au témoin. L'analyse de l'action des roues sur les pivots racinaires a permis d'identifier 3 types d'effets, dont l'un entraîne la mort du pied. Les passages de roues réduisent globalement de 1 à 3% la production des 2 repousses suivantes, selon les largeurs de travail des machines.

MOTS CLÉS

Champagne-Ardenne, chantier de récolte, déshydratation, luzerne, production fourragère, rapport feuille/tige, sol, valeur azotée.

KEY-WORDS

Champagne-Ardenne, dehydration, forage production, harvesting operations, leaf/stem ratio, lucerne, nitrogen value, soil.

AUTEURS

1 : INRA, Unité d'agronomie (UR 1158), Laon.

2 : INRA, Unité d'agronomie (UR 1158), Reims.

CORRESPONDANCE

P. Thiébeau, INRA, 2, Esplanade R. Garros, F-51686 Reims cedex 2 ; thiebeau@reims.inra.fr

La luzerne cultivée en culture pure est récoltée presque exclusivement de façon mécanique, à cause des risques de météorisation qu'elle peut entraîner chez les ruminants au pâturage (THIÉBEAU *et al.*, 2003). En région Champagne-Ardenne, la présence d'une industrie de déshydratation permet de récolter mécaniquement l'ensemble des pousses de luzerne, au nombre de 4 par an en général. Les dates d'intervention des machines de récolte dans les champs sont gérées suivant une logique industrielle. Les circuits des chantiers de récolte sont organisés en fonction de l'âge des luzernières, de la productivité des engins de récolte et des besoins des usines. Les dates de récoltes s'échelonnent du 20 avril au 15 octobre. Les chantiers comprennent faucheuse, ensileuse, remorques et camions. Seuls les terrains rendus impraticables par les épisodes pluvieux font l'objet d'un report de récolte, ou conduisent parfois à l'arrêt des chantiers. Cela se produit rarement car les sols de craie sont réputés portants (DÉFOSSEZ *et al.*, 2003) *a contrario* des sols argilo-calcaires des pourtours de Champagne. **Cette quasi-permanence de la praticabilité des terrains pose la question des conséquences des passages en mauvaises conditions sur la production des récoltes suivantes** (hors première année d'exploitation). Les terrains semés l'été précédent sont récoltés plus tard, leur pousse printanière étant plus lente que les repousses de luzernières de deuxième ou troisième année. Comme ils ont une moindre praticabilité à cause d'une structure plus meuble, les chefs de chantiers diffèrent l'entrée des machines en cas de mauvaises conditions climatiques.

Les conséquences de ces conditions variables d'interventions concernent l'état physique des sols, l'état des pivots et plus globalement la physiologie des repousses. Le principal **phénomène qui affecte le sol est le compactage** qui aboutit à la création d'ornières plus ou moins profondes ; en cas de forte humidité du sol, on peut observer **du fluage** qui correspond à un déplacement latéral du sol. Ces deux phénomènes agissent indirectement sur les cultures (PAPY, 1987 ; SOANE et VAN OUWERKERK, 1994 ; DÉFOSSEZ *et al.*, 2004). Le compactage réduit la porosité et la perméabilité du sol, et donc limite l'enracinement et/ou la fixation symbiotique (SHEESLEY *et al.*, 1974 ; VOORHEES *et al.*, 1976 ; TARDIEU et MANICHON, 1987 ; MEEK *et al.*, 1988 et 1989 ; RECHEL *et al.*, 1987 et 1990 ; WOLKOWSKI, 1990). La création d'ornières avec éventuellement du fluage relève, en sus, la hauteur moyenne de coupe des récoltes suivantes. **Les conséquences directes des passages de roues sur les plantes sont l'écrasement des bourgeons** préparés pour le redémarrage de la luzerne et éventuellement **la torsion ou l'écrasement des pivots**. Ces phénomènes peuvent pénaliser la production de la première repousse et/ou jouer sur la mise en réserve dans les pivots et/ou sur leur état sanitaire. A long terme et pour une même parcelle, ces effets doivent se cumuler et se généraliser.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'incidence des passages de roues des engins de récolte sur l'état du sol, la production à court terme de la luzerne et les conditions de sa pérennité.

Matériels et méthodes

■ Dispositifs expérimentaux

Les conséquences des passages de roues varient à la fois en fonction de l'état initial de la structure du sol et des conditions d'humidité (PAPY, 1984). Nous avons opté pour un dispositif d'enquête qui permet de croiser ces deux facteurs. Pour pouvoir séparer les effets d'un simple écrasement des bourgeons sans compactage du sol d'une part de la combinaison écrasement et tassement d'autre part, nous avons retenu des parcelles dont les conditions d'humidité du sol lors de l'intervention du chantier de récolte ont été différentes.

L'étude a été réalisée sur 9 parcelles, réparties sur 4 communes de la région Champagne-Ardenne : Cuperly (2 parcelles), Hans (2 parcelles), Louvercy (2 parcelles) et Saint-Memmie (3 parcelles). Les sols sont des rendosols hyper-calcaires, sur craie cryoturbée ou craie gélifractée, représentatifs de la région (BAIZE et GIRARD, 1992 ; BALLIF *et al.*, 1995).

Chaque dispositif comprend :

- une ou plusieurs bandes de luzerne sans passage de roue, qui sont les témoins ;
- une ou plusieurs bandes avec passage de roues, ici nommées "Roulé".

L'ensemble des dispositifs permet de suivre **27 couples "Roulé"- "Témoin"**.

Dans toutes les situations, la luzerne a été implantée en été, après une céréale dont les pailles ont été exportées ou brûlées. L'étude porte sur des luzernes en deuxième année de production, en 1990.

L'incidence des passages de roues a été suivi, d'une façon dynamique, sur la **première repousse de luzerne qui suit la première récolte**, c'est à dire à 15, 30 et 45 jours de repousse, ainsi qu'au terme de la **seconde repousse** (de 40-45 jours). L'ordre de passage et les caractéristiques de roulage des engins de récolte sont présentés au tableau 1 : un aller et retour de faucheuse permet de juxtaposer 2 lignes d'andins, repris en un passage d'ensileuse automotrice tractant une semi-remorque. Cette organisation de chantier permet de limiter les passages de roues à 20 à 33% de la surface des parcelles par récolte.

TABLEAU 1 : **Caractéristiques des engins de récolte lors de l'étude.**

TABLE 1 : **Characteristics of the harvesting machines used in the study.**

	Largeur des pneumatiques (mm)	Pression de gonflage (bars)	Largeur de travail (m)
Faucheuse automotrice	425-500	3,0-3,5	4,80
Ensileuse (pick-up)	635	3,0-3,5	3,00
Semi-remorque	445-525	7,5	/

■ Conditions climatiques de l'année

Les données moyennes de 2 stations météo du secteur ont été utilisées pour estimer les régimes pluviométriques et thermiques. Il s'agit des stations de l'INRA de Fagnières et du lycée agricole de Somme-Vesle.

L'année a été ensoleillée (4 440 MJ/m²) et chaude (moyenne annuelle de 11,4°C), avec une pluviométrie normale (610 mm), ce qui a été particulièrement favorable à la croissance de la luzerne et conforme aux conditions habituelles de récolte en Champagne. Seul le mois de mai a connu un déficit pluviométrique (44 mm) et une température moyenne élevée (15,2°C) par rapport aux données moyennes pluriannuelles.

■ Conditions de récolte de la luzerne lors de la mise en place des couples "Roulé"- "Témoin"

Les observations sur les parcelles ont débuté consécutivement à 3 épisodes pluvieux, correspondant à 4 dates de récolte différentes, ayant créé des situations contrastées :

- Date de récolte D1, le 24 avril (Cuperly), réalisée après un épisode pluvieux de 12 jours consécutifs, cumulant 47 mm d'eau ;
- Date de récolte D2, le 10 mai (Hans et Louvercy), réalisée après une perturbation orageuse d'une journée cumulant 12 mm d'eau ;
- Date de récolte D3, le 21 mai (Saint-Memmie 1), réalisée après une perturbation pluvieuse d'une journée cumulant 16 mm d'eau ;
- Date de récolte D4, le 22 mai (Saint-Memmie 2 et 3), réalisée en laissant 24 heures de ressuyage supplémentaire par rapport à D3.

■ Variables mesurées et observées

La relation entre technique (chantier de récolte) et comportement de la culture est équivoque (GRAS *et al.*, 1989). Pour comprendre le comportement de la luzerne, nous avons besoin de caractériser l'état du sol et des pivots après passages de roues. Nous avons donc tenté d'analyser la liaison entre l'état structural et les conditions d'intervention, puis celle entre la morphologie des pivots et la croissance, en fonction de l'état structural.

- Sur le sol

La topographie de surface du sol a été décrite à l'aide d'un aspérimètre d'une longueur de 1,10 m, dont le train de tiges est constitué d'éléments espacés de 2 cm. L'observation du profil, perpendiculairement aux passages de roues, permet d'avoir une image de l'impact de ces passages comparativement à la zone témoin.

L'analyse des profils culturaux sous passage de roues et témoin a été réalisée selon la méthodologie de GAUTRONNEAU et MANICHON (1987). L'état du profil avant passage des engins n'étant pas connu,

la référence est la zone témoin hors passage et la différence de structure lui est imputée. Les états structuraux observés ont été classés selon l'épaisseur croissante de sol où les mottes ont une porosité nulle (couche Δ) créée par le passage des engins de récolte.

Des mesures de densité apparente par la méthode des anneaux ont été réalisées afin de quantifier l'impact de ces passages de roues sur la structure du sol.

- Sur la luzerne

La matière sèche aérienne exportable (MSAe) a été estimée pour chaque bande "Roulé" et "Témoin" sur 4 placettes constituées chacune de 2 lignes de semis contiguës de 2 m linéaires par date de prélèvement et par traitement. La matière fraîche, coupée à une hauteur supérieure à 6 cm, des 8 échantillons de chaque traitement, a été mesurée sur le terrain. Une part aliquote moyenne a été isolée pour déterminer la teneur en matière sèche, mesurer la longueur de 25 tiges et effectuer une séparation feuille/tige (calcul du rapport F/T).

Les matières sèches des collets (chaumes de 0 à 6 cm de hauteur) et des racines ont été estimées en prélevant quatre placettes de 0,5 m linéaire chacune sur 4 lignes moyennes. Les prélèvements ont été réalisés à la bêche sur une profondeur de 20 cm. Après lavage, les collets sont séparés des pivots racinaires, sous le dernier bourgeon.

La détermination de la teneur en matière sèche est réalisée après passage en étuve ventilée (48 h à 80°C). Un échantillon aliquote de la matière sèche aérienne exportable est conservé pour la détermination, après broyage, de la teneur en azote total par la méthode Kjeldhal.

L'évolution du **rapport feuille/tige** (F/T) et l'analyse des **teneurs en azote** (N %) sont réalisées **au regard des modèles empiriques** de LEMAIRE *et al.* (1985) et de COULMIER (1990), établis à partir d'essais cumulants plusieurs sites et années expérimentales sur la luzerne en culture pure en France :

$$F/T = 1,7 (MSAe)^{-0,63} ; r^2 = 0,893 \text{ (LEMAIRE } et al., 1985)$$

$$F/T = 1,9 (MSAe)^{-0,77} ; r^2 = 0,808 \text{ (COULMIER, 1990)}$$

$$N (\%) = 4,8 (MSAe)^{-0,31} ; r^2 > 0,970 \text{ (LEMAIRE } et al., 1985)$$

$$N (\%) = 5,1 (MSAe)^{-0,37} ; r^2 > 0,889 \text{ (COULMIER, 1990)}$$

La morphologie et l'état sanitaire des pivots de luzerne a été observée et une typologie en a été faite.

Un dénombrement des bourgeons a été réalisé selon la définition de LEACH (1970). Ils ont été classés en 2 types (KHAITY, 1989) : le type 1 correspond aux bourgeons préexistants à l'aisselle des feuilles sur la partie des tiges qui reste après les coupes successives. Le type 2 correspond aux bourgeons néoformés qui se trouvent à la base du collet.

Résultats

■ Effet des passages de roues sur la structure du sol

L'observation des **états structuraux** a permis d'en définir **4 types** (tableau 2). Ce classement est pertinent pour expliquer le volume des mottes de porosité nulle ou réduite (mottes Δ et ϕ) dans l'ensemble du profil. Il n'est pas discriminant pour les enfoncements de sols estimés à l'aspérimètre, car ceux-ci répondent de façon équivoque aux rouages en fonction de l'état structural initial et des conditions d'humidité. Dans les cas extrêmes de conditions d'humidités inappropriées lors de la récolte, le passage de roues peut créer un fluage de sol de chaque côté des bandes de roulement des pneus. La typologie des états structuraux permet de discriminer les masses volumiques mesurées sur l'épaisseur de sol labouré.

TABLEAU 2 : Description de l'état physique du sol en fonction du type d'état structural : "Témoin" (T1) et "Roulé" (T2 à T4).

TABLE 2 : Description of the physical status of the soil according to the structural type : 'Control' (T1) and 'Rolled' (T2 to T4).

Etat structural type	Épaisseur de sol M Δ^* (cm) Moy. / Med.	Etats structuraux Δ et ϕ * (% de l'horizon labouré)			Enfoncement du sol (mm) Mini / Maxi	Densité apparente (g/cm ³) Mini / Maxi
		Zone Δ	Zone ϕ	Total		
T1	0 / 0	4	54	58	-	1,28 / 1,35
T2	7 / 5	17	73	90	21 / 24	1,31 / 1,45
T3	10 / 10	36	61	97	17 / 33	1,49 / 1,62
T4	15 / 15	56	43	99	21 / 48	1,43 / 1,67

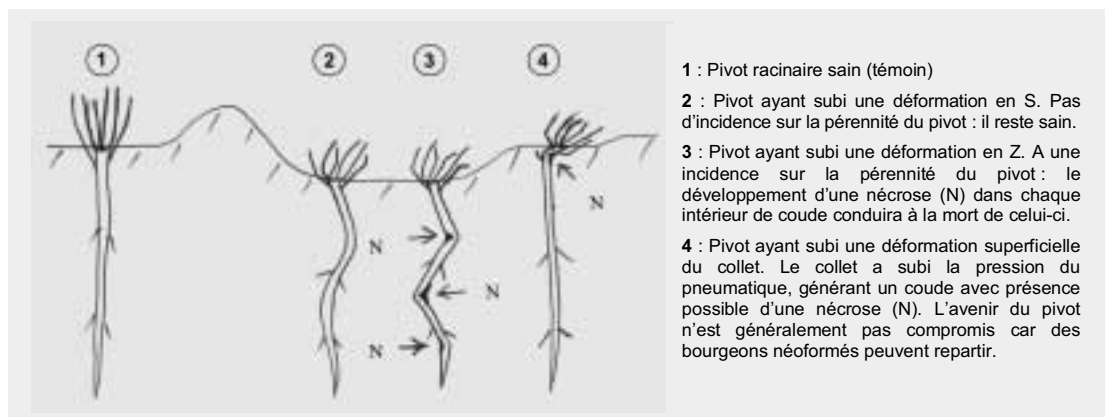
* Abréviations (GAUTRONNEAU et MANICHON, 1987) : Assemblage des mottes : M : Massif ; Etat interne des mottes : Δ : porosité structurale nulle, ϕ : proche de Δ mais contient des amorces de fissures

Les 4 types définis peuvent être *a posteriori* reliés aux **caractéristiques des engins de récolte associés aux conditions d'humidité** présentes lors de la récolte. Ainsi, si le type 1 (T1) témoin n'a pas subi de passage de roue l'année de récolte en cours, le type T2 a été provoqué par des engins vides ou chargés mais passés en conditions de sol sec. Le type T3 est généré par des engins vides avec roues étroites, ou chargés avec roues larges, toujours en conditions humides superficielles. Le type T4 résulte du passage unique d'un engin avec roues étroites ou de plusieurs passages chargés avec roues larges, en conditions humides ressuyées sur l'ensemble du profil.

■ Effet des passages de roues sur les pivots

- Effet sur la morphologie des pivots

La typologie des pivots a permis de distinguer **3 sortes d'incidences**, présentées schématiquement par la figure 1. Les pivots de type 3 et 4 ont été dénombrés ensemble sous le vocable "coudé". Leur répartition est présentée en fonction des types d'états structuraux (tableau 3). La part des racines normales, le nombre de bourgeons par pied et le taux de bourgeon de type 1 diffèrent significativement entre l'état structural 1 "Témoin" et les types 2 à 4 "Roulé". Le taux de nécroses et le nombre de bourgeons sont corrélés négativement : $r = -0,58$.



1 : Pivot racinaire sain (témoin)
 2 : Pivot ayant subi une déformation en S. Pas d'incidence sur la pérennité du pivot : il reste sain.
 3 : Pivot ayant subi une déformation en Z. A une incidence sur la pérennité du pivot : le développement d'une nécrose (N) dans chaque intérieur de coude conduira à la mort de celui-ci.
 4 : Pivot ayant subi une déformation superficielle du collet. Le collet a subi la pression du pneumatique, générant un coude avec présence possible d'une nécrose (N). L'avenir du pivot n'est généralement pas compromis car des bourgeons néoformés peuvent repartir.

FIGURE 1 : Incidence des passages de roues sur la morphologie des pivots racinaire de la luzerne.

FIGURE 1 : Effect of the passage of wheels on the morphology of lucerne pivot roots.

L'existence de racines coudées sous le témoin peut résulter des récoltes de l'année précédente, ou bien de l'interaction racine-structure du sol au semis. Cette hypothèse est étayée par le constat du taux élevé de racine sans nécrose.

Concernant les traitements affectés par le passage des engins de récolte, la typologie des états structuraux ne discrimine pas les différents états physiologiques observés sur les pivots.

- Effet sur la densité de pivots et de bourgeons

Les comptages réalisés montrent que les passages de roues ont une incidence sur la densité de bourgeons (tableau 3). Comme précédemment, l'analyse d'ensemble ne dégage pas de différence significative entre les zones "Témoin" et "Roulé" mais seulement une tendance récurrente, en 1^{re} comme en 2^e repousse, à disposer de davantage de pieds par m² (non présenté) et de bourgeons par m² en zone "Témoin" qu'en zone "Roulé". Ceci permet la croissance d'un nombre de bourgeons par pied supérieur en zone "Témoin" qu'en zone "Roulé".

TABLEAU 3 : Description de l'état des racines et des bourgeons de luzerne en fonction du type d'état structural.

TABLE 3 : Description of the status of the roots and the buds of lucerne according to the structural type.

En première repousse, ces bourgeons sont 8 à 9 fois sur 10 de type 1, tandis qu'ils ne sont plus que 5 à 6 sur 10 de ce type en seconde repousse ; ce qui indique que la part de bourgeons de type 2 est plus importante en seconde repousse qu'en première (résultats non présentés). La proportion de bourgeons de type 2 n'est donc pas sensible au roulage, mais elle l'est au rang de repousse.

Etat structural type	Pourcentage de racines				Nombre de bourgeons par pied	Perte de bourgeons relative	Bourgeons de type 1 (%)
	Normales	Sinuouse	Coudées	Sans nécrose			
T1	43	14	43	50	2,65	/	98
T2	11	38	51	29	1,74	- 0,25	75
T3	12	24	64	31	1,69	- 0,24	79
T4	8	41	51	30	1,76	- 0,13	80

■ Effet des passages de roues sur les critères de production quantitatifs de la luzerne

Les données de MSAe présentées aux figures 2 pour les premières et secondes repousses pour chacun des 3 types d'états structuraux montrent que les traitements "Roulé" ont une production inférieure aux témoins. **Les 3 types de traitements "Roulé" se confondent** ; ce qui permet de les prédire de façon identique et globale (tableau 4). Les **ajustements linéaires** permettent une bonne prédiction de la biomasse produite, traduite par les coefficients de corrélation élevés. Dans une fourchette de 2 à 6 t/ha de MSAe pour le témoin, la bande "Roulé" produit **15 à 20% de moins en première repousse et 10 à 30% de moins en seconde repousse**, avec une très bonne qualité de prédiction (coefficients de corrélation (r) supérieurs à 0,9).

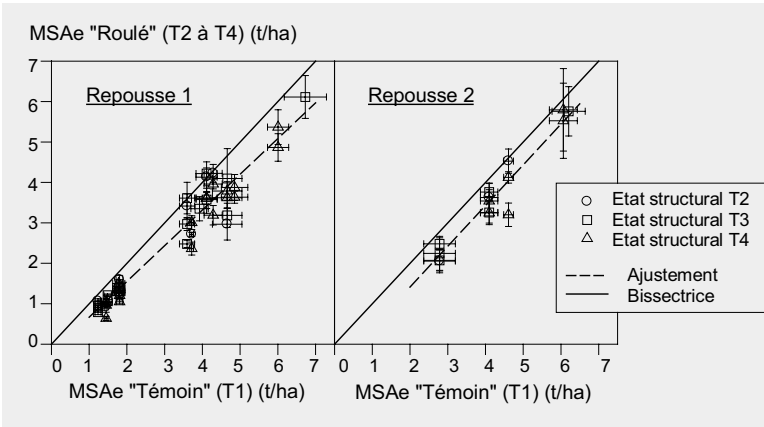


FIGURE 2 : Matière Sèche Aérienne exportable de la luzerne (MSAe) en zone "Roulé" en fonction de la production de la zone "Témoin" correspondante (avec les erreurs standards), par type de pousse et d'état structural.

FIGURE 2 : *Exportable above-ground dry matter of lucerne (MSAe) in a 'Rolled' zone relatively to the corresponding 'Control' (with standard deviations), per type of growth and of structural state.*

Les **matières sèches des collets** sont, tous types d'états structuraux confondus, également quantitativement moins importantes en zones "Roulé" par rapport aux zones "Témoin". Le traitement "Roulé" est déficitaire de 10 à 30% en première repousse et de 10% en seconde repousse (pour une qualité de prédiction moyenne : $0,6 < r < 0,8$) pour une production de biomasse pour le témoin comprise entre 2,0 et 4,5 t/ha.

Dans cette même fourchette de production, la **biomasse racinaire** est déficitaire de 5 à 20% par rapport au témoin en première repousse, pour ne plus l'être qu'à hauteur de 3 à 7% en seconde repousse. La qualité de prédiction est meilleure que pour les collets ($0,7 < r < 0,9$).

	1 ^{ère} repousse			2 ^{ème} repousse		
	a	b	r (ddl)*	a	b	r (ddl)
MSA exportable (t/ha)	0,883	0,216	0,962 (57)	1,006	- 0,601	0,971 (20)
MS des collets (t/ha)	0,512	0,787	0,613 (31)	0,913	- 0,016	0,764 (20)
MS des racines (t/ha)	0,651	0,568	0,868 (31)	0,900	0,137	0,698 (20)
Longueur de tige (cm)	0,935	0,426	0,980 (49)	1,027	- 3,351	0,921 (20)

* ddl : degré de liberté ; Tous les résultats sont significatifs à $p < 0,001$

TABLEAU 4 : Valeurs des paramètres des ajustements linéaires établis entre les variables mesurées sur les zones "Témoin" et "Roulé" : ("Roulé" = a x "Témoin" + b).

TABLE 4 : *Value of the parameters calculated for the lineary adjustments between the measured data in the 'Controls' and 'Rolled' zones ('Rolled' = a x 'Control' + b).*

La **longueur des tiges** des zones "Roulé" est de 4 à 5 cm inférieure à celle des témoins en première repousse, tandis qu'elle ne l'est plus que de 2 à 3 cm en fin de seconde repousse : ces écarts par rapport aux "Témoin" sont non significatifs, malgré une très bonne qualité de prédiction : $r > 0,9$.

■ Effet des passages de roues sur les critères de production qualitatifs de la luzerne

La confrontation des rapports feuille/tige et des teneurs en azote de la matière sèche aérienne aux modèles de LEMAIRE *et al.* (1985) et de COULMIER (1990), présentés respectivement aux figures 3 (a et b), montre que :

- une relation lie les rapports F/T "Témoin"/"Roulé" à l'accumulation de biomasse, ce qui est cohérent avec les modèles de LEMAIRE *et al.* (1985) et COULMIER (1990) ;

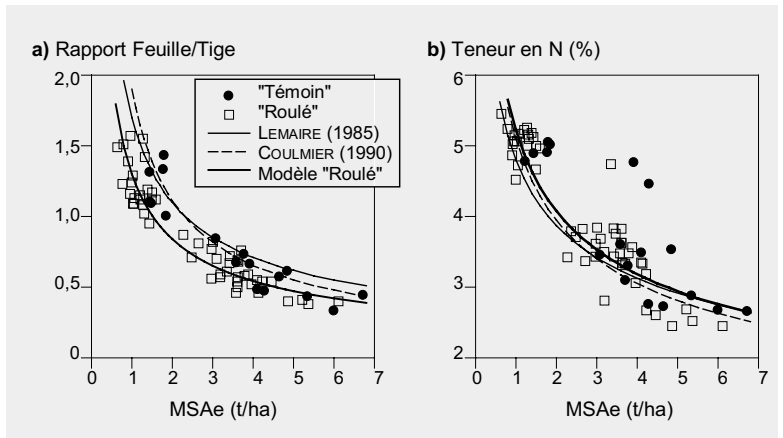
- l'effet des passages de roues, qui se traduit par une réduction de la biomasse accumulée, modifie aussi la relation liant le rapport F/T à l'accumulation de biomasse. Celle-ci se trouve décalée, justifiant de recalculer les paramètres d'ajustement du modèle pour ce traitement :

$$F/T = 1,3 (MSAe)^{-0,63} ; r^2 = 0,903 \text{ (significatif à } p < 0,001)$$

- malgré une forte hétérogénéité des résultats, la courbe de dilution d'azote montre que **l'effet du tassement porte sur l'accumulation de biomasse** précédemment décrite, **mais pas sur**

FIGURES 3 : Evolution a) du rapport feuille/tige et b) de la teneur en azote selon la Matière Sèche Aérienne exportable (MSAe) des luzernes "Témoin" et "Roulé", comparés aux modèles de LEMAIRE *et al.* (1985) et COULMIER (1990).

FIGURE 3 : Evolution of a) the leaf/stem ratio and b) the nitrogen content according to the Exportable above-ground dry matter (MSAe) of the 'Rolled' and 'Control' lucerne harvests, as compared to the models of LEMAIRE *et al.* (1985) and of COULMIER (1990).



la courbe de dilution elle-même. Le calcul des paramètres d'ajustement du modèle pour le traitement "Roulé" donne le résultat suivant :

$$N (\%) = 5,2 (MSAe)^{-0,36} ; r^2 = 0,847 \text{ (significatif à } p < 0,001)$$

Cependant, la modélisation n'est pas parfaite parce que la distribution des résidus n'est pas homogène.

Discussion

■ Effet des passages de roues sur la quantité de fourrage récolté

Les passages de roues des engins de récolte ont **une action conséquente sur la production de matière sèche de la luzerne, mesurée localement**, au cours des deux repousses qui suivent : baisse de 15 à 20% en première repousse et de 10 à 30% en seconde repousse. Ces ordres de grandeurs paraissent importants mais sont conformes aux travaux de RECHEL *et al.* (1987), qui rapportent notamment des baisses de 13 à 40% sur sols de limon, et de MEEK *et al.* (1988) qui rapportent des baisses de 10 à 17% sur sols sablo-limoneux. Cette baisse peut être reliée à une perte du nombre de bourgeons. Leur densité est un indicateur représentatif de la capacité des pivots à assurer le redémarrage de la culture (JUSTES *et al.*, 2002). La croissance des bourgeons de type 1 commence dès que la dominance apicale est supprimée par la coupe ou par une verse. La croissance des bourgeons de type 2 commence après celle des bourgeons de type 1. Selon SMITH et NELSON (1967), une coupe ne serait pas indispensable à leur démarrage. Ils donnent des tiges plus vigoureuses et plus productives que celles issues des bourgeons de type 1 (KHAITY, 1989) en conditions expérimentales. On peut néanmoins se demander s'il n'y a pas d'impact du tassement lui-même sur le comportement des bourgeons de type 2.

Il faut **pondérer cette incidence sur la biomasse par la surface effectivement "roulée"** à l'échelle du champ. En effet, en considérant les caractéristiques techniques des engins de récolte (largeur de coupe, dimension des pneumatiques), c'est 1/6 à 1/5 de la surface du champ qui est "roulée" par ces matériels pour une coupe donnée. Ceci est peu par rapport aux 70% de surface "roulée" annoncée conjointement par plusieurs études américaines (GRIMES *et al.*, 1978 ; RECHEL *et al.*, 1987). Toute proportion considérée, la perte de production n'est plus que de 1,1% en première repousse et de 2,3% en seconde repousse, soit 50 à 100 kg de MSAe/ha pour une production de fourrage exportée de 4,0 à 4,5 t/ha. Ce calcul ne tient pas compte de la différence de hauteur de coupe par la machine, induite par la profondeur de l'ornièrre, de l'ordre de 2 cm, qui accroît le déficit du rendement au champ (tableau 2). Les conséquences à court terme des passages de roues sur la production de matière sèche d'un champ sont minimes.

Depuis la réalisation de ces mesures, **les matériels de récolte ont évolué**. Les faucheuses automotrices ont été remplacées par des tracteurs en poste inversé : les barres de coupes sont passées de 4,8 m à 5,6 m au minimum, 7,0 m plus généralement ; ce qui réduit le nombre d'aller et retour sur un champ. De surcroît, à pression de gonflage identique, la largeur des pneumatiques s'est accrue pour des poids de matériels identiques ou légèrement plus faibles.

Cependant, il est plausible que les effets cumulés des passages de roues sur l'état des pivots et la structure du sol interviennent sur la longévité des luzernières.

■ Effet des passages de roues sur la qualité du fourrage récolté

Le calcul du modèle de décroissance du **rapport F/T** en fonction de la MSAe pour le traitement "Roulé", montre un coefficient de 1,3 significativement différent des valeurs 1,7 et 1,9 obtenues respectivement par LEMAIRE *et al.* (1985) et COULMIER (1990) ; tandis que le coefficient de décroissance de - 0,63 est similaire au modèle de LEMAIRE *et al.* Le traitement "Témoin" reste conforme aux prévisions des modèles. En revanche, on constate que l'ajustement obtenu pour la **teneur en azote** du traitement "Roulé" est conforme aux valeurs obtenues par les modèles de référence ; y compris pour les teneurs en azote du traitement "Témoin". La confrontation de ces faits semble paradoxale puisque la diminution du rapport feuille/tige devrait entraîner une diminution de la teneur moyenne en azote du couvert. Cela amène deux commentaires : i) on remarque dans la figure 3b que les points les plus bas correspondent aux tassements les plus sévères, ce qui suggère une contrainte d'alimentation azotée ; ii) d'après le paragraphe précédent, les bourgeons de type 2 pourraient avoir un comportement différent de ceux observés sans tassement.

L'écart de la constante calculée du traitement "Roulé" par rapport aux modèles de référence pour le rapport F/T suggère d'autres facteurs explicatifs. Nous n'avons pas réalisé de mesure de surface foliaire au cours de ce travail, mais nous pouvons poser l'hypothèse d'une incidence des passages de roues sur la vitesse de mise en place de la surface foliaire, la forme des folioles, voire une concurrence accrue pour la lumière des couloirs générés par les passages de roues, conduisant la luzerne des traitements "Roulé" à privilégier l'allongement des entre-nœuds pour ne pas être dominée par les "Témoin" qui la jouxtent.

Conclusion

La comparaison des couples de placettes d'observation de luzerne "Roulé"- "Témoin" montre une incidence significative des passages de roues sur la production de matière sèche aérienne et la pérennité de la luzernière à l'endroit des dits passages par rapport au témoin. Cette incidence pourrait s'expliquer essentiellement par une diminution du nombre de tiges par pied.

Malgré une diminution notoire du rapport feuille/tige des traitements "Roulé", la qualité protéique du fourrage récolté ne serait pas pénalisée dans la majorité des situations. La réponse de l'alimentation azotée au tassement nécessiterait d'être approfondie.

L'impact des passages de roues sur la biomasse aérienne produite lors de la campagne de récolte est minime à l'échelle du champ, à court terme ; mais gardons à l'esprit que cette étude a été réalisée sur des sols de craie, qui se révèlent peu sensibles au

tassement (DÉFOSSEZ *et al.*, 2003). La question de leur effet cumulatif ne peut être abordée que dans une approche plus globale des conditions de pérennité des luzernières.

Accepté pour publication,
le 31 mai 2007.

Remerciements : Nous remercions F. PAPHY pour ses conseils lors de la définition du protocole.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BAIZE D., GIRARD M.C. (1992) : *Référentiel pédologique. Principaux sols d'Europe*, éd. INRA, 222 p.
- BALLIF J.L., GUERIN H., MULLER J.C. (1995) : *Eléments d'agronomie champenoise, connaissance des sols et de leur fonctionnement, rendzines sur craie et sols associés ; esquisse géomorphopédologique*, éd. INRA, 104 p
- COULMIER D. (1990) : *Contribution à la modélisation de la production de la luzerne : mise en œuvre et validation d'un modèle de simulation dans le cadre de l'activité déshydratation en Champagne-Ardenne*, thèse de Doctorat de l'INA-PG, 103 p.
- DEFOSSEZ P., RICHARD G., BOIZARD H., O'SULLIVAN M.F. (2003) : "Modeling change in soil compaction due to agricultural traffic as function of soil water content", *Geoderma*, 116, 89-105.
- DEFOSSEZ P., RICHARD G., BOIZARD H., ROGER-ESTRADE J. (2004) : "Modélisation du compactage sous l'effet des passages d'engins agricoles", *Etude et Gestion des Sols*, 11 (1), 21-32.
- GAUTRONNEAU Y., MANICHON H. (1987) : *Guide méthodique du profil cultural*, 62 p.
- GRAS R., BENOIT M., DEFFONTAINES J.P., DURU M., LAFARGE M., LANGLET A., OSTY P.L. (1989) : *Le fait technique en agronomie*, Collection alternatives rurales, INRA - L'harmattan.
- GRIMES D.W., SHEESLEY W.R., WILEY P.L. (1978) : "Alfalfa root development and shoot regrowth in compact soil of wheel traffic patterns", *Agron. J.*, 70, 955-958.
- JUSTES E., THIEBEAU P., AVICE J.C., LEMAIRE G., VOLENEC J.J., OURRY A. (2002) : "Influence of summer sowing dates, N fertilization and irrigation on autumn VSP accumulation and dynamics of spring regrowth in alfalfa (*Medicago sativa* L.)", *J. Exp. Bot.*, 53 (366), 111-121.
- KHAITY M. (1989) : *Croissance en matière sèche d'un peuplement de luzerne (Medicago sativa L.). Etude de la compétition intra-spécifique en fonction du génotype et de la nutrition azotée*, thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers, 76 p.
- LEACH G.J. (1970) : "Shoot growth of lucerne plants cut at different heights", *Aust. J. Agric. Res.*, 21 (4), 583-591.
- LEMAIRE G., CRUZ P., GOSSE G., CHARTIER M. (1985) : "Etude des relations entre la dynamique de prélèvement d'azote et la dynamique de croissance en matière sèche d'un peuplement de luzerne (*Medicago sativa* L.)", *Agronomie*, 5 (8), 685-692.
- MEEK B.D. RECHEL E.A., CARTER L.M., DE TAR W.R. (1988) : "Soil compaction and its effect on alfalfa in zone production systems", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52, 232-236.

- MEEK B.D., RECHEL E.A., CARTER L.M., DE TAR W.R. (1989) : "Changes in infiltration under alfalfa as influenced by time and wheel traffic", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53, 238-241.
- PAPY F. (1984) : *Comportement du sol sous l'action des façons de reprise d'un labour au printemps*, thèse de Doct. Ing. de l'INA-PG, 232 p. + annexes.
- PAPY F. (1987) : "Comportement d'une couche labourée sous des actions de compactage en fonction de son état hydrique et structural", *Agronomie*, 7 (2), 111-121.
- RECHEL E.A., CARTER L.M., DE TAR W.R. (1987) : "Alfalfa growth response to a zone-production system. I. Forage production characteristics", *Crop Sci.*, 27, 1029-1034.
- RECHEL E.A., MEEK B.D., DE TAR W.R., CARTER L.M. (1990) : "Fine root development of alfalfa as affected by wheel traffic", *Agron. J.*, 82, 618-622.
- SHEESLEY R., GRIMES D.W., MCCLELLAN W.D., SUMMERS C.G., MARBLE V. (1974) : "Influence of wheel traffic on yield and stand longevity of alfalfa", *Calif. Agric.*, 28: 6-8.
- SMITH D., NELSON C.J. (1967) : "Growth of birdsfoot trefoil and alfalfa. I- Response to height and frequency of cutting", *Crop Sci.*, 7, 130-133.
- SOANE B.D., VAN OUWERKERK C. (1994) : "Soil compaction problems in world agriculture", Soane B.D. et Van Ouwerkerk C. eds, *Soil Compaction and Crop Production, Developments in Agricultural Engineering*, 11, Elsevier, Amsterdam, 1-21.
- TARDIEU F., MANICHON H. (1987) : "Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. II- Croissance et disposition spatiale du système racinaire", *Agronomie*, 7 (3), 201-211.
- THIEBEAU P., PARNAUDEAU V., GUY P. (2003) : "Quel avenir pour la luzerne en France et en Europe ?", *Le Courrier de l'Environnement de l'INRA*, 49, 29-46.
- VOORHEES W.B., CARLSON V.A., SENST C.G. (1976) : "Soybean nodulation as affected by wheel traffic", *Agron. J.*, 68 (6), 976-979.
- WOLKOWSKI R.P. (1990) : "Relationship between wheel-traffic-induced soil compaction, nutrient availability, and crop growth : a review", *J. Prod. Agric.*, 3 (4), 460-469.

SUMMARY

Effects of the passages of the wheels of harvesting machines on the production of lucerne crops

Harvesting lucerne fields follows an industrial logic : the dates are chosen in order to optimize the forage production as well as the efficiency of the harvesting operations and of the factories. The impact of the traffic during harvesting is often visible, especially if the weather has been wet. The effect of the passage of the wheels on the forage production and on the perennity of the lucerne crop remains to be determined.

This effect has been measured on 27 couples of lucerne fields ('Rolled' - 'Control') ; the fields were pure lucerne crops, 2 years old. The impacts of the wheels were quantified as regards the soil structure, the state of the pivot roots and the dry mater (DM) production of the current year. Four types of soil structure were defined, depending on the thickness of the compacted layer, a typology that explained well the increase in soil bulk density, which ranged between 0.25 and 0.45. Whatever the type of structure, and independently of the soil water status at the time of the harvest, the rolling led to a decrease of the DM yield of between 15 and 20% in the first re-growth after the harvest, and from 10 to 30% in the second. The number of lucerne plants and of stems per plant were significantly lower in the 'Rolled' zones than in the controls. Three types of effects of the wheels on the pivot roots were defined, of which one led to the death of the plant. The leaf/stem ratio was significantly reduced in the rolled zones. The nitrogen content appeared to conform on an average to Lemaire's dilution curve, but in the more compacted zones, there seemed to appear nitrogen deficiencies. The quality of the harvested forage was identical between zones, notwithstanding the loss in DM yield. Lastly, the extrapolating of these data to the whole field gives a yield reduction of 1 to 3% in the next two cuts following the passage of the wheels.