

Impacts environnementaux des TCSL

Des effets positifs sur la
de l'air et l'effet d

Amélioration de la qualité des sols, de la biodiversité, lutte contre l'érosion, les techniques culturales sans labour ont aussi des effets sur la qualité de l'air. Par l'augmentation du stockage du carbone dans le sol et la diminution de la consommation de carburants, elles présentent un bilan « effet de serre » plus favorable que le labour.

Jean-Claude Germon
jc.germon@dijon.inra.fr

INRA Dijon

Bernard Nicolardot
b.nicolardot@enesad.fr

ENESAD Dijon

Aurélié Métay
metay@supagro.inra.fr

SupAgro Montpellier

Jérôme Labreuche
j.labreuche@arvalisinstitutduvegetal.fr

ARVALIS – Institut du végétal

Ont participé au groupe de travail à l'origine de cet article les 4 auteurs et Dominique Arrouays, Manuel Martin, Benoît Gabrielle, Bruno Mary (INRA), Afsaneh Lellahi, Irène Félix (ARVALIS-Institut du végétal), Lionel Quéré, Raymond Reau (Cetiom), Sylvain Deseau (CA 45), Aurélié Ganteil et Julien Galiène (APCA).

Face à une demande croissante et des exigences environnementales plus fortes, les techniques culturales sont appelées à évoluer pour assurer des conditions de production durables : des niveaux de fourniture alimentaire en accord avec les besoins, une qualité conforme aux normes des produits alimentaires, garantissant la pérennité des conditions de production et des ressources naturelles (sols, eaux, atmosphère).

Les TCSL (techniques de culture sans labour), qui connaissent un fort développement en France et dans le monde, s'inscrivent parmi les méthodes réputées plus économes en énergie et susceptibles de mieux assurer la protection des sols contre l'érosion tout en préservant leurs stocks de matière organique (cf *Perspectives Agricoles de février et mai 2008*). Dans ce contexte de développement, il importe d'en évaluer les effets sur :

- la qualité de l'air et plus particulièrement les pollutions atmosphériques non liées à l'effet de serre,
- le bilan énergétique des cultures à travers la consommation de carburants fossiles et la production de biomasse végétale,
- le bilan effet de serre des cultures qui intègre à la fois la production de gaz carbonique par la consommation de

© D.R.



▲ **Sous nos climats, le semis direct induit des mécanismes favorables au stockage du carbone dans le sol.**

carburants fossiles, et le bilan des échanges gazeux entre la culture et l'atmosphère.

Peu d'effets sur les émissions d'ammoniac

En plus des phénomènes d'érosion éolienne, les pollutions atmosphériques d'origine agricole et non liées à l'effet de serre sont princi-

palement constituées par les émissions d'ammoniac et la volatilisation de pesticides. Les émissions d'ammoniac sont régulièrement observées lors des épandages de fertilisants ammoniacaux ou d'effluents d'élevage riches en azote ammoniacal. Alors que

▶ Les TCSL ont un impact sur la qualité de l'air et les bilans énergétique et « effet de serre » des cultures.

qualité e serre



l'enfouissement réduit cette volatilisation, les TCSL, qui conduisent à des épandages uniquement en surface du sol, favorisent inévitablement ce type d'émissions. Cependant, les techniques de travail superficiel du sol peuvent les réduire. Les quelques données de la littérature indiquent que ces émissions d'ammoniac sont, soit équivalentes, soit légèrement plus élevées en TCSL qu'en système labouré traditionnel.

La volatilisation des pesticides se produit couramment lors des épandages de produits phytosanitaires, avec une intensité très variable en fonction des produits et des conditions d'épandage : l'accumulation de matière organique en surface des sols en TCSL pourrait être un élément favorable à la rétention des produits épandus tandis que la surface d'échange avec l'atmosphère des résidus de culture non enterrés pourrait être favorable à la volatilisation des herbicides de post semis-prélevée. Il n'est cependant pas possible de tirer de conclusion de portée générale à partir des données expérimentales actuellement disponibles.

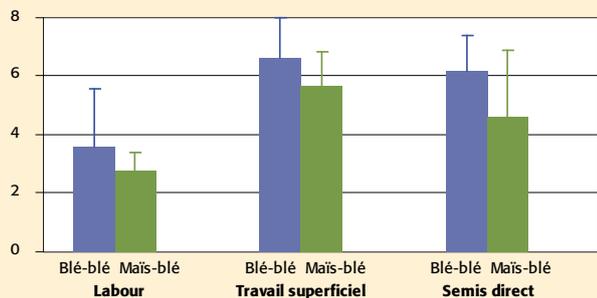
Augmentation du stock de carbone organique du sol

Les pratiques culturales peuvent accélérer ou ralentir les phénomènes de minéralisation de la matière organique dans le sol, accentuant ou diminuant son stockage dans les sols cultivés et participant ainsi à la régulation des flux du CO₂ atmosphérique, principal responsable de l'augmentation de l'effet de serre. La variation du stock de carbone organique des sols cultivés fait partie des postes actuellement pris en compte dans la comptabilité des émissions de gaz à effet de serre. Les nombreux travaux à travers le monde soulignent la variabilité des résultats en fonction des conditions de milieu. Sous nos climats, les TCSL induisent des mécanismes favorables au stockage dans le sol, résultat des effets conjugués sur la minéralisation ralentie de la matière organique stable du sol et sur l'évolution des matières organiques apportées.

Ce stockage a été évalué à partir des données tirées de l'expérimentation de longue durée de Boigneville (91) (*figure 1*). Cet essai conduit depuis 1970 met en évidence

Variation du stock de carbone organique dans l'horizon de surface des trois types de travail du sol à Boigneville (91) entre 1970 et 1998 (Balesdent et al., 2002) (fig. 1)

Variation de stock du carbone (t/ha)



Les traitements appliqués :

- labour annuel avec retournement du sol sur une profondeur moyenne de 23 cm
- travail superficiel correspondant à un passage d'outil animé sur une profondeur de 5 cm
- semis direct, ne faisant intervenir qu'un passage de semoir au moment du semis.

En ralentissant la minéralisation des matières organiques, les TCSL augmentent les stocks de carbone organique dans les sols avec un effet variable selon les rotations culturales.



© INRA

▲ **Chambres automatiques de mesure du N₂O. Bien plus nocif pour l'effet de serre que le CO₂, le N₂O est produit par la microflore du sol au cours de la nitrification et de la dénitrification.**

une augmentation du stock de carbone dans les sols en TCSL par rapport aux sols labourés, ainsi qu'un effet de la rotation culturale sur l'évolution de ce stock de carbone, avec une accumulation plus marquée les premières années après la mise en place des TCSL et une atténuation avec le temps (tableau 1).

Estimation de l'augmentation du stock de carbone organique du sol dans les parcelles soumises à différentes durées de TCSL par rapport aux parcelles labourées (Boigneville, 91) (tab. 1)

Durée de la mise en place des TCSL	8 ans	20 ans	28 ans
Estimation de l'augmentation du stock de carbone du sol	120 à 300 kg/ha/an	90 à 270 kg/ha/an	100 kg/ha/an

L'augmentation du stock de carbone organique s'atténue avec le temps.

Sous nos climats, les capacités de stockage de carbone dans le sol sous l'effet des TCSL sur une vingtaine d'années n'excèdent pas 200 kg/ha/an, valeur sensiblement inférieure aux valeurs de 300 à 500 kg/ha/an relevées dans la littérature anglo-saxonne et qui semblent aller vers une révision à la baisse au cours de ces dernières années.

Une augmentation des émissions de N₂O qui s'atténue dans le temps

Sur le territoire français, les émissions de N₂O constituent le second contributeur à l'accroissement de l'effet de serre après les émissions de CO₂. Bien que 1 000 fois moins concentré que le CO₂ dans l'atmosphère, ce gaz est 300 fois plus actif au niveau de ses capacités de réchauffement : 1 kg d'azote émis par le sol sous forme de N₂O a les mêmes effets que la libération de 126 kg de carbone sous forme de CO₂. Autrement dit, en terme d'effet de serre, les effets bénéfiques d'une augmentation du stock de carbone du sol par les TCSL peuvent être facilement réduits à néant par une faible émission de N₂O.

Ce gaz est produit par la microflore du sol au cours de la nitrification et de la dénitrification et est très dépendant de l'intensité des transformations du cycle de l'azote. On estime qu'une fraction de l'azote transformé est régulièrement émise sous forme de N₂O, avec un coefficient d'émission estimé actuellement à 1 % (intervalle de confiance : 0,3 à 3 %) de l'azote apporté au sol ou aux cultures sous forme d'engrais minéraux.

▶ 1 kg d'azote émis par le sol sous forme de N₂O a les mêmes effets que la libération de 126 kg de carbone sous forme de CO₂.

La suppression du labour est accompagnée généralement d'une accumulation de matière organique dans la couche de surface du sol et d'une diminution de la porosité structurale, qui sont des conditions réputées favorables à la formation de N₂O à partir des nitrates. Mais elles peuvent être aussi favorables à la transformation de ce gaz en azote gazeux inerte et donc en limiter les émissions. Les résultats les plus nombreux indiquent des émissions de N₂O plus importantes en TCSL qu'en système avec labour ; d'autres résultats ne montrent pas de différence ou présentent même des résultats inversés.

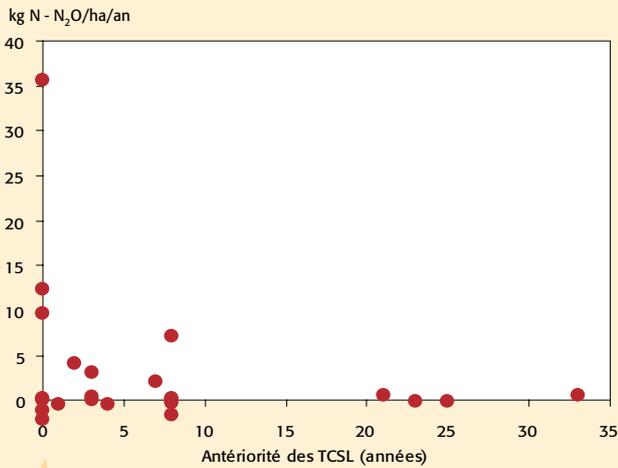
Un récent travail de synthèse (Nicolardot et Germon, 2008) suggère que les conditions favorables s'atténuent avec la durée de mise en techniques simplifiées et qu'après plusieurs années, ces émissions tendent à devenir comparables en système labouré et en TCSL (figure 2).

▼ **L'impact des TCSL sur les émissions de méthane et de NO_x reste à approfondir mais ne semble pas déterminant.**



© R. Légère, ARVALIS-Institut du végétal

Variation de l'accentuation des émissions de N_2O en TCSL comparées à celles en systèmes avec labour dans différentes situations, en fonction de la durée de différenciation entre les traitements (Nicolardot et Germon, 2008) (fig. 2)



Les émissions de N_2O sont plus importantes en TCSL, mais la différence avec le labour s'atténue avec le temps.

Des effets négligeables sur le méthane et les NO_x

Le méthane, troisième gaz à effet de serre par ordre de contribution sur notre territoire, est à la fois produit et consommé par la microflore du sol. Selon les conditions de milieu, on observe une production par le sol, notamment en milieu inondé, ou inversement une absorption par les sols non saturés en eau, ce qui est la règle générale dans la plupart de nos sols cultivés.

Les données actuellement disponibles ne permettent pas de montrer d'effet net des TCSL sur les capacités de production et de consommation de méthane par les sols et conduisent à penser que, si un tel effet existe, il est de faible amplitude.

Les NO_x (NO et NO_2) ne sont pas des gaz à effet de serre proprement dits, mais des précurseurs de l'ozone des basses couches de l'atmosphère, lui-même impliqué directement dans l'effet de serre. Les NO_x

sont pour partie produits par les sols, principalement lors de la nitrification; la limitation des émissions de ces gaz est considérée comme un moyen d'atténuation de l'effet de serre. Les quelques mesures réalisées montrent des émissions plus marquées en systèmes labourés qu'en TCSL, avec de faibles différences et des conséquences jugées négligeables en terme d'effet de serre.

Les TCSL améliorent le bilan énergétique des systèmes de culture

Avec l'augmentation des coûts énergétiques, l'économie d'énergie liée à la réduction des techniques culturales est un élément de poids dans le développement des TCSL. Différentes enquêtes et travaux situent la réduction de

la consommation de carburants en systèmes simplifiés de travail du sol entre 20 et 40 l/ha/an (tableau 2), soit une économie de 20 à 40 % de la consommation annuelle en carburant liée aux pratiques culturales. On observe par ailleurs des fluctuations marquées en fonction des types de sols, avec des valeurs plus faibles en sols limoneux ou limono-argileux, les économies les plus fortes étant réalisées en terrain argileux (Labreuche et al., 2007).

Pour établir le bilan énergétique d'un système de culture, les consommations de carburants liées au travail du sol et aux techniques culturales doivent être complétées par les consommations indirectes (énergie pour la synthèse des engrais, des pesticides...) et peuvent être mises en compa-



Estimation des consommations de carburant liées au seul travail du sol ou à l'ensemble des pratiques culturales dans deux séries de données comparant le labour aux TCSL (données ARVALIS-Institut du Végétal) (tab. 2)

	Semis direct	Travail superficiel	Labour
Consommation moyenne (fioul, l/ha/an) liée au travail du sol dans 6 situations expérimentales différentes sur 2 à 8 années (essais ITCF)	15	22	36
Consommation moyenne (fioul, l/ha/an) sur l'ensemble du cycle cultural annuel évaluée avec les trois modes de travail du sol de l'essai de Boigneville, 91 (rotation maïs-blé)	61	87	106

Les TCSL induisent une réduction de 20 à 40 % de la consommation de carburants liée au travail du sol.

© Ch. Baudart - Perspectives Agricoles



▲ La principale source d'économie d'énergie réside dans la diminution de la consommation de carburants en TCSL par rapport au labour.

Consommation et bilan énergétiques annuels (mégajoules/ha/an) de la rotation maïs-blé de l'essai de Boigneville (91) avec les trois types de travail du sol étudiés (d'après Labreuche et al., 2007) (tab.3)

	Semis direct	Travail superficiel	Labour
Mécanisation	2716	3841	4634
Engrais	7216	7216	7216
Phytosanitaires	640	425	227
Semences	603	603	603
Dépense énergétique globale	11 174 (88 %)	12 085 (95 %)	12 679 (100 %)
Valeur énergétique de la production	93370	94043	93737
Bilan énergétique	82196	81958	81058

La réduction des dépenses énergétiques en TCSL est de portée limitée, mais bien réelle.

raison avec la valeur énergétique de la production végétale récoltée. Le tableau 3 permet de souligner plusieurs points :

- le principal poste de dépenses énergétiques est lié à l'usage des fertilisants et n'a pas été modifié avec les pratiques culturales ;

- la mise en place des TCSL est accompagnée d'un usage accru de produits phytosanitaires dont le coût énergétique global pèse relativement peu sur le bilan énergétique, les répercussions négatives de cet usage devant être évaluées à un autre niveau ;

- la réduction des dépenses énergétiques consécutive à la mise en place des TCSL et liée au seul travail du sol (« mécanisation ») conduit à une diminution globale de la consommation d'énergie de l'ordre de 10 % : 5 % avec le travail superficiel et 12 % avec le semis direct.

▶ Le bilan « effet de serre » prend en compte l'équivalent CO₂ des flux de carburants, de gaz à effet de serre et de carbone du sol.

L'effet des TCSL sur le bilan énergétique global apparaît faible, mais demeure favorable aux TCSL : ceci s'explique par le fait que, dans ce contexte du Bassin Parisien, le rendement des cultures pratiquées et leur valeur énergétique n'ont pas été altérés par la mise en place de ces techniques simplifiées, ce qui renforce leur intérêt.

Décompactage et couvert

Certaines pratiques culturales susceptibles d'être associées aux TCSL (décompactage, mise en place de cultures intermédiaires...) peuvent interférer avec l'effet des TCSL sur la qualité de l'air. L'association du semis direct et du décompactage épisodique devrait conduire à des bilans énergétiques et « effet de serre » proches de ceux observés pour le travail superficiel, tandis que la mise en place de cultures intermédiaires de faible poids sur le bilan énergétique devrait conforter les effets bénéfiques des TCSL sur le bilan « effet de serre » en renforçant le stockage du carbone. Ces observations demandent à être confirmées par des résultats expérimentaux plus abondants.

Une réduction de 11 à 16 % des émissions de gaz à effet de serre

Le bilan global « effet de serre » complète le bilan énergétique. Dans ce dernier, on inclut la valeur énergétique de la biomasse récoltée car celle-ci est potentiellement utilisable comme source d'énergie. Dans le bilan « effet de serre » on évalue la contribution des cultures à l'accroissement de l'effet de serre en convertissant en équivalents CO₂ les flux des différents composés impliqués : carburants consommés directement ou indirectement, flux de GES (gaz à effet de serre) autres que CO₂ émis par le système de culture et flux de carbone stocké durablement dans le sol. Dans la mesure où la biomasse produite par chaque culture annuelle est transformée à nouveau en gaz carbonique au cours de l'année qui suit sa production, on considère que cette biomasse formée sur un cycle annuel n'a pas d'impact sur l'effet de serre et ne doit donc pas être

prise en compte dans ce type de bilan.

L'établissement du bilan effet de serre repose sur deux sous bilans. Le premier dérive de la conversion en CO_2 des sources d'énergie utilisées et intègre les émissions directes et indirectes de CO_2 liées aux pratiques culturales. Le second est le bilan des émissions au niveau du sol, constitué principalement par les variations des stocks de carbone du sol convertis en flux de CO_2 , et par les émissions de N_2O , transformées en équivalents CO_2 .

▶ Variable en fonction des types de sols, la consommation de carburants en systèmes simplifiés de travail du sol diminue de 20 à 40 % par rapport au labour.

Le *tableau 4* souligne le poids déterminant des émissions liées à la conduite des cultures, essentiellement constituées par la combustion de sources d'énergie fossiles. Les effets liés à l'augmentation du stock de carbone dans le sol et aux émissions de N_2O amplifient la différence entre le système avec labour et les systèmes en TCSL, avec une réduction globale des émissions de 11 % en travail superficiel et de 16 % en semis direct.

Des bilans énergétiques et effet de serre en faveur des TCSL

Les systèmes de culture en TCSL permettent d'améliorer les bilans énergétiques et effet de serre par rapport aux systèmes basés sur le labour par une réduction de 20 à 40 % de la consommation d'énergie liée aux techniques culturales et un renforcement du stockage de carbone dans le sol à la fois significatif mais d'une ampleur limitée et dont l'effet bénéfique peut être éliminé par une éventuelle accentuation des émissions de N_2O .



© J. Labreuche, ARVALIS-Institut du végétal

▲ **L'étude des répercussions des TCSL dans différents contextes environnementaux nécessite de disposer de sites expérimentaux bien conçus, représentatifs de la diversité de notre territoire, et gérés dans la durée.**

Ces deux bilans mettent en évidence les différents postes sur lesquels il peut être intéressant d'intervenir pour réduire la contribution des itinéraires techniques à l'augmentation de l'effet de serre, et de souligner dans le cas présent le poids déterminant de la réduction de la consommation de carburant liée aux techniques culturales. Cette constatation permet de passer d'une évaluation essentiellement environnementale des TCSL, basée initialement sur la préservation des sols et la lutte contre l'érosion, à une démarche intégrant davantage d'éléments économiquement chiffrables. Dans le contexte actuel d'une augmentation du coût de l'énergie, une ré-

Bilan des émissions de gaz à effet de serre ($\text{kg CO}_2/\text{ha}/\text{an}$) en fonction des trois modes de travail du sol sur le dispositif de Boigneville (91) (Labreuche et al., 2007) (tab. 4)

	Semis direct	Travail superficiel	Labour
Emissions liées à la conduite des cultures	2047	2223	2340
Emissions/stockage par le sol	- 70	- 136	11
Bilan des émissions de GES	1978 (84,1 %)	2087 (88,8 %)	2351 (100 %)

Si l'on tient compte du CO_2 et du N_2O émis et du carbone stocké dans le sol, les TCSL permettent de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

duction sensible du poste de consommation de carburant sera pour les agriculteurs un élément fort d'incitation au

développement de ces TCSL, avec des variantes suivant les situations agronomiques ou environnementales. ■