Action 3

Développer les techniques culturales sans labour pour stocker du carbone dans les sols

Auteurs
Claire Chenu (AgroParisTech)
Jean-Pierre Butault (INRA-SAE2)

Appui scientifique interne
Denis Angers (Agriculture et Agroalimentaire Canada)
Caroline Colnenne-David (INRA-EA)
Aurélie Metay (Montpellier Supagro)

Extraction et traitement de données
Nathalie Delame (INRA-SAE2)
Christine Le Bas (INRA-EA)

Relecteurs scientifiques externes
Hubert Boizard (INRA-EA)
Philippe Rochette (AAC Canada)

Relecteurs techniques externes
Antonio Bispo (ADEME)
Jean-Pierre Cohan (Arvalis)
Jérôme Labreuche (Arvalis)

1. Introduction : cadrage et description succincte de l'action

La pratique du labour, qui est la situation de référence, engendre un mélange et un retournement des horizons à l'aide d'une charrue à versoirs (en anglais *inversion tillage*, *ploughing*). Par opposition, les "Techniques Culturales Sans Labour" (TCSL) recouvrent des pratiques diverses sans retournement du sol qui vont du semis continu sans labour à des modalités alternant labour et travail superficiel. Ces techniques simplifiées ont été adoptées le plus souvent pour réduire le temps de travail, mais il en est aussi attendu des effets environnementaux positifs et, en particulier, une réduction des émissions de GES par un stockage de carbone dans les sols, sous forme de matières organiques.

2. Description de l'action

2.a. Mécanismes en jeu et émissions de GES associées

Les TCSL peuvent agir sur plusieurs postes :

- économie d'énergie fossile, le labour nécessitant une force de traction importante ;
- stockage de carbone (C) dans le sol, qui tend à augmenter, car les matières organiques sont mieux protégées de la biodégradation dans la structure du sol ;
- émissions de N_2O, qui tendent à augmenter en raison de conditions souvent plus anoxiques dans le sol ;
- augmentation de l'utilisation de produits phytosanitaires (particulièrement herbicides, le labour n'assurant plus la fonction de contrôle des adventices). Il y a donc un impact en amont sur le bilan GES lié à la fabrication, au transport et à l'application de ces produits phytosanitaires.

2.b. Sous-actions ou options techniques instruites

Les opérations de travail du sol (Tableau 1) peuvent avoir différents effets sur les matières organiques des sols :

- Elles peuvent conduire à enfouir les matières organiques et les diluer dans une certaine épaisseur de sol.
    - Ce sont les opérations de labour conduisant à inverser le sol avec des charrues à versoir, qui placent les horizons de surface en profondeur ;
    - Ce sont les opérations qui assurent un mélange des résidus de culture et du sol, sur une certaine profondeur de sol mais sans retournement. Il s'agit d'opérations mobilisant des outils à disques, à dents :
        - Le travail superficiel (8 à 15 cm de profondeur) ;
        - Le pseudo-labour, qui mélange la terre sans retournement, mais plus profondément que le travail superficiel ;
        - Le billonnage, dans lequel un mélange du sol, sans retournement complet, est effectué sur une butte de 20 cm de haut, dans des cultures de plantes sarclées ;
- Elles peuvent maintenir une localisation de la matière organique issue des résidus de culture dans les horizons de surface du sol :
    - Le sous-solage et le décompactage, qui créent une porosité dans le sol sans le retourner ni le mélanger s'ils ne sont pas associés à un travail superficiel ou un labour ;
    - Le travail (très) superficiel (3 à 15 cm de profondeur) ;
    - Le semis direct. Un travail du sol n'est alors réalisé que sur la ligne de semis, à une profondeur faible (< 5 cm), en général par des semoirs à disques.

D'autres pratiques limitent la surface de la parcelle qui fait l'objet d'un travail, telles que le *strip till* : travail du futur rang de cultures à fort écartement entre rangs (5 à 25 cm de profondeur sur 10-20 cm de large).

Ces différentes opérations peuvent être appliquées de manière systématique, ou occasionnelle comme un labour en alternance avec un semis direct ou avec un travail superficiel.

Tableau 1. Classification des opérations de travail du sol (d'après Labreuche et al., 2007)

	Profondeur (cm)	**Mélange**	**Retournement**	**Plante de couverture**
Opérations conduisant à une dilution de la matière organique en profondeur				
Labour	15-40	Oui	Oui	Possible
Pseudo-labour	15-40	Oui	Non	Possible
Billonnage	20	Oui	Non	Non
Travail superficiel	8-15	Oui	Non	Possible
Opérations ne conduisant pas à une dilution de la matière organique en profondeur				
Sous-solage	40-50	Non	Non	Possible
Décompactage	15-40	Non	Non	Possible
Travail superficiel	3-8	Oui	Non	Possible
Semis direct	0	Non	Non	Possible
Semis direct sous couvert	0	Non	Non	Systématique

Nous documenterons ici trois modalités de TCSL, qui seront comparées au labour appliqué en continu : le semis direct, le labour occasionnel, en alternance avec un semis direct, et le travail superficiel.

Nous considérons le semis direct, car il s'agit de la pratique qui a fait l'objet de la très grande majorité des travaux scientifiques à ce jour. C'est de plus une pratique extrême du point de vue des matières organiques du sol, puisqu'il n'y a ni retournement, ni mélange, ni fragmentation du sol. Cependant cette pratique est actuellement peu répandue en France. Les pratiques de travail superficiel, d'alternances de semis direct et travail superficiel sont beaucoup plus répandues au sein des rotations. Toutefois, elles ne sont que très peu renseignées dans la littérature : on ne dispose donc pas de références quantitatives. De plus, le terme de travail superficiel recouvre des interventions allant de 3 à 15 cm de profondeur, ce qui est potentiellement assez différent pour le devenir des matières organiques des sols. Enfin, le terme de "travail réduit" que l'on rencontre dans la littérature, recouvre une diversité de pratiques, parfois non définies ; il ne sera pas donc utilisé ici.

Les TCSL peuvent être associées à l'implantation d'une culture de couverture, qui peut être permanente. On parle alors de semis direct sous couvert végétal (SCV) : un semis direct de la culture est fait dans une couverture végétale, laquelle peut être morte ou vivante. Le SCV est très peu renseigné dans la littérature et se caractérise par l'absence de données publiées concernant les matières organiques et les émissions de GES pour les conditions tempérées. En l'absence de références, cette pratique ne sera donc pas développée ici.

Les TCSL sont appliquées dans plusieurs contextes : grande culture, maraîchage, vigne et arboriculture. Cependant, les TCSL sont très peu répandues en maraîchage. Elles sont en vignes et vergers associées à un enherbement des parcelles et donc abordées dans l'action "Cultures intermédiaires et intercalaires". Nous ne considèrerons donc ici que les grandes cultures.

Au titre de l'action "développer les TCSL", nous considèrerons ici **trois options techniques** :

- **développer le semis direct continu,** sur des parcelles antérieurement labourées ;
- **développer le semis direct discontinu (et donc le labour occasionnel)** sur des parcelles antérieurement labourées : **labour un an sur cinq ;**
- **développer le travail superficiel** (≤ 15 cm) sur des parcelles antérieurement labourées.

Le *labour continu* est la situation de référence de cette action. Le développement récent des TCSL en France nous conduit toutefois à considérer une certaine proportion de parcelles en *labour un an sur deux* en alternance *avec un travail superficiel* dans la référence 2010. Cette option technique, labour un an sur deux, ne sera donc présentée que par nécessité de calcul de la situation de référence.

2.c. Rapports et expertises ayant déjà examiné/évalué l'action

Plusieurs rapports et expertises présentent des travaux proches de la présente étude (Tableau 2) :

1. Arrouays D., Balesdent J., Germon J.C., Jayet P.A., Soussana J.F., Stengel P., 2002. *Contribution à la lutte contre l'effet de serre, Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ?* Rapport d'expertise scientifique collective, Paris, INRA, 334 p. http://www5.paris.inra.fr/depe/content/download/3187/32268/version/2/file/rapport_carbone_inra.pdf
2. Labreuche J., Le Souder C., Castillon P., Ouvry J.F., Real B., Germon J.C., de Tourdonnet S., 2007. *Evaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturales Sans Labour (TCSL) en France.* Rapport de contrat ADEME, 400 p. http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=51256&p1=02&p2=11&ref=17597

3. Eagle A.J., Olander L.P., Henry L.R., Haugen-Kozyra K., Millar N., Robertson G.P., 2012. *Greenhouse Gas Mitigation Potential of Agricultural Land Management in the United States - A Synthesis of the Literature*. Durham (USA): Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions, (Report NI R 10-04), 76 p. http://nicholasinstitute.duke.edu/ecosystem/land/TAGGDLitRev/at_download/paper
4. Moran D., MacLeod M., Wall E., Eory V., Pajot G., Matthews R., McVittie A., Barnes A., Rees B., Moxey A., Williams A., Smith P., 2008. *UK Marginal Abatement Cost Curves for the Agriculture and Land Use, Land-Use Change and Forestry Sectors out to 2022, with Qualitative Analysis of Options to 2050. Final Report to the Committee on Climate Change*, SAC Commercial Ltd, 152 p.
5. Smith P., Martino D., Cai Z., Gwary D., Janzen H., Kumar P., McCarl B., Ogle S., O'Mara F., Rice C., Scholes B., Sirotenko O., Howden M., McAllister T., Pan G., Romanenkov V., Schneider U., Towprayoon S., Wattenbach M., Smith J., 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Phil. Trans. R. Soc*. B 363, 789-813.
6. Sanderman J., Farquharson R., Baldock J., 2010. *Soil Carbon Sequestration Potential: A review for Australian agriculture*. National Research Flagship Reports, 81 p. http://www.csiro.au/Portals/Publications/Research--Reports/Soil-Carbon-Sequestration-Potential-Report.aspx

De nombreux rapports et études récents concernent l'impact des techniques culturales sans labour (TCSL) sur le stockage de carbone et les émissions de GES (Tableau 2). Les estimations de potentiel d'atténuation sont très variables. La seule étude ayant estimé une assiette maximale pour le territoire français métropolitain (Arrouays et al., 2002) n'a porté que sur le stockage de carbone et non sur les émissions des différents GES.

Tableau 2. Analyse comparative des rapports et expertises récents sur le sujet

Etude	Pays	Assiette maximale	Potentiel d'atténuation
1) Arrouays et al., 2002	France	50% de la SAU (9,5 Mha)	Stockage de C seul : 1,10 $MgCO_2$/ha/an en semis direct
2) Labreuche et al., 2007	France	Non estimée	Stockage de C : 0,55 $MgCO_2$/ha/an en semis direct
3) Eagle et al., 2012	USA	Evaluée pour les USA	1,47 $MgCO_2$/ha/an en semis direct 0,70 $MgCO_2$/ha/an pour les autres TCSL
4) Moran et al., 2008	UK	-	0,15 $MgCO_2$/ha/an
5) Smith et al., 2008	Monde	-	0,53 $MgCO_2$/ha/an
5) Sanderman et al., 2008	Australie	-	Faible potentiel attribué mais non quantifié

3. Etat des connaissances sur les phénomènes/mécanismes sous-jacents et leur quantification

3.1. Augmentation du stockage de C dans le sol en TCSL

Mécanismes sous-jacents

L'absence de labour augmenterait les stocks de C des sols par différents processus :

- une minéralisation moindre des matières organiques du sol due à une meilleure protection physique des matières organiques dans les agrégats du sol (Balesdent et al., 2000). En effet en non-labour, (i) le sol est mieux agrégé, (ii) il n'y a plus de dé-protection périodique des matières organiques lors des opérations de travail du sol elles-mêmes et (iii) la dé-protection due à la désagrégation effectuée par la pluie lorsque le sol est nu en interculture est moins fréquente ;
- une minéralisation moindre de la matière organique en raison de conditions plus froides et humides dans la couche de surface du sol, et à cause d'une dominance de la microflore du sol par des champignons plutôt que par des bactéries, (Balesdent et al., 2000 ; Metay et al., 2009), les champignons respirant une part plus faible du carbone qu'ils assimilent ;
- une diminution des pertes de matière organique par érosion. Il faut noter que le C érodé ne se traduira pas nécessairement par une émission de CO_2 accrue à l'échelle du bassin versant (Van Oost et al., 2007).

Mise en évidence, cas étudiés, mesures réalisées

De nombreux travaux ont mesuré les stocks de C des sols sous TCSL, par comparaison avec une référence labourée, après des durées variables de différentiation des pratiques. En fait, à ce jour, la majorité des études a été menée aux Etats-Unis et au Canada et porte sur une comparaison semis direct - labour. Ces travaux font l'objet d'études de cas, de revues bibliographiques et de méta-analyses. Cependant, seule une fraction des très nombreuses études publiées peut être utilisée

pour estimer un potentiel de stockage de C en raison d'imperfections et de biais méthodologiques. En effet, l'estimation des stocks de C doit être réalisée :

- pour des masses de sol équivalentes, après prise en compte des variations de densité apparente du sol dues à l'absence de labour (tendance au tassement du sol en non-labour) ;
- sur une profondeur de sol au moins équivalente à celle de la couche labourée ;
- pour des parcelles différenciées uniquement du point de vue des opérations de travail du sol, et pour lesquelles l'itinéraire technique et la rotation sont par ailleurs similaires.

Les estimations qui ne satisfont pas à ces critères ne sont pas retenues ici. Nous rapportons en particulier les résultats issus de trois méta-analyses récentes, qui ont satisfait aux critères explicités ci-dessus et se sont focalisées sur les essais d'une durée de 5 ans au moins (Angers et Eriksen-Hamel, 2008 ; Luo et al., 2010 ; Virto et al., 2012).

Comme pour d'autres pratiques, la cinétique de stockage de C n'est pas linéaire. Elle est plus rapide les premières années et atteint un plateau après quelques dizaines d'années (Arrouays et al., 2002). Nous chercherons ici à renseigner l'évolution des stocks de C pendant les vingt premières années suivant l'adoption de TCSL en considérant toutefois l'hypothèse simplificatrice d'un stockage linéaire. La différence de stock entre situation en TCSL et situation de référence en labour est appelée stock additionnel, ou stockage additionnel.

Ordres de grandeur, variabilité, incertitudes, extrapolabilité des données disponibles

• *Semis direct*

Les méta-analyses citées ci-dessus rapportent des stockages additionnels cumulés sous semis direct qui sont nuls à positifs (0 à 8,5 MgC/ha sur quinze ans en moyenne) (Tableau 3). L'absence de labour conduit à une stratification importante des matières organiques dans le profil de sol ; les horizons superficiels (0-20 cm) stockent du carbone alors que les horizons plus profonds déstockent du C, ce qui explique des bilans nuls (Luo et al., 2010) ou faiblement positifs (Angers et Eriksen-Hamel, 2008). Les potentiels de stockage sont donc nettement revus à la baisse par rapport à des revues bibliographiques antérieures (par exemple West and Post, 2002 ; Arrouays et al., 2002).

Tableau 3. Stockage de C dans le sol en semis direct en comparaison au labour. (NS= non significatif)

Profondeur considérée	Type d'étude	Nombre de situations	Durée de différenciation	Référence	Stockage additionnel cumulé (MgC/ha)	Stockage additionnel annuel	
						Durée considérée (an)	(MgC/ha/an)
0-30 cm	méta-analyse	44		West and Post, 2002	8,5	15	0,57
	revue et modélisation			Arrouays et al., 2002	3,3	20	0,2 ± 0,13
	revue et modélisation	82		Labreuche et al., 2007			0,15
	méta-analyse	92	≥ 5 ans	Virto et al., 2012	3,4	15	0,23 (NS)
	revue	7	≥ 5 ans	Powlson et al., 2012		10	0,31 ± 0,18
0 à profondeur >30 cm	méta-analyse	41	≥ 5 ans	Angers et Eriksen-Hamel, 2008	4,9	16	0,31
	méta-analyse	69	≥ 5 ans	Luo et al., 2010	0		pas de tendance significative
Valeurs retenues	Valeur basse						0
	Valeur haute						0,30
	Valeur moyenne						**0,15**

Pour le territoire français, les seules données disponibles proviennent des essais d'Arvalis à Boigneville (Essonne) mis en place en 1970. Une synthèse réalisée sur 28 ans (Metay et al., 2009) concluait à un potentiel de stockage additionnel d'environ 0,1 MgC/ha/an en semis direct dans l'essai dit "travail du sol". Par contre, aucun stockage additionnel de C en semis direct n'a été observé sur 30 cm de profondeur dans l'essai dit "environnement" après 16 années de différentiation (Constantin et al., 2010), ni après 20 années de différenciation (Dimassi et al., 2013).

Nous avons considéré que la méta-analyse de Angers et Eriksen-Hamel (2008) fournissait une valeur haute (0,30 MgC/ha/an) et que la méta-analyse de Luo et al. (2010) et les résultats récents de l'essai de Boigneville fournissaient une valeur basse (0 MgC/ha/an). La méta-analyse de Virto et al. (2011), qui est basée sur un plus grand nombre de données, fournit une valeur intermédiaire.

Nous retiendrons finalement pour cette option technique une valeur moyenne de stockage additionnel de 0,15 MgC/ha/an, et des extrêmes de 0 et 0,3 MgC/ha/an.

• *Labour occasionnel*

En France, le semis direct continu est très peu répandu ; les pratiques les plus fréquente semblent être celles du *labour occasionnel*, en alternance soit avec du travail superficiel, soit avec du semis direct, en fonction des cultures de la rotation, et selon les conditions climatiques de l'année ou la gravité du salissement des parcelles (Labreuche et al., 2007).

Très peu d'essais renseignent l'impact d'un *labour occasionnel* sur les stocks de carbone du sol et les résultats de la littérature sont contrastés concernant l'application de labours après un certain nombre d'années en semis direct. Ainsi Koch et Stockfish (2006) ont mesuré une perte de 6% du stock de C un an après la conversion depuis un travail superficiel à 10 cm à un labour. Vandenbygaart et Kay (2004), considérant 4 parcelles de textures contrastées 18 mois après un labour unique succédant à 22 ans de semis direct, ont mesuré une perte de 8% du stock de C dans une situation et aucune variation de stock pour les trois autres situations. Quincke et al. (2007) n'ont pas non plus mis en évidence de différences de stock de C, deux ans après le labour de parcelles antérieurement conduites en semis direct. A Boigneville dans l'Essonne, Dimassi et al. (2013) n'ont mesuré aucune variation du stock de C dans les 30 cm de surface après 6 ans de labour succédant à 14 ans de semis direct ; cependant, il s'agit d'un site où le semis direct lui-même ne génère pas de stockage de C additionnel par rapport au labour continu.

L'impact de la fréquence de labour sur le stockage additionnel obtenu en semis direct a également été estimé par modélisation. Ainsi Balesdent et al. (*in* Arrouays et al., 2002) ont estimé, avec le modèle AMG, qu'avec un labour tous les 5 ans, le stockage de C additionnel était de 65-71% de celui observé sous semis direct continu. En utilisant le modèle Century, Conant et al. (2007) ont estimé que l'application d'un labour tous les 5 ans au maximum, ou bien l'utilisation d'un travail superficiel ou d'un décompacteur tous les deux ans, permettrait de conserver 58% du stockage additionnel sous semis direct. Les mêmes modèles montrent qu'avec un labour un an sur deux, on stocke sur 20 ans 33% (Arrouays et al., 2002) et 22% (Conant et al., 2007) du stockage additionnel observé sous semis direct.

Nous retiendrons de ces modélisations pour un labour un an sur cinq une valeur moyenne de stockage additionnel de C de 65% de la valeur observée en semis direct, soit 0,10 MgC/ha/an. Le degré de confiance sur cette estimation est cependant faible. En multipliant par les valeurs retenues dans le Tableau 3, nous avons donc :

- *valeur moyenne : 0,10 MgC/ha/an (0,65 x 0,15 MgC/ha/an),*
- *valeur haute : 0,20 MgC/ha/an,*
- *valeur basse : 0 MgC/ha/an.*

• *Travail superficiel*

Très peu de données concernent spécifiquement le travail superficiel. De plus, le vocabulaire décrivant cette pratique n'est pas stabilisé. Ainsi les termes de *superficial tillage*, *shallow tillage* mais aussi *minimum tillage*, *reduced tillage* sont utilisés. La méta-analyse de West et Post (2002) indique des stocks de C non différents entre labour et travail superficiel. Sur les six études que nous avons répertoriées en Europe, dans lesquelles les stocks de C ont été comparés sur 30 cm au moins, seules deux d'entre elles montrent des stocks significativement supérieurs en travail superficiel par rapport au labour, contrairement à quatre études ne montrant pas de différence significative (Tableau 4).

Tableau 4. Stockage de C dans le sol en travail superficiel en comparaison au labour et au semis direct.
Les lettres entre parenthèses après les valeurs de stock notent les valeurs significativement égales ou différentes au seuil de 5%.
Dans ces études, les stocks ont été calculés soit sur la profondeur indiquée,
soit pour la masse de sol correspondant à la profondeur indiquée sous labour.

Etude	Localisation	Climat	Type de sol	Durée de l'essai (années)	Profondeur travaillée (cm)	Profondeur considérée (cm)	**Stocks de C** (MgC/ha/an)			Commentaire
							Labour	Travail superficiel	Semis direct	
Metay et al., 2009	France	tempéré	Luvisol	28	≤10	30	42,5 *(a)*	45,3 *(b)*	44,6 *(b)*	
Hermle et al., 2008	Suisse	tempéré	Luvisol	19	8	40	62 *(a)*	62 *(a)*	64 *(a)*	
Hernanz et al., 2009	Espagne	semi aride	Luvisol vertique	20	20	30	31,7 *(a)*	32 *(a)*	39 *(b)*	mêmes résultats stocks 0-40 cm
Sun et al., 2011	Ecosse	tempéré humide	Cambisol	5	7	30	102 *(a)*	109 *(b)*	105 *(ab)*	aucune différence stocks 0-60 cm
Lopez Fando, 2011	Espagne	Semi aride	Calcisol	17	22	30	46,4 *(a)*	45,9 *(a)*	52,5 *(b)*	
Viaud et al., 2011	France	tempéré humide	Cambisol humique	8	7	30	75,6 *(a)*	79,6 *(a)*	76,8 *(a)*	mêmes résultats stocks 0-40 cm

Nous retiendrons des stockages équivalents sous travail superficiel et labour, et donc une valeur moyenne de stockage additionnel de C nulle pour cette option technique.

• *Semis direct sous couvert végétal permanent (SCV)*

Une modalité de TCSL n'est pas renseignée à ce jour en milieu tempéré : il s'agit du *semis direct sous couverture végétale permanente*. Cette pratique, répandue dans différents pays émergents (Brésil), permettrait des stockages de carbone importants dans le sol du fait à la fois du semis direct lui-même et d'une production primaire augmentée. Ces stockages ont été estimés dans une fourchette de -0,13 à 1,9 MgC/ha/an pour des parcelles différenciées depuis plus de 5 ans et sur une profondeur d'au moins 18 cm (Corbeels et al., 2006 ; Maltas et al., 2007 ; Blanchart et al., 2007 ; Viera et al., 2009 ; de Rouw et al., 2010). En France, cette pratique est très peu répandue (Labreuche et al., 2007). Un unique essai de longue durée, mené par l'INRA à Versailles (essai La Cage) conduirait à un stockage de carbone dans le sol nettement plus élevé que dans la modalité en semis direct à Boigneville (Balabane et al., 2005 ; Chenu, données non publiées). Ce constat est à rapprocher du stockage de C additionnel important qui est mesuré dans des systèmes de culture avec cultures intermédiaires (Constantin et al., 2010 ; Gonzales Sanchez et al., 2012). Le SCV permettrait de cumuler l'effet d'entrées de C plus importantes au sol à l'effet d'une réduction du travail du sol. Comme annoncé précédemment, nous ne retiendrons pas cette pratique dans ce rapport, eu égard au manque de données publiées en milieu tempéré.

Facteurs déterminants du stockage de C dans les sols en TCSL

Climat et type de sol. La variabilité du stockage sous semis direct est très importante. Cependant, dans les trois méta-analyses récentes, aucune relation statistique n'a été trouvée entre le climat, ou les caractéristiques du sol et la variation de stock de carbone entre labour et semis direct (Angers et Eriksen, 2008 ; Luo et al., 2010 ; Virto et al., 2012). Toutefois, les situations en sol peu drainant, voire hydromorphe, sous climat tempéré humide semblent se distinguer par une absence de stockage additionnel sous semis direct (Angers et al., 1997 ; Gregorich et al., 2005 ; Sun et al., 2010 ; Hermle et al., 2008).

Rendement. Un stockage additionnel de C sous semis direct peut cependant être pour partie expliqué par des entrées de C au sol plus importantes dans des situations où les rendements sont plus élevés en semis direct qu'en labour. Ceci explique 30% de la variabilité du stockage additionnel sous semis direct expliquée dans la méta-analyse de Virto et al. (2012). Inversement, la baisse des rendements parfois constatée en semis direct pourrait expliquer les faibles stockages additionnels observés. La diversification des plantes de la rotation et l'introduction d'une seconde culture se traduisent par un stockage additionnel de C sous semis direct (Luo et al., 2010).

3.2. Augmentation des émissions de N_2O en TCSL

Mise en évidence, cas étudiés, mesures réalisées

L'absence de labour augmenterait les émissions de N_2O par les sols en favorisant la dénitrification par une structure du sol plus compacte et des conditions souvent plus humides, donc des conditions plus anoxiques favorables à l'action des microorganismes dénitrifiants.

De nombreuses références ont été acquises, essentiellement sur le continent nord-américain et en grandes cultures, mais également en Europe. Ces références font régulièrement l'objet de synthèses bibliographiques et de méta-analyses. La plupart des estimations d'émission de N_2O sont basées sur des mesures ponctuelles que l'on extrapole sur l'année, alors que peu de mesures en continu ont été réalisées. Une méta-analyse très récente (Van Kessel et al., 2012) synthétise cependant les études au champ, qui ont porté sur une saison de culture ou une année complète de mesures en continu et rapporte les résultats de 239 comparaisons de paires de parcelles en TCSL (semis direct ou travail réduit) *versus* labour, correspondant à 41 études différentes.

En France, des mesures ont été réalisées sur les essais de longue durée de comparaison de modalités de travail du sol d'Arvalis à Boigneville (Essonne) de manière discontinue en 2003-2004 (Oorts et al., 2007). Plus récemment, les flux d'émission de N_2O ont été mesurés en continu pendant la durée d'une rotation (28 mois) dans d'autres parcelles (Roussel et al., soumis).

Ordres de grandeur, variabilité, incertitudes, extrapolabilité des données disponibles

Le non-labour conduit à des émissions de N_2O souvent plus importantes qu'en labour (Tableau 5). La variabilité des émissions est cependant très grande, plus encore que pour le stockage de carbone. Ceci s'explique par les nombreux déterminants des émissions de N_2O (concentration en nitrate, disponibilité et qualité des matières organiques, abondance et structure des communautés de dénitrifiants, anoxie et donc structure et état hydrique des sols), ces déterminants étant susceptibles de varier sur des pas de temps assez courts (en particulier l'anoxie).

La méta-analyse de van Kessel et al. (2012) montre que ni le travail superficiel, ni le semis direct n'augmentent significativement les émissions de N_2O (Tableau 5).

Tableau 5. Emissions additionnelles de N_2O en non-labour comparé au labour
La valeur dite haute est celle qui correspond à l'atténuation maximale, donc aux émissions additionnelles de N_2O moindres, et la valeur basse à l'atténuation minimale. L'atténuation est exprimée en $kgCO_2e/ha/an$ en considérant un pouvoir de réchauffement global de 298 pour le N_2O. PRG (N_2O) = 298 PRG (CO_2). NS= non significatif au seuil de 5%.

Référence	Domaine concerné	Pratique comparée au labour	Emissions additionnelles de N_2O kgN/ha/an (ou en % des émissions sous labour *)	Mesures continues sur au moins la saison de végétation	Type d'étude
Six et al., 2002	Tous climats, tous sols	Toutes TCSL	2,9	non	synthèse bibliographique
Smith et Conen, 2004	Tous climats, tous sols	Toutes TCSL	2,1	non	synthèse bibliographique
Smith et al., 2002	Tous climats, tous sols	Toutes TCSL	1,65	non	synthèse bibliographique
Rochette, 2008	Sols bien aérés	Semis direct	-0,006	oui	synthèse bibliographique
	Sols moyennement aérés	Semis direct	0,12	oui	
	Sols hydromorphes	Semis direct	2,00	oui	
Van Kessel et al., 2012	Tous sols et climats	Toutes TCSL	0% (±10), NS*	oui	méta-analyse, 239 comparaisons
	Climats humides	Toutes TCSL	-2%(±8), NS*	oui	méta-analyse, 183 comparaisons
	Tous climats	Travail superficiel	-5% (±10), NS*	oui	méta-analyse, 62 comparaisons
	Tous climats	Semis direct	+2% (±10), NS*	oui	méta-analyse, 177 comparaisons
Oorts et al., 2007	Sols non hydromorphes	Semis direct	0,52	non	étude expérimentale
Roussel et al., soumis	Sols non hydromorphes	Semis direct	0,29	oui	étude expérimentale

Valeurs retenues d'atténuation unitaire			Emissions en kgN/ha/an	Atténuation en $kgCO_2e/ha/an$
Sols non hydromorphes	Valeur haute	Semis direct	0	0
	Valeur basse		-0,3	-140
	Valeur moyenne		-0,15	-70
Sols hydromorphes	Valeur basse	Semis direct		
	Valeur haute			
	Valeur moyenne		-2	-937

Facteurs déterminants des émissions de N_2O en TCSL

La variabilité des émissions de N_2O dépend du type de sol, du climat, du système de culture, et bien sûr du niveau d'apport d'azote. Cependant, aucune relation simple n'a été mise en évidence entre le supplément de N_2O émis en non-labour et ces facteurs, sauf en ce qui concerne l'aération des sols (Rochette, 2008 ; Ball et al., 2013 ; Tableau 5). En climat humide (i.e. indice d'aridité >0,65), lorsque le fertilisant est implanté à plus de 5 cm de profondeur, les TCSL réduisent faiblement, mais significativement, les émissions de N_2O par rapport au labour (Van Kessel et al., 2012).

En climat humide toujours, lorsque la durée d'implantation des TCSL est supérieure à 10 ans, les TCSL réduisent faiblement mais significativement les émissions de N_2O par rapport au labour (Van Kessel et al., 2012). Cette observation avait déjà été faite antérieurement (Six et al., 2002) et peut être attribuée à la mise en place d'un nouvel état structural après plusieurs années sous semis direct ou travail réduit, caractérisé par une densité apparente plus faible et des pores grossiers résultant de l'activité des vers de terre, état moins favorable au développement de zones anoxiques.

Notre estimation des émissions de N_2O s'appuie sur les synthèses de travaux impliquant des mesures en continu des émissions de N_2O, donc sur les analyses de Rochette (2008) et de Van Kessel et al. (2012).

Nous distinguons (cf. Tableau 5) :

- *les sols non hydromorphes, pour lesquels on considère une émission additionnelle de N_2O en semis direct de +0,15 kgN/ha/an (fourchette de 0 à 0,3 kgN/ha/an) ;*
- *les sols hydromorphes, pour lesquels on prendra une valeur moyenne de +2 kgN/ha/an en semis direct.*

En ce qui concerne le travail superficiel et pour des sites en climat tempéré, certains travaux montrent des émissions de N_2O plus importantes en travail superficiel qu'en labour (Beheyt et al., 2005), mais la plupart ne montrent pas de différences (Abdalla et al., 2010 ; Alvarez et al., 2012 ; Venterea et al., 2005 ; Mutegi et al., 2010). La méta-analyse de van Kessel et al. (2012) met en évidence des émissions non significativement différentes de celles en labour ou en semis direct (Tableau 5). Selon les types de sol et les modalités de travail superficiel (associées ou non à un décompactage, cf. Tableau 1), il y aura, ou non, un tassement du sol supérieur à celui de parcelles en labour et donc des émissions de N_2O supérieures ou non.

Nous considèrerons dans ce travail des émissions de N_2O équivalentes en travail superficiel et sous labour, pour des sols non hydromorphes. Nous avons cependant peu de confiance dans cette estimation.

Nous distinguons (Tableau 5) :
- *les sols non hydromorphes, pour lesquels on considère une émission additionnelle de N_2O en travail superficiel de +0 kgN/ha/an (fourchette de 0 à 0,15 kgN/ha/an) ;*
- *les sols hydromorphes, pour lesquels on prendra une valeur moyenne de +2 kgN/ha/an.*

Peu de travaux concernent l'ensemble des GES. Les émissions de CH_4 apparaissent négligeables par rapport aux émissions de l'ensemble des GES (CO_2 et N_2O) (Ball et al., 1999 ; Mosier et al., 2005 ; Ussiri et al., 2009). Elles sont de plus peu influencées par les modalités de travail du sol (Regina et Alakukku, 2010) et les flux de méthane sont souvent négatifs, c'est-à-dire que l'oxydation de méthane est plus importante que son émission (Ball et al., 1999 ; Ussiri et al., 2009). *Nous considèrerons donc une valeur nulle d'émissions de CH_4, quelle que soit la pratique de travail du sol.*

3.3. Economie de carburant

Mise en évidence, cas étudiés, mesures réalisées

Les méthodes de travail du sol superficiel ou simplifié et le semis direct permettent une économie de carburant systématique par rapport aux implantations avec labour, car on limite le nombre de passages par an et par hectare (Labreuche et al., 2007). Des abaques de consommation de carburant pour différentes opérations culturales et en fonction de la texture et de la consistance du sol sont disponibles (logiciel DELTAMEC d'Arvalis, par ex.).

Ordres de grandeur, variabilité, incertitudes, extrapolabilité des données disponibles

L'économie de carburant est de 10 à 50 l/ha/an pour le travail superficiel et de 15 à 60 l/ha/an pour le semis direct, selon les types de sol et les rotations (Labreuche et al., 2007). Dans l'essai de Boigneville par exemple, la réduction de la consommation annuelle de carburant est estimée à 28 l/ha en travail superficiel et à 41 l/ha en semis direct (Labreuche et al., 2011). Ces auteurs ont estimé la consommation de carburant et donc les émissions de CO_2 pour l'ensemble de l'itinéraire technique de l'essai, en culture de blé, de maïs ou en rotation maïs-blé (Tableau 6). Ces résultats sont cohérents avec d'autres résultats d'expérimentations Arvalis en grande culture dans différentes régions de France, rapportant des économies de carburant pour les opérations de semis et travail du sol de 9 à 25 l/ha /an pour le travail superficiel et de 20 à 41 l/ha/an pour le semis direct (Nicoletti, 2009 ; Labreuche et al., 2011) (voir Annexe 1). Koeller et al. (1989, *in* Soane et al., 2011) ont mesuré en Allemagne des économies de fioul de 27, 34 et 53 l/ha/an respectivement en sols sableux, limoneux et argileux. Arvidsson et al. (2010) quantifient des économies de fioul de 20 l/ha/an en sol limono-argileux et 45 l/ha/an en sol argileux.

Facteurs déterminants au niveau du phénomène (conditions pédo-climatiques, pratiques agricoles…)

L'analyse d'essais Arvalis synthétisés par Labreuche et al. (2007, 2011) montre que la consommation de fioul dans les itinéraires avec labour est la plus élevée pour les sols argileux (l'essai de Boigneville est, lui, en sol limoneux). Les cultures qui sont associées aux plus fortes consommations de fioul en labour sont les cultures de printemps (betterave, maïs, tournesol, pois) ainsi que le colza (labour en sol humide en fin d'hiver avec travail ensuite du sol en surface). En conséquence, les économies de carburant maximales réalisées en TCSL le sont en sol argileux et en cultures de printemps (Labreuche et al., 2007, 2011).

Bien que les résultats obtenus à Boigneville par Arvalis ne concernent que des céréales, nous utiliserons ces valeurs dans la suite de ce travail (Tableau 6) car (i) les valeurs sont dans la gamme de celles d'essais français (par ex. Annexe 1) et de la littérature et (ii) elles concernent l'ensemble de l'itinéraire technique.

Tableau 6. Consommations de fioul et émissions calculées de GES (en $kgCO_2e$/ha/an) dues à la mécanisation en fonction du mode de travail du sol lors des interventions sur l'essai "travail du sol" de Boigneville (Labreuche et al., 2011). Nous avons utilisé les facteurs d'émission du référentiel Dia'terre V1.33 : émissions directes (dues à la combustion) de 2,677 $kgCO_2e$/l fioul, et émissions induites en amont (dues au raffinage et au transport du fioul) de 0,563 $kgCO_2e$/l fioul). La valeur dite haute est celle qui correspond à l'atténuation maximale, donc à la réduction maximale de consommation de carburant.

Culture	Labour	Travail superficiel	Semis direct	TS-Labour	SD-Labour
Consommation de fioul (l/ha/an)					
Maïs	99	82	60	-17	-39
Blé	90	51	48	-39	-42
Rotation maïs blé	95	67	54	-28	-41
Emissions directes dues à la combustion ($kgCO_2e$/ha/an)					
Maïs				-46	-104
Blé				-104	-112
rotation maïs blé				-75	-110
Emissions induites amont dues au raffinage et au transport ($kgCO_2e$/ha/an)					
Maïs				-10	-22
Blé				-22	-24
rotation maïs blé				-16	-23
Valeurs retenues atténuation par émissions directes ($kgCO_2e$/ha/an)					
basse				46	104
haute				104	112
moyenne				75	110
Valeurs retenues atténuation par émissions induites ($kgCO_2e$/ha/an)					
basse				10	22
haute				22	24
moyenne				16	23

3.4. Emission induites : utilisation de produits phytosanitaires

Mise en évidence, cas étudiés, mesures réalisées

L'absence de labour se traduit par une augmentation de la pression des adventices et de certains ravageurs, qui peut être compensée par une utilisation accrue de produits phytosanitaires, et en particulier d'herbicides (Réal et al., *in* Labreuche et al., 2007 ; enquête ANPP-Columa 1997, *in* Labreuche et al., 2007). Selon l'enquête Agreste "Pratiques culturales" 2006, le non-labour se traduit, toutes cultures confondues, par 0,3 passage supplémentaire par an. .

Une estimation de l'impact des TCSL sur les émissions induites dues à une utilisation accrue de produits phytosanitaires a été réalisée par Labreuche et al. (2011) en se basant sur l'essai de longue durée de Boigneville, pour lequel les consommations de produits phytosanitaires sont enregistrées et exprimées sous forme d'émissions induites en utilisant les valeurs de facteurs d'émission de Dia'terre (Tableau 7). Là encore, ces valeurs ne concernent que des cultures de céréales, mais nous les avons retenues en l'absence d'autres estimations disponibles. Ces émissions sont faibles, comparées aux émissions directes (cf. Tableau 7b).

Tableau 7. Utilisation de produits phytosanitaires en fonction des pratiques de travail du sol

a) Nombre de passages en herbicides selon le labour et le non-labour (Enquête "Pratiques culturales" 2006)

	% herbicides dans l'Indice de Fréquence de Traitement (IFT)	**Nombre de passages d'herbicides**		**Indice** sans/avec
		Sans labour	Labour	
Blé tendre	34,0%	1,7	1,4	1,21
Blé dur	40,7%	1,4	1	1,40
Orge	42,1%	1,7	1,3	1,31
Maïs grain	71,2%	1,9	1,7	1,12
Colza	28,9%	2,5	1,8	1,39
Pois	26,1%	2,2	1,7	1,29
Tournesol	72,7%	1,9	1,7	1,12
Betterave	50,0%	5,1	4,2	1,21

b) Estimation des émissions induites de GES (en kgCO_2e/ha/an) dues à la consommation de produits phytosanitaires en fonction du mode de travail du sol dans l'essai de Boigneville (Labreuche et al., 2011).
NB : on considère que la valeur haute correspond à l'atténuation maximale donc à l'émission de GES moindre.

Culture	Labour	Travail superficiel (TS)	Semis direct (SD)	TS-labour	SD-labour
Maïs	7	15	27	-8	-20
Blé	2	2	2	0	0
rotation maïs blé	5	8	15	-3	-10
Valeurs retenues					
haute				0	0
basse				-8	-20
moyenne				**-4**	**-10**

4. Degré et mode de prise en compte des principaux postes d'émissions concernés par l'action dans le cadre de l'inventaire national 2010 et perspectives d'évolution

L'inventaire CITEPA considère le réservoir de carbone du sol, mais aucune variation n'est prise en compte hormis le changement d'usage des sols. L'effet des pratiques de travail du sol sur le C du sol n'est donc pas comptabilisé. Il ne l'est pas non plus pour les émissions de N_2O (CITEPA 2012). La réduction des émissions associées à la diminution de l'utilisation du carburant est toutefois prise en compte dans l'inventaire.

Dans l'éventualité où la France déciderait de prendre en compte la gestion des cultures et leur impact sur les stocks de C et les émissions de N_2O dans l'inventaire, la méthode de calcul par défaut de niveau 1 du GIEC (*Tier* 1) pourrait être utilisée (IPCC 2006, http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html).

Cette méthode tient compte de la variation des stocks de carbone. Le calcul est fait sur 30 cm de profondeur ; la variation de stock de C est estimée sur 20 ans de manière linéaire ; le stock de référence est donné pour la végétation native par grand type de climat et sol. Ce stock est ensuite multiplié par un facteur d'affectation des terres (0,8 pour sols cultivés en région tempérée) et un facteur gestion des terres (qui est égal, en zone tempérée à 1 en labour, à 1,02-1,08 en *reduced tillage* (par exemple en travail superficiel) et à 1,1-1,15 en semis direct). La moindre consommation de carburant et le surcroît de consommation de produits phytosanitaires (laquelle génère des émissions induites) peuvent être comptabilisés dans les émissions associées.

L'estimation par le *Tier* 1 présente plusieurs limites : (i) il n'est pas tenu compte de variations des émissions de N_2O, et pour le carbone : (ii) le choix d'une cinétique linéaire conduit à sous-estimer le stockage additionnel dans les premières années, (iii) les valeurs de référence sont plus élevées que celles de la littérature internationale pour le travail superficiel. Ainsi, si on prend l'exemple de sols de grande culture avec des stocks de C de 40-50 MgC/ha, l'estimation du *Tier* 1 sera en travail superficiel d'un stockage additionnel de 0,04-0,2 MgC/ha/an, *versus* 0 pour notre estimation, et en semis direct d'un stockage additionnel de 0,2-0,37 MgC/ha/an *versus* 0-0,30 MgC/ha/an pour notre estimation (Tableau 3).

Le GIEC prévoit aussi la possibilité de proposer des méthodes de calcul améliorées qui tiennent compte des conditions particulières des pays dans le niveau 2 (*Tier* 2). La méthode de calcul que nous présentons dans cette fiche, proposant des coefficients de stockage de C et des facteurs d'émissions de N_2O spécifiques aux conditions agronomiques et pédoclimatiques françaises, pourrait servir de base à une méthodologie de calcul des impacts du travail du sol sur les stocks de C et les émissions de N_2O dans un tel cadre.

5. Calcul du potentiel d'atténuation et du coût de l'action

5.a. Potentiel d'atténuation unitaire

- Inventaire des effets sur les émissions

Les effets directs sur les émissions de GES en non-labour pris en compte ici sont :
- une augmentation du stock de carbone dans le sol,

- une augmentation des émissions de N_2O,
- une diminution de la consommation de carburant.

Les effets induits en amont sont une utilisation accrue de produits phytosanitaires et moins de carburant et donc une consommation d'énergie fossile différente en amont de l'exploitation (pour leur fabrication et leur transport).

• Quantification de l'atténuation potentielle pour chaque effet

Nous présentons ici la synthèse pour trois options techniques : un semis direct continu, un semis direct avec labour un an sur cinq, et un travail superficiel continu. Les estimations sont faites sur une durée de 20 ans. Le potentiel d'atténuation unitaire est calculé par rapport à la pratique de référence qui est le labour continu. Le potentiel d'atténuation unitaire est estimé pour une valeur moyenne de stockage de C, d'émissions de N_2O et de consommation de carburant. Nous avons aussi estimé un potentiel d'atténuation unitaire minimal et maximal. Considérant que les trois volants d'action n'avaient pas de raison d'être couplés (les émissions de N_2O ne sont pas corrélées au stockage de C par exemple), nous avons alors estimé les valeurs minimales et maximales de potentiel d'atténuation unitaire, en identifiant les combinaisons de stockage de C, émissions de N_2O et consommation de carburant qui donnaient les valeurs extrêmes.

Les estimations présentées dans les tableaux suivants ou le texte sont exprimées en kg équivalent CO_2/ha/an, et non en Mg de C ou kg de N comme dans les paragraphes précédents. Nous avons pour cela utilisé le facteur de conversion suivant :

PRG (N_2O) = 298 PRG (CO_2) (PRG = pouvoir de réchauffement global = *global warming potential* = GWP)

Semis direct

Tableau 8. Atténuation unitaire potentielle en semis direct. Les résultats sont exprimés en kgCO_2e/ha/an. Pour les émissions de N_2O, nous n'avons ici considéré que les sols non hydromorphes. L'atténuation est exprimée par une valeur positive, une augmentation des émissions est indiquée par une valeur négative. La référence est le labour continu.

en kgCO_2e/ha/an	**CO_2**			**N_2O**			**CH_4**			Références sur lesquelles s'appuient les quantifications
Emissions directes	haute	basse	moyenne	haute	basse	moyenne	haute	basse	moyenne	
Carbone sol	1100	0	550							Tableau 3
Carburant	112	104	110							Tableau 6
N_2O				0	-140	-70				Tableau 6
CH_4							0	0	0	Mosier et al., 2005
Emissions induites	haute	basse	moyenne	haute	basse	moyenne	haute	basse	moyenne	
Carburant	24	22	23							Tableau 6
Pesticides	0	-20	-10							Tableau 7
Sous - totaux	**1236**	**106**	**673**	**0**	**-140**	**-70**	**0**	**0**	**0**	
Potentiel d'atténuation total	haut	bas	moyen							
	1236	**-34**	**603**							

Labour occasionnel tous les 5 ans

Tableau 9. Atténuation unitaire potentielle en labour occasionnel 1 an sur 5 et semis direct les autres années. Les résultats sont exprimés en kgCO_2e/ha/an. Pour les émissions de N_2O, la valeur est donnée pour des sols non hydromorphes. Le stockage additionnel de C dans le sol est 65% de la valeur en semis direct continu (cf. section 3.1). Les impacts sur les émissions de N_2O et la consommation de carburant et de produits phytosanitaires s'appliquent 4 ans sur 5.

en kg CO_2e /ha /an	**CO_2**			**N_2O**			**CH_4**			Références sur lesquelles s'appuient les quantifications
Emissions directes	haute	basse	moyenne	haute	basse	moyenne	haute	basse	moyenne	
Carbone sol	715	0	358							Tableau 3
Carburant	90	84	88							Tableau 6
N_2O				0	-112	-56				Tableau 5
CH_4							0	0	0	Mosier et al., 2005
Emissions induites	haute	basse	moyenne	haute	basse	moyenne	haute	basse	moyenne	
Carburant	19	18	18							Tableau 6
Pesticides	0	-16	-8							Tableau 7
Sous - totaux	**824**	**85**	**456**	**0**	**-112**	**-56**	**0**	**0**	**0**	
Potentiel d'atténuation total	haut	bas	moyen							
	824	**-27**	**400**							

Travail superficiel

Tableau 10. Atténuation unitaire potentielle en travail superficiel. Les résultats sont exprimés en kgCO_2e/ha/an. Pour les émissions de N_2O, les valeurs présentées correspondent à des sols non hydromorphes.

en kgCO_2e/ha/an	**CO_2**			**N_2O**			**CH_4**			Références sur lesquelles s'appuient les quantifications
Emissions directes	haute	basse	moyenne	haute	basse	moyenne	haute	basse	moyenne	
Carbone sol	0	0	0							Tableau 3
Carburant	104	46	75							Tableau 6
N_2O				0	-70	0				Tableau 5
CH_4							0	0	0	Mosier et al., 2005
Emissions induites	haute	basse	moyenne	haute	basse	moyenne	haute	basse	moyenne	
Carburant	22	10	16							Tableau 6
Pesticides	0	-8	-4							Tableau 7
Sous - totaux	**126**	**47**	**87**	**0**	**-70**	**0**	**0**	**0**	**0**	
Potentiel d'atténuation total	haut	bas	moyen							
	126	**-23**	**87**							

• Conclusion : potentiel d'atténuation unitaire

Les différents effets (stockage de C, émissions de N_2O, émissions de CH_4, économie de carburant) étant découplés, nous avons estimé les valeurs maximales et minimales mathématiques en sommant les postes CO_2, N_2O, et CH_4 des Tableaux 8 à 10. On remarquera que la contribution de la réduction d'utilisation des carburants à l'atténuation est très importante. Elle est ainsi de 10 à 30% de l'atténuation en semis direct et labour occasionnel (estimation moyenne) et atteint jusqu'à 100% de l'atténuation unitaire en travail superficiel (Tableaux 8 à 10).

Tableau 11. Potentiel d'atténuation total comparé pour les différentes options techniques. La référence est ici le labour en continu (émissions directes). (données issues des Tableaux 8 à 10)

Atténuation totale (kgCO_2e/ha/an)	abréviation	**haute**	**basse**	**moyenne**
Semis direct continu	SD	1234	-34	603
Labour occasionnel tous les 5 ans	LO1/5	823	-27	400
Travail superficiel	TS	126	-23	87

Pour ces trois options techniques, la source d'incertitude majeure est l'émission de N_2O. Des trois, c'est l'atténuation unitaire en semis direct continu que nous pensons estimer avec le moins d'incertitude car cette pratique est la mieux renseignée dans la littérature (Tableaux 3 et 5).

5.b. Ligne de base et conditions de développement de l'action

• Situation actuelle

Les TCSL ont connu un développement très important en France depuis 15 ans. Une analyse des enquêtes antérieures à 2005 (SCEES, OCI, Du Pont, ANPP-Columa, CETIOM, ITB) réalisée par Labreuche et al. (2007) a permis d'estimer que 34% des grandes cultures étaient cultivés en TCSL en 2004-2005. Ces estimations sont très proches de celles produites par l'enquête Agreste "Pratiques culturales" de 2006 (Tableau 12). (http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/enquetes/pratiques-culturales/ ; Chapelle Bary, 2008). Cependant, les enquêtes étant annuelles et réalisées par culture, il est difficile d'avoir une image pluriannuelle des pratiques.

Les TCSL apparaissent toutefois en forte croissance. Ainsi le taux de croissance estimé par Labreuche et al. (2007) est de +2% de la surface des cultures annuelles par an. La pratique la plus courante inclut des labours occasionnels, le semis direct en continu étant très limité (estimé à moins de 1% des surfaces de grandes cultures, soit 66 228 ha, Tableau 12, selon Labreuche et al., 2007). Entre ces labours, les pratiques dominantes seraient un travail superficiel ou un travail sans retournement (décompactage, par ex.) (Agreste 2010).

Les résultats de l'enquête "Pratiques culturales" 2006 permettent de calculer une fréquence moyenne de labour par culture et pour l'ensemble des cultures annuelles en TCSL (moyenne pondérée en tenant compte des surfaces). La moyenne en 2006 était de 1 labour tous les deux ans (Chapelle Bary, 2008 ; Tableau 12).

Tableau 12. Estimation des surfaces implantées sans labour en 2006 (source : Agreste, enquête "Pratiques culturales" 2006)
Les "autres TCSL" correspondent au travail superficiel du sol ou au travail profond sans retournement, l'enquête ne distinguant pas ces deux pratiques. L'intervalle entre deux labours peut donc correspondre à du semis direct (rare), ou à du travail superficiel ou travail profond sans retournement.

Cultures	**Surface totale** ha	**Semis direct** % surface	**Autres TCSL** % surface	**Pas de labour depuis 5 ans au moins** % surface	**Semis direct** ha	**Autres TCSL** ha	**Durée moyenne entre 2 labours en TCSL** an
Blé dur	427 840	3	55	15	12 750	235 997	2,3
Colza	1 421 189	0,4	46,9	16	5 543	666 111	2,3
Blé tendre	5 064 603	0,8	43,6	11	39 504	2 210 193	2,1
Orge	1 799 215	0,2	28	12	3 598	496 044	2,1
Tournesol	629 739	0,2	24,5	14	1 008	154 223	2,3
Maïs	1 757 096	0,2	15,8	7	3 866	277 445	2,2
Betterave	349 258	0	15	8	0	53 052	1,9
Pois protéagineux	98 535	0	13	4	0	12 376	1,7
Pomme de terre	157 157	0	8	ND	0	12 573	ND
Ensemble	**11 547 475**	**0,6**	**34**	**ND**	**66 268**	**4 105 441**	**ND**

Cultures, rotations. Le non-labour est essentiellement développé en cultures d'hiver (Chapelle Barry, 2008, Agreste 2006). Ainsi, 25% des céréales de printemps étaient implantées sans labour en 2004-2005, contre 41% des céréales d'hiver (Labreuche et al., 2007). En effet, une implantation sans labour représente une économie de temps particulièrement appréciable à l'automne quand les chantiers de récolte ne sont pas tous terminés.

Les TCSL sont peu fréquentes avec certaines monocultures, en raison des risques de transmission de maladies lorsque les résidus de culture restent en surface d'une année sur l'autre (Chapelle Barry, 2008, Agreste 2006). Ceci explique le faible pourcentage d'adoption du non-labour en maïs (Tableau 12). L'enquête "Pratiques culturales" 2006 indique que 46% des surfaces en maïs étaient conduites après un précédent maïs ; 46% du maïs en monoculture est donc un maximum. Les TCSL sont également peu développées pour certaines cultures, pour lesquelles ces techniques sont peu adaptées, comme la betterave ou la pomme de terre. Seront donc exclues de l'assiette pour le semis direct continu : 50% des surfaces de maïs, et 100% des surfaces de betterave et de pomme de terre.

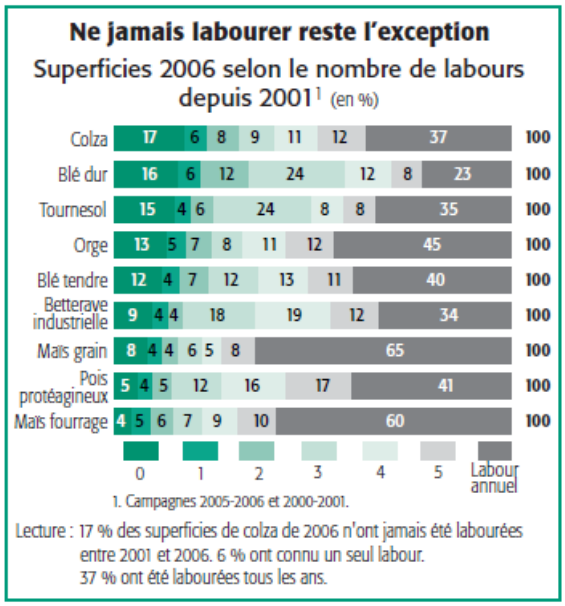
Exploitations agricoles. L'adoption du non-labour est plus importante pour les grandes exploitations : 58% des surfaces ne sont pas labourées dans les exploitations de plus de 400 ha, toutes cultures confondues (Tableau 13 ; Chapelle Barry, 2008, Agreste 2006).

Tableau 13. Effet de la taille de l'exploitation agricole sur le % des surfaces implantées sans labour (toutes cultures, année 2005-06 ; source : Agreste 2006)

Taille exploitation (ha)	**% de la superficie implantée sans labour**
< 50	20
50-100	26
100-200	36
200-300	43
300-400	50
> 400	58

Actualisation des surfaces en TCSL. Le taux moyen d'implantation de l'enquête "Pratiques culturales" 2006 indique 34% des surfaces en non-labour et moins de 1% en semis direct. Labreuche et al. (2007) ont montré la forte progression du non-labour depuis 1994, dont le taux d'accroissement apparaît assez constant pour les cultures renseignées. On peut estimer que chaque année 2% de la surface totale des cultures annuelles passe en non-labour (Labreuche et al., 2007). **Cela conduirait pour 2010 à 42% des surfaces de cultures annuelles en TCSL : 1% en semis direct, 41% en TCSL "autres" et donc par différence 58% en labour continu**. Les surfaces non labourées le sont en moyenne un an sur deux. Nous considèrerons donc en 2010 trois situations initiales : des surfaces labourées, des surfaces en travail superficiel avec labour un an sur deux et des surfaces en semis direct. La référence par rapport à laquelle nous estimerons l'atténuation induite par l'application des trois options techniques n'est donc pas le labour en continu, mais l'état 2010 décrit ci-dessus.

Figure 1. Superficies 2006 selon le nombre de labours depuis 2001 (Chapelle Barry 2008).



Source : Agreste - Enquête sur les pratiques culturales 2006

• Conditions nécessaires à la mise en place de l'action au niveau d'une exploitation (critères de détermination de l'AMT)

Conditions pédoclimatiques. La littérature internationale montre que certains sols sont peu aptes au non-labour : les sols mal drainés et faiblement structurés. On observe alors des rendements inférieurs en non-labour, dus à la compaction et à une mauvaise aération (Soane et al., 2012). Les sols sableux ou sablo-limoneux pauvres en matière organique sont ainsi peu favorables au non-labour, contrairement aux sols argilo-calcaires fortement agrégés (phénomène de "*self mulching*" ; Cannell, 1978).

Pour la France, cet aspect est peu renseigné dans les enquêtes. Selon la synthèse effectuée par Labreuche et al. (2007), pour les céréales à paille, les enquêtes ne montrent pas d'influence marquée du type de sol sur l'implantation de cultures en non-labour. Pour les oléagineux, le non-labour est surtout développé en sols argilo-calcaires superficiels. En l'absence de données suffisantes, nous développerons donc des scénarios d'adoption de TCSL indépendamment du type de sol, hormis le cas des **sols hydromorphes, qui seront exclus de l'assiette, car peu aptes et susceptibles d'émettre beaucoup de N_2O**. Ces surfaces ont été estimées par croisement entre modes d'occupation et classes d'hydromorphie. En termes d'occupation du sol, nous avons considéré les classes d'occupation de Corinne Land Cover 211 (Terres arables hors périmètres d'irrigation), 212 (Périmètres irrigués en permanence) et 242 (Systèmes culturaux et parcellaires complexes).

Nous proposons de développer le semis direct continu ou l'alternance labour - semis direct un an sur 5 sur les classes de régime hydrique de la Base de Données Géographique des Sols de France (BDGSF) 0 et 1, et de développer le travail superficiel sur les classes de régime hydrique 0, 1 et 2 [1].

Besoins en matériel. L'adoption de semis direct requiert l'achat d'un semoir adapté, ce qui peut représenter un frein matériel, qui s'ajoute aux freins culturels reconnus.

Conditions techniques et agronomiques. Si les tendances actuelles se confirment, le développement des TCSL apparaît plus aisé (i) en culture d'hiver, (ii) en rotation, (iii) dans les grandes exploitations.

• Assiette maximale technique (AMT) sur laquelle l'action pourrait être mise en place

Les informations disponibles ne font pas apparaître de variation différentielle des divers postes d'atténuation unitaire (stockage de C, émission de N_2O) selon le climat ou la culture. En conséquence, nous ne ferons pas ici de distinction selon les zones géographiques pour le territoire métropolitain, mais traiterons ce territoire de manière homogène.

---

[1] Les classes de la BDGSF sont : **0-** pas d'information; **1**- non saturé sur 80 cm de profondeur pendant plus de 3 mois et non saturé sur les 40 cm superficiels pendant plus de 1 mois ; **2**- saturé sur 80 cm de profondeur pendant 3 à 6 mois mais non saturé sur les 40 cm superficiels pendant au moins 1 mois ; **3**- saturé sur 80 cm de profondeur plus de 6 mois mais non saturé sur les 40 cm superficiels pendant au moins 11 mois ; **4**- saturé sur 40 cm de profondeur plus de 11 mois par an

Cultures concernées et surfaces. Sont concernées les grandes cultures. Selon les données RICA, leur surface représente en France métropolitaine 12 075 642 ha en 2010. Nous avons utilisé les surfaces agricoles 2010 (RICA) (Tableau 14a).

- *Option technique travail superficiel (TS) :* on considère la surface de toutes les grandes cultures ;
- *Option technique alternance labour semis direct 1 an sur 5 (LO1/5) :* on considère les surfaces des grandes cultures dont on exclura les cultures de betterave et pomme de terre, pour lesquelles la réduction du labour n'est à ce jour pratiquement pas adoptée, et moins encore le semis direct (cf. section 5.a) ;
- *Option technique semis direct continu (SD) :* on considère les surfaces des grandes cultures dont on exclura les cultures de betterave et pomme de terre, pour lesquelles la réduction du labour n'est à ce jour pratiquement pas adoptée, et moins encore le semis direct (cf. section 5.a), ainsi que 50% des surfaces de maïs (c'est-à-dire les surfaces en monoculture de maïs, cf. plus haut).

Contrainte pédologique. Le non-labour n'est pas recommandé en climat tempéré ou froid et humide, ni en sols hydromorphes. Nous avons alors considéré les différentes classes de régime hydrique des sols, telles que définies dans la base de données BDGSF.

- *Option technique travail superficiel (TS) :* elle sera appliquée sur les sols en culture annuelle de classes d'hydromorphie 0, 1 et 2 ;
- *Option technique alternance labour semis direct 1 an sur 5 (LO1/5) :* elle sera appliquée sur les sols en culture annuelle de classes d'hydromorphie 0 et 1 ;
- *Option technique semis direct continu (SD) :* elle sera appliquée sur les sols en culture annuelle de classes d'hydromorphie 0 et 1.

Les données issues de la base de données géographique des sols de France ont été croisées, par département, avec les classes Corinne Land Cover considérées, puis une proportion moyenne des classes d'hydromorphie sélectionnées calculée pour le territoire français métropolitain a été appliquée à la surface des cultures considérées (Christine Le Bas, INFOSOL, INRA). Ces estimations sont reportées dans le Tableau 14b.

Tableau 14. Estimation des surfaces de l'assiette maximale technique

a) Surface des cultures (données statistiques agricoles 2010)

Cultures	**Surfaces** (ha)
Céréales	9 233 109
Céréales (-50% du maïs)	8 433 909
Oléagineux	2 235 598
Protéagineux	397 109
Plantes à fibres (y compris semences)	62 812
Cultures industrielles diverses	13 111
Choux, racines et tubercules fourragers	11 187
Fourrages annuels	1 636 533
Cultures non alimentaires	622 251
Somme surface pour semis direct (SD et LO1/5)	*13 412 510*
Somme surfaces pour travail superficiel (TS)	*14 211 710*

b) Assiette maximale technique pour les différentes options techniques : cultures considérées et classes d'hydromorphie. Sources : données RICA 2010 (Tableau 14a) et INFOSOL INRA.

Option technique	**Cultures**		**Hydromorphie**		**Surfaces retenues pour l'assiette** (ha) (α x β) = assiette maximale technique
	Classes	Surfaces (ha) α	Classes d'hydromorphie	% de la surface terre arable β	
Semis direct	b	13 412 510	0+1	75	10 059 383
Labour un an sur cinq	b	13 412 510	0+1	75	10 059 383
Travail superficiel	a	14 211 710	0+1+2	97,3	13 827 994

a : toutes grandes cultures (céréales, oléagineux, protéagineux, plantes à fibres, cultures industrielles diverses, choux racines et tubercules fourragers, fourrages annuels, cultures non alimentaires) sauf pomme de terre et betterave
b : idem a, moins les surfaces de maïs deux ans de suite (50%).

• Scénario de diffusion

Un scénario est défini par :
- l'état final 2030 : option technique visée et surfaces concernées,
- l'état initial 2010 : pratiques actuelles et surfaces concernées,

- la cinétique d'adoption.

Etat final 2030

Compte tenu du développement important des techniques culturales simplifiées en France depuis une dizaine d'années (Labreuche et al., 2007), nous proposons de considérer des scénarios dans lesquels toute la surface correspondant à un potentiel biotechnique (assiette maximale technique) adopte l'option technique en une période de 20 ans. Cela revient à considérer par exemple que 100% des surfaces de l'assiette maximale technique, telles que définies au Tableau 14b, seront converties à l'option technique en 20 ans.

- **Scénario 1 (SD)** : semis direct continu appliqué sur toute l'assiette définie au Tableau 14b ;
- **Scénario 2 (LO1/5)** : semis direct, avec un labour occasionnel un an sur 5, appliqué sur toute l'assiette définie au tableau 14b, hormis les surfaces déjà en semis direct en 2010 qui le restent ;
- **Scénario 3 (TS)** : le travail superficiel est appliqué sur toute l'assiette définie au Tableau 14b, hormis les surfaces déjà en semis direct en 2010 qui le restent.

Etat initial 2010 ou ligne de base

En nous basant sur l'enquête "Pratiques culturales" 2006, l'état initial 2010 comprend trois types de situations : semis direct, labour annuel, et "autres TCSL". D'après les résultats des différentes enquêtes (Labreuche et al., 2007, 2011 ; Chapelle Barry, 2008 ; Figure 1), nous considèrerons que cet "autre TCSL" est un labour un an sur deux, en alternance avec un travail superficiel. Cet état sera désigné en abrégé L-TS½ (Tableau 15).

D'après l'enquête "Pratiques culturales" 2006, le semis direct en continu correspond à 0,6% des surfaces cultivées, soit environ 70 000 ha (Tableau 12). C'est cette valeur arrondie que nous considèrerons. La ligne de base est l'assiette maximale technique (Tableau 14b) à laquelle nous retirons les surfaces déjà en semis direct. Ensuite, pour connaître l'état initial, nous appliquons les pourcentages de 42% des surfaces de culture annuelle en TCSL telles que donnés par l'enquête "Pratiques culturales" 2006, et 58% en labour continu. Les résultats sont présentés au Tableau 15

Tableau 15. Ligne de base : surfaces présentes en 2010 (données issues du Tableau 14)

	Répartition des surfaces de cultures annuelles en 2010 selon modalité de travail du sol (%)	Assiette scénarios SD et LO1/5 (ha)	Assiette scénario TS (ha)
Surfaces de cultures annuelles retenues pour l'assiette	100	10 059 383	13 827 994
Surfaces en semis direct		70 000	70 000
Surfaces en labour en alternance un an sur deux avec du travail superficiel (L-TS½)	42	4 195 541	5 778 357
Surfaces en labour continu (L)	58	5 793 842	7 979 636

Pour chacun des scénarios, différentes transitions existent donc entre état initial 2010 et état final, qui sont résumées au Tableau 16. Nous avons estimé à la section 5.a l'atténuation unitaire pour les transitions du labour aux options techniques SD, LO1/5 et TS. La connaissance de l'atténuation unitaire pour un passage du labour à option technique L-TS½ s'avère également nécessaire. Elle est présentée en Annexe 2. Les calculs d'atténuation unitaire sont effectués comme présentés dans le Tableau 16. Lorsque l'état initial est un labour un an sur 2, on utilise les valeurs d'atténuation unitaires labour à L-TS½ estimées (Annexe 2) que l'on soustrait à l'évolution labour vers l'option technique visée.

Tableau 16. Scénario, transitions possibles et atténuations unitaires correspondantes.
Source des valeurs d'atténuation unitaire : Tableau 11 et Annexe 2.

Scénario	Etat initial 2010	Etat final 2030	Transition pour calcul atténuation unitaire	Atténuation unitaire ($MgCO_2e$/ha/an)		
				valeur haute	valeur basse	valeur moyenne
1- SD	SD	SD	SD à SD	0	0	0
	L	SD	L à SD	1 236	-34	603
	L-TS½	SD	L à SD – (L à L-TS½)	1 173	-23	559
2- LO1/5	SD	SD	SD à SD	0	0	0
	L	LO1/5	L à LO1/5	824	-27	400
	L-TS½	LO1/5	L à LO1/5 – (L à L-TS½)	761	-16	356
3- TS	SD	SD	SD à SD	0	0	0
	L	TS	L à TS	126	-23	87
	L-TS½	TS	L à TS – (L à L-TS½)	63	-12	43

Cinétique : taux d'adoption des pratiques

Nous avons considéré une cinétique d'adoption des options techniques sigmoïde, suivant l'équation :

$$\alpha(t) = \alpha 0 + (\alpha - \alpha 0).x.\left(1 - e^{\left(-\frac{(t-t0)}{\tau}\right)^{\frac{1}{\beta}}}\right)$$

avec les paramètres suivants :

Paramètres	Noms	Valeurs retenues
Année de départ :	t_0	2010
Fin de projection :	t	2030
Taux de diffusion initial :	α_0	0%
Taux de diffusion tangentiel :	α	100%
Nombre d'années pour atteindre l'inflexion :	τ	10
Pente au point d'inflexion :	β	3

Nous considérons le même taux d'adoption pour les trois scénarios, SD, LO1/5 ou TS, que les options techniques soient développées sur une situation initiale de labour continu ou de L-TS1/2. Les taux de stockage de C sont considérés constants sur 20 ans, conformément à la littérature. Les surfaces en semis direct en 2010 sont exclues des calculs, ce qui revient à considérer leur contribution invariable (en effet nous nous intéressons à l'atténuation par rapport à 2010). Nous faisons l'hypothèse que l'assiette maximale technique est atteinte en 20 ans (choix ci-dessus des paramètres et Figure 2).

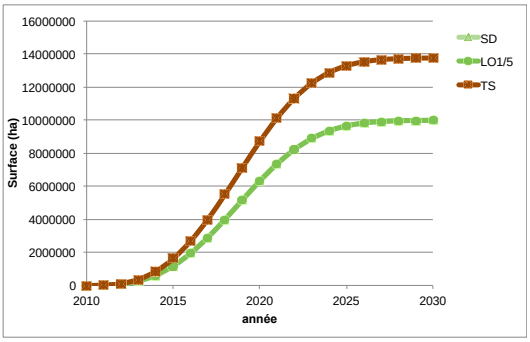


Figure 2. Cinétique d'adoption des scénarios considérés. Les cinétiques sont les mêmes quel que soit l'état initial et quelle que soit l'option technique visée ; seule change l'assiette atteinte.

5.1.c. Potentiel d 'atténuation à l'échelle du territoire français

Pour chaque année, on calcule l'atténuation totale :

Atténuation ($MgCO_2$/an) = atténuation unitaire de la transition considérée ($kgCO_2e$/ha/an) x surfaces concernées (ha) /10^3

Chaque scénario se développe à chaque pas de temps en utilisant les valeurs de potentiel d'atténuation unitaire impliquées dans le scénario, au prorata de leurs surfaces.

Nous avons calculé l'atténuation pour l'année 2030 seule et pour la surface de France (Tableau 17a), puis l'atténuation cumulée à mi-parcours (2020) et à échéance (2030), en additionnant les résultats de la formule ci- dessus pour chaque année considérée (Tableau 17b). Pour les trois scénarios, selon les hypothèses d'atténuation prises, hautes ou basses, l'adoption du scénario conduit à une atténuation des émissions de GES ou au contraire à une augmentation, la moyenne étant cependant toujours positive.

Tableau 17. Atténuation résultant des trois scénarios proposés, pour la France métropolitaine, y compris les émissions induites

a) Pour l'année 2030, en l'appliquant à l'assiette maximale technique

		Année 2030 ($MgCO_2e$)
Scénario 1 : Semis direct	atténuation haute atténuation basse atténuation moyenne	11 968 937 -289 627 5 781 790
Scénario 2 : Semis direct + labour un an sur cinq	atténuation haute atténuation basse atténuation moyenne	7 889 654 -218 259 3 774 032
Scénario 3 : Travail superficiel	atténuation haute atténuation basse atténuation moyenne	1 364 691 -250 159 936 578

b) En cumulant sur 10 ou 20 ans en appliquant le scénario de diffusion

	Cumul période	**2010-2020**	**2010-2030**
Scénario 1 : Semis direct	atténuation haute	26,9	138,5
	atténuation basse	-0,7	-3,35
	atténuation moyenne	13,0	66,9
Scénario 2 : Labour un an sur cinq	atténuation haute	17,8	91,3
	atténuation basse	-0,5	-2,5
	atténuation moyenne	8,5	43,7
Scénario 3 : Travail superficiel	atténuation haute	3,1	15,8
	atténuation basse	-0,6	-2,9
	atténuation moyenne	2,1	10,8

5.d. Coûts et bénéfices induits par l'action

• Inventaire des modifications induites par l'action au niveau de l'exploitation

Au niveau de l'exploitation, le passage de labour en semis direct, labour un an sur cinq et à un moindre degré travail superficiel se traduisent par un certain nombre de modifications (Labreuche et al., 2007, 2011 ; Soane et al., 2012) :

- Réduction des rendements,
- Réduction du temps de travail,
- Réduction de la consommation de carburant,
- Augmentation de la consommation de produits phytosanitaires.

• *L'évolution des rendements*

La plupart des études concluent à un effet très faible du non-labour sur le rendement.

Selon Labreuche et al. (2011), les essais de Boigneville entre 1978 et 2006 conduisent à estimer les rendements du blé à 8,33 t/ha en labour, 8,36 t/ha en travail superficiel et 8,30 t/ha en semis direct (les rendements étant respectivement de 7,01, 7,03 et 6 t/ha pour le maïs). Cependant, il s'agit des résultats d'essais expérimentaux optimisés.

L'exploitation des données de l'enquête sur les pratiques culturales de 2006 fait apparaître un léger tassement des rendements, de -5,2% en moyenne, lorsque le non-labour se prolonge (Tableau 18).

Une méta-analyse de données sur des données européennes conduit à une baisse moyenne des rendements de 7% (Soane et al. 2010). Une autre méta-analyse, menée en Argentine, conclut à des effets nuls si les parcelles sont fertilisées (en France la majorité des parcelles sont fertilisées) (Alvarez et al., 2009). On peut attendre une baisse des rendements variable selon les cultures, mais ces différentes estimations sont globalement très cohérentes.

Tableau 18. Rendement des cultures (quintaux par hectare) sans labour depuis au moins cinq ans et avec labour (Enquête "Pratiques culturales" 2006).

	Sans labour depuis 5 ans	**Avec labour**	**Variation**
Blé tendre	69	72	-4,2%
Orge	61	67	-9,0%
Maïs grain	86	92	-6,5%
Colza	29	30	-3,3%
Tournesol	22	23	-4,3%
Betterave	78	78	0,0%

• *L'évolution des consommations en carburant*

Comme présenté antérieurement, la simplification du travail et le semis direct se traduisent par des économies substantielles de carburant.

• *L'évolution de la consommation en herbicides*

Les études admettent généralement un accroissement des dépenses en herbicides avec le sans labour, compte tenu d'un développement plus important des adventices (Labreuche et al., 2007, 2011 ; Soane et al., 2012). Dans les essais de Boigneville, le recours aux produits phytosanitaires ne s'accroît pourtant pas avec le travail superficiel, ni avec le semis direct pour le blé (Labreuche, 2011). Selon l'enquête "Pratiques culturales" de 2006, le nombre de passages avec herbicides

augmente quand on passe du labour au non-labour (Chapelle Barry, 2008). A mesure que le non-labour s'accroît, le recours aux herbicides augmente aussi (cf. Tableau 7a).

• *L'évolution des charges en travail*

L'un des intérêts des TCSL est de réduire considérablement les charges en travail, et en particulier de réduire les temps de travaux à l'implantation par la suppression du labour, dans des périodes de fortes tensions.

Compte tenu du caractère familial des exploitations, il est toujours difficile de chiffrer ces économies de travail :

- Ces économies sont très variables selon les exploitations et dépendent notamment de leur taille ;
- La valorisation de ce travail dépend des opportunités d'utiliser le travail dans d'autres activités ou de la valeur accordée au loisir.

• *L'investissement initial*

En rythme de croisière, les charges de mécanisation sont, selon la Chambre d'agriculture de Bretagne (2008), identiques selon que les exploitations pratiquent ou pas le labour. Le semis direct comme le travail superficiel peuvent s'effectuer par ailleurs avec du matériel présent sur les exploitations. En semis direct continu (option technique SD), l'achat d'un semoir spécifique est souhaitable. Cet investissement peut être un obstacle au passage au semis direct.

• Estimation des coûts/bénéfices annuels par hectare pour l'agriculteur

Nous considèrerons ici aussi une fourchette de valeurs, dont le principe est présenté dans le Tableau 19. Les résultats des estimations sont reportés dans le Tableau 20 pour les différentes transitions comprises dans chaque scénario.

Tableau 19. Hypothèses de coûts

Scénario (Option technique)	Coûts élevés	Coûts bas	Coûts moyens
1 : Semis direct (SD)	Δ rendements = -5,2%	Δ rendements = 0%	Δ rendements = -2,6%
	Achat semoir	-	-
2 : Alternance 4 ans semis direct 1 an labour (LO1/5)	Δ rendements = -5,2% x 4/5	Δ rendements = 0%	Δ rendements = -2,6% x 4/5
	Achat semoir	-	-
3 : Travail superficiel (TS)	Δ rendements = -1%	Δ rendements = 0%	Δ rendements = -0,5%
	-	-	-

• *Rendements*

Nous considèrerons ici :

- une hypothèse de coût élevé qui considère une baisse de rendement ;
- une hypothèse de bas coût selon laquelle le rendement reste inchangé quelles que soient les pratiques de semis ;
- une hypothèse de coût moyen, généré par la moyenne des deux calculs précédents. La baisse de rendement est alors deux fois moins importante que dans la première hypothèse.

On a alors :

- en semis direct continu (SD) : une baisse de rendement de 5,2% dans l'hypothèse de coûts élevés, de 0% dans l'hypothèse de coûts bas, et de la moyenne entre les deux, soit 2,6%, dans l'hypothèse moyenne ;
- en semis direct en alternance avec du labour (LO1/5) : une baisse du rendement au *prorata* de la fréquence du semis direct ;
- en travail superficiel : l'hypothèse d'une variation de rendement de -1% dans l'hypothèse de coûts élevés, de 0% dans l'hypothèse de coûts bas, et de la moyenne entre les deux, soit -0,5% dans l'hypothèse moyenne.

Ces variations ont été appliquées à un produit initial de 1190 € par hectare, observés dans le RICA pour les cultures concernées (cf. Annexe 3).

• *L'évolution des dépenses en carburant.*

Le prix du carburant agricole en 2010 est donné par le RICA, 0,52 € par litre, chiffre qui correspond aux statistiques officielles dans lesquelles le prix des carburants agricoles varie de 0,43 à 0,58 au cours de l'année 2010. Ce prix tient compte en partie de la défiscalisation des carburants agricoles (cf. Annexe 4), mais il faut lui enlever 0,05 € par litre que les exploitations perçoivent en subvention directe (cf. Annexe 4). Le calcul ne prend pas en compte le montant de 0,0066 € par litre, taxe finalement payée par les agriculteurs, qui joue en manque à gagner pour l'Etat en cas de baisse de la consommation des carburants.

A partir des données d'Arvalis à Boigneville (Labreuche et al., 2011) et du prix des carburants, nous avons estimé les charges en carburant pour les différentes options techniques et scénarios (Annexe 1 ; Tableau 20).

• *Herbicides*

Nous avons repris les variations de consommation en carburant utilisées pour estimer les émissions de GES (Tableau 6).

Pour les cultures retenues dans le scénario 1, le coût des produits phytosanitaires est estimé, à partir du RICA, à 155 €/ha et compte tenu du poids des herbicides dans l'IFT, il peut être estimé à 58 €/ha pour ces herbicides. A partir du tableau en Annexe 3, un simple calcul donne 53 €/ha pour le labour et 73 €/ha pour le semis direct. Nous avons supposé que le travail superficiel du sol impliquait le même recours aux produits phytosanitaires que l'alternance labour - semis direct. Une étude d'Arvalis (Nicoletti, 2009) donne entre autres 20 € d'écart dans le recours aux herbicides entre le labour et le semis direct.

Tableau 20. Coût total de l'action selon les trois scénarios.
Le coût est estimé par hectare et par an, pour chaque transition comprise dans le scénario.

Hypothèse haute		Coût par hectare (Euros)					
Scénario 1	**Surfaces: ha**	**Produit**	**Carburant**	**Travail**	**Pesticides**	**Semoir**	**Total**
L -> SD	5793842	63	-19	-26	20	19	56
L-TS1/2 -> SD	4195541	57	-12	-22	13	19	55
SD-> SD	70000	0	0	0	0	0	0
Total	**9989383**	**60**	**-16**	**-24**	**17**	**19**	**56**
Scénario 2:							
L -> LO1/5	5793842	50	-15	-21	14	19	46
L-TS1/2 -> LO1/5	4195541	44	-9	-16	6	19	44
SD-> SD	70000	0	0	0	0	0	0
Total	**9989383**	**48**	**-12**	**-19**	**11**	**19**	**46**
Scénario 3							
L -> TS	7979636	12	-13	-9	14	0	4
L-TS1/2-> TS	5778357	6	-7	-5	7	0	2
SD-> SD	70000	0	0	0	0	0	0
Total	**13757994**	**10**	**-10**	**-7**	**11**	**0**	**3**

Hypothèse basse		Coût par hectare (Euros)					
Scénario 1	**Surfaces: ha**	**Produit**	**Carburant**	**Travail**	**Pesticides**	**Semoir**	**Total**
L -> SD	5793842	0	-19	-26	20	0	-25
L-TS1/2 -> SD	4195541	0	-12	-22	13	0	-21
SD-> SD	70000	0	0	0	0	0	0
Total	**9989383**	**0**	**-16**	**-24**	**17**	**0**	**-23**
Scénario 2:							
L -> LO1/5	5793842	0	-15	-21	14	0	-23
L-TS1/2 -> LO1/5	4195541	0	-9	-16	6	0	-19
SD-> SD	70000	0	0	0	0	0	0
Total	**9989383**	**0**	**-12**	**-19**	**11**	**0**	**-21**
Scénario 3							
L -> TS	7979636	0	-13	-9	14	0	-8
L-TS1/2-> TS	5778357	0	0	-5	7	0	3
SD-> SD	70000	0	0	0	0	0	0
Total	**13757994**	**0**	**-8**	**-7**	**11**	**0**	**-4**

Hypothèse Moyenne		Coût par hectare (Euros)					
Scénario 1	**Surfaces: ha**	**Produit**	**Carburant**	**Travail**	**Pesticides**	**Semoir**	**Total**
L -> SD	5793842	31	-19	-26	20	0	6
L-TS1/2 -> SD	4195541	28	-12	-22	13	0	7
SD-> SD	70000	0	0	0	0	0	0
Total	**9989383**	**30**	**-16**	**-24**	**17**	**0**	**7**
Scénario 2:							
L -> LO1/5	5793842	25	-15	-21	14	0	3
L-TS1/2 -> LO1/5	4195541	22	-9	-16	6	0	4
SD-> SD	70000	0	0	0	0	0	0
Total	**9989383**	**24**	**-12**	**-19**	**11**	**0**	**3**
Scénario 3							
L -> TS	7979636	6	-13	-9	14	0	-2
L-TS1/2-> TS	5778357	3	-3	-5	7	0	2
SD-> SD	70000	0	0	0	0	0	0
Total	**13757994**	**5**	**-9**	**-7**	**11**	**0**	**0**

• *Temps de travail*

L'estimation s'appuie sur les essais de Boigneville (Labreuche et al., 2011) pour une rotation blé-maïs, et pour des pratiques de labour, travail superficiel du sol et semis direct pour lesquelles les heures de travail vont de 2,4 à 3,9 heures/ha (Annexe 3). Elle est donc relativement optimiste dans la mesure où il s'agit d'essais expérimentaux, mais elle s'avère peu éloignée de données d'une étude de la Chambre d'Agriculture de Bretagne (2008). Les charges en travail pour le labour en alternance avec le travail superficiel et le labour un fois tous les cinq ans ont été estimées par règle de trois. De ces éléments, on tire les variations des charges par hectare en travail pour chaque scénario (Tableau 20). Ces variations de temps de travail ont été valorisées à 17 € de l'heure.

• *L'investissement initial*

Dans l'hypothèse de coût bas ou moyen, on considère qu'il n'y a pas d'investissement initial. En rythme de croisière, toutes les études ne montrent en effet aucune différence de la valeur du parc de matériel entre les exploitations en labour et les exploitations en semis direct (Chambre d'Agriculture de Bretagne, 2008 ; Nicoletti, 2009). On peut donc estimer que le passage au semis direct s'effectue dans la phase de renouvellement de matériel, donc sans investissement supplémentaire.

Dans l'hypothèse de coûts élevés, on suppose que le passage du labour au semis direct implique un investissement par l'achat d'un matériel spécifique. Le coût de cet investissement varie évidemment selon la taille de l'exploitation. Selon l'étude précitée, le prix d'un semoir spécifique varie entre 20 000 et 38 000 €. Si on suppose que ce semoir a une durée de vie de vingt ans, avec un taux d'actualisation de 4%, on peut calculer l'annuité constante par hectare (Annexe 3).

L'achat d'un matériel spécifique est assez lourd pour les petites exploitations. Mais le recours à une CUMA est toujours possible. Le problème est de déterminer, avec ce recours possible aux CUMA, le nombre de semoir par hectare. Pour prendre en compte en partie les coûts de transaction induits par le passage au non-labour, on a considéré l'hypothèse d'un semoir pour 150 hectares, ce qui conduit à une annuité constante par hectare de 18,6 €. En supposant que le labour alterné peut se faire sans matériel spécifique, cette hypothèse conduit aux variations de charges selon les trois scénarios présentées dans le Tableau 20.

• *Estimation du coût total de l'action*

Le coût total par hectare est calculé en sommant les différents postes, le coût moyen par scénario est calculé en pondérant les coûts unitaires par la proportion de la surface qui est concernée (Tableau 20). On constate que les coûts à l'hectare sont décroissants du scénario semis direct continu (7 €/ha) au scénario L01/5 (3 €/ha), puis au scénario travail superficiel pour lequel les coûts sont nuls ou faiblement négatifs (-0,2 €/ha, arrondi à 0 €/ha).

• Autres coûts (coûts de transaction privés, publics)

Si l'effet d'une réduction du labour est, dans certaines hypothèses, plutôt profitable aux agriculteurs, on peut s'interroger sur les raisons de sa non-adoption. Il existe sans doute des coûts inobservables qu'il est difficile de chiffrer. Nous avons introduit le coût du semoir pour prendre en compte une partie de ces coûts dans l'un des scénarios.

• Conclusions : coût unitaire de l'action, coût annuel pour l'AMT (ou le % atteint) en 2030 et coût cumulé sur la période 2010-2030

Estimation des coûts annuels à l'échelle nationale pour l'assiette maximale technique

Tableau 21. Coût annuel pour l'assiette maximale technique

		Surfaces (ha)	**Coût global** (millions d'euros)					
			Produit	Carburant	Travail	Pesticides	Semoir	**Total**
Hypothèse haute								
Scénario 1	SD	10 059 383	604	-163	-242	171	186	**555**
Scénario 2	LO1/5		478	-125	-190	106	186	**455**
Scénario 3	TS	13 827 994	132	-143	-101	156	0	**44**
Hypothèse basse								
Scénario 1	SD	10 059 383	0	-163	-242	171	0	**-234**
Scénario 2	LO1/5		0	-125	-190	106	0	**-209**
Scénario 3	TS	13 827 994	0	-105	-101	156	0	**-50**
Hypothèse moyenne								
Scénario 1	SD	10 059 383	302	-163	-242	171	0	**68**
Scénario 2	LO1/5		239	-125	-190	106	0	**30**
Scénario 3	TS	13 827 994	66	-124	-101	156	0	**-3**

Les coûts apparaissent donc négatifs pour le scénario 3 (Travail superficiel du sol). Pour estimer le coût cumulé sur 20 ans pour le scénario de diffusion choisi, nous avons appliqué le coût estimé par hectare pour chaque scénario (Tableau 20), aux surfaces soumises au scénario chaque année (cf. Figure 2), puis cumulé ce coût sur les 20 ans (Tableau 22).

Tableau 22. Coût cumulé de la mise en place des scénarios sur 20 ans (2010-2030) selon le scénario de diffusion choisi.

	Coût cumulé sur 20 ans (M€)
Scénario 1 SD	781
Scénario 2 LO 1/5	347
Scénario 3 TS	-32

5.e. Synthèse et discussion : récapitulatif de l'atténuation escomptée, du coût, et du coût de la tonne de CO_2e évité

En combinant les calculs d'atténuation et les estimations de coût, nous avons calculé le coût de la tonne de CO_2 évité ou émis, par an, selon les trois niveaux d'atténuation choisis et l'hypothèse de coût moyen, et ce pour les trois scénarios (Tableau 23). L'atténuation est positive lorsque le scénario limite les émissions de GES et le coût est positif lorsque le scénario induit un surcoût pour l'agriculteur. Les valeurs de coût par tonne de CO_2 sur fond rouge correspondent à des situations doublement défavorables : il n'y a pas atténuation et il y a un surcoût. Dans l'hypothèse des coûts bas, les trois scénarios conduisent, pour les hypothèses d'atténuation élevée et moyenne, à un coût négatif de la tonne de CO_2e évité. Pour l'hypothèse de coûts élevés, la tonne de CO_2e coûte de 31 à 126 €. Pour l'hypothèse de coûts moyens, la tonne de CO_2 évité coûte de 4 à 12 € ou "rapporte", -2 à -3 € (Tableau 23).

Tableau 23. Coût de la tonne de CO_2 évité ou émis, par an à l'assiette maximale technique (année 2030), selon les trois niveaux d'atténuation choisis et les trois hypothèses de coût, et ce pour les trois scénarios

		Atténuation élevée ($TgCO_2e$)	Atténuation basse ($TgCO_2e$)	**Atténuation moyenne** ($TgCO_2e$)
Scénario 1: semis direct		12,0	-0,3	5,8
coût élevé (M€)	555	46	-1 915	**96**
coût bas (M€)	-234	-20	808	**-41**
coût moyen (M€)	68	6	-233	**12**
Scénario 2: LO1/5		7,9	-0,2	3,8
coût élevé (M€)	455	58	-2 045	**121**
coût bas (M€)	-209	-26	938	**-55**
coût moyen (M€)	30	4	-135	**8**
Scénario 3: travail superficiel		1,4	-0,3	0,9
coût élevé (M€)	44	32	-177	**47**
coût bas (M€)	-50	-36	198	**-53**
coût moyen	-3	-2	11	**-3**

6. Synthèse : potentiel d'atténuation et coût annuels et cumulés pour l'ensemble de l'action

Nous avons analysé trois scénario, passage au semis direct continu (scénario 1, SD), passage au labour occasionnel un an sur 5 (scénario LO1/5), passage au travail superficiel sur une dizaine de centimètres de profondeur (scénario 3, TS). En termes de potentiel d'atténuation, les scénarios ont une efficacité décroissante (SD > LO1/5 > TS), malgré les incertitudes énormes. Les trois scénarios peuvent être développés sur une assiette très importante en termes de surfaces (10,1 à 13,8 millions d'hectares). Au plan agronomique (évolution des rendements, modifications des apports de produits phytosanitaires caractère approprié des sols), les inconvénients décroissent dans le même sens : SD > LO1/5 > TS. Enfin, au plan économique, les deux premiers scénarios ont un coût, alors que le scénario TS a un coût nul à négatif.

7. Discussion

7.a. Sensibilité des résultats

Ces résultats sont très sensibles aux hypothèses prises, à la fois en ce qui concerne les émissions et le coût des mesures.

Les **pratiques** sont renseignées de manières très inégales. Les pratiques les mieux renseignées au plan des émissions de GES sont le semis direct continu et le labour continu, et ce par des essais de longue durée de par le monde. Le labour occasionnel comme le travail superficiel sont beaucoup moins renseignés dans la littérature, pour deux raisons :

- Moins d'essais de longue durée leur sont consacrés (pas d'essais avec des labours occasionnels répétés par exemple) ;
- Les pratiques sont souvent mal décrites. Le terme de "*reduced tillage*" recouvre en effet des choix d'outils (pas de retournement), mais aussi une profondeur réduite de travail ou bien un travail sur une faible proportion de la surface (*ridge tillage*).

L'enquête "Pratiques culturales" 2006 montre que l'alternance labour - travail superficiel est devenue fréquente en grandes cultures, avec de grandes variations portant sur la profondeur du travail comme sur la fréquence du labour. Ceci nous a conduits à choisir pour 2010 une ligne de base qui est une alternance travail superficiel - labour un an sur deux. Ce choix nous est apparu plus réaliste, bien que le vocabulaire employé soit lui-même peu fiable dans les enquêtes. En effet, le choix d'une ligne de base "labour continu" aurait exacerbé les effets des pratiques de simplification de travail du sol testées par rapport à la réalité. Par contre, ce choix n'est pas sans conséquence, puisque la ligne de base comprend des pratiques mal renseignées. Si nous savons que l'alternance travail superficiel - labour un an sur deux se situe nécessairement entre les options techniques labour continu et semis direct continu, nous avons donc une incertitude importante sur ses émissions.

En tout état de cause, il apparaît nécessaire à l'avenir : (i) d'affiner la description des pratiques de travail du sol au-delà de vocables tels que "non-labour" ou "travail simplifié" ; (ii) d'acquérir des données sur des situations correspondant aux pratiques réelles des agriculteurs, par la conception d'essais *ad-hoc*, l'appui sur des réseaux de parcelles bien renseignées ou encore la modélisation.

Pour **les différentes émissions**, la plus grande part de variabilité entre les fourchettes hautes et basses dans notre travail provient de l'estimation du stockage de C (la différence entre valeurs hautes et basses atteint 1100 $kgCO_2e/ha/an$, suivi des postes économie de carburant (fourchette de 219 $kgCO_2e/ha/an$) et émissions de N_2O (fourchette de 140 $kgCO_2e/ha/an$) (voir Annexe 4).

Cependant, les émissions de N_2O ont potentiellement un poids bien plus important que le carbone sur l'atténuation des émissions, en raison du pouvoir réchauffant plus élevé du N_2O. Ces émissions sont très variables dans l'espace et le temps, bien que la réalisation de mesures en continu sur une année permette maintenant d'en améliorer l'estimation. Ainsi, des émissions de 2,3 $kgN\text{-}N_2O/ha/an$ suffiraient à annuler le bénéfice d'un fort stockage de C. En effet, étant donné le fort pouvoir de réchauffement global du N_2O, 2,3 $kgN\text{-}N_2O/ha/an$ correspondent à une émission de 1100 $kgCO_2e/ha/an$; or la moyenne estimée dans la littérature pour des sols hydromorphes est de 2 $kgN\text{-}N_2O/ha/an$ (Rochette, 2008). Cela justifie notre choix de ne pas recommander, en termes d'émissions de GES, le développement du semis direct sur des sols hydromorphes.

De manière générale, il nous est apparu que la variable "**type de sol**" était insuffisamment renseignée pour pouvoir en tenir compte, alors que l'analyse des processus en jeu dans les émissions montre, *a priori*, son importance. Les synthèses récentes montrent la difficulté à relier stockage de C ou émissions de N_2O aux caractéristiques des sols (hormis l'hydromorphie pour ces dernières). Par ailleurs, les enquêtes type enquête "Pratiques culturales" ne renseignent pas ces variables.

Pour ce qui est de **l'évaluation économique**, on constate la très grande variabilité des résultats obtenus selon que l'on prend des estimations pessimistes ou optimistes des coûts (Tableau 23). La plus grande source de variabilité paraît ici venir des variations de rendement des cultures en fonction des pratiques de travail du sol. Ainsi dans la littérature, les baisses moyennes de rendement observées en simplification du travail du sol vont de 0 à 7%. Sachant qu'une baisse de rendement de 1% correspond approximativement à 11 € par hectare, soit un montant supérieur à l'estimation moyenne du coût retenue dans l'étude pour un passage au semis direct continu, on perçoit l'extrême sensibilité des estimations aux hypothèses sur le rendement.

Enfin, la hiérarchie des coûts des modes de travail du sol tient aussi beaucoup au prix des carburants, lui-même déterminé par les mesures actuelles de défiscalisation (cf. Annexe 4). Si on chiffre le prix des carburants avec refiscalisation, le coût de la tonne de carbone devient négatif dans les trois scénarios. Cette fiscalisation diminuerait les marges des agriculteurs mais elle pourrait être compensée par une aide par hectare uniforme. Ces deux mesures prises conjointement (fiscalisation des

carburants et aide uniforme par hectare) seraient très incitatives pour promouvoir le développement des modes de travail du sol économes en énergie.

7.b. Les conditions d'une prise en compte de l'action dans l'inventaire national

• Comptabilisation de l'effet

L'inventaire CITEPA réalisé sur la base GIEC 1996 ne comptabilise pas les stockages additionnels de carbone liés aux modalités de travail du sol. La méthode *tier* 1 des lignes directrices GIEC de 2006 permet de tenir compte des effets sur les stocks de C du sol, mais présente des limites (cinétique linéaire, valeurs de référence plus élevées que celles de la littérature internationale pour le travail superficiel) ; et elle n'intègre pas les émissions de N_2O. La méthode de calcul présentée dans cette fiche, proposant des coefficients de stockage de C et des facteurs d'émissions de N_2O spécifiques aux conditions agronomiques et pédoclimatiques françaises pourrait servir de base à une méthodologie de calcul "expert" des impacts du travail du sol sur les émissions de GES.

• Vérifiabilité de la mise en œuvre

L'expertise collective INRA 2002 avait souligné les difficultés de vérification de stockages additionnels de C en général (variabilité du phénomène…), et de ceux associés à des modifications des pratiques culturales en particulier (difficiles à prouver et vérifier). Bien que difficile, la vérification de l'adoption du non-labour est envisageable.

7.c. Les contextes et mesures susceptibles de favoriser le déploiement de l'action

Si l'effet d'une réduction du labour est, dans certaines hypothèses, plutôt profitable aux agriculteurs, on peut s'interroger sur les raisons de sa non-adoption. La difficulté à contrôler les adventices pourrait en être une des explications. Il existe aussi sans doute des coûts inobservables qu'il est difficile de chiffrer - le coût du semoir a été introduit pour prendre en compte une partie de ces coûts dans l'un des scénarios.

Une mesure incitative simple serait la suppression de la défiscalisation du gazole agricole et son remplacement par une aide uniforme par hectare. Si on chiffre les coûts au prix du carburant fiscalisé, ces coûts deviennent négatifs dans les trois options, mais les agriculteurs subissent une baisse de recette, de 40 € par hectare en labour et de 23 € en semis direct. Une subvention compensatrice uniforme à l'hectare, de l'ordre de 30 €, favoriserait les modes de travail du sol économes en énergie.

Le non-labour est déjà adopté spontanément par les agriculteurs (sur 21% des surfaces de cultures annuelles en 2001, 34% en 2006), pour les économies de carburant et de temps de travail qu'il permet : il s'agit d'un passage à du travail superficiel, avec souvent un recours périodique au labour, dont l'adoption est proportionnelle à la taille de l'exploitation. Le semis direct (privilégié dans cette action) n'est en revanche que marginalement adopté (1% des surfaces de culture annuelle en 2006).

Le non-labour est promu comme moyen de prévention de l'érosion (agriculture "de conservation"), avec des effets favorables sur la faune du sol. Il jouit donc d'une image "verte" même si son adoption obéit à des motivations très diverses et qu'il peut nécessiter une augmentation de la quantité d'herbicides utilisée.

7.d. Comparaison avec d'autres études

Nous ne connaissons pas d'estimation similaire sur le potentiel d'atténuation des émissions de GES à l'échelle du territoire français. L'expertise collective menée par l'INRA en 2002 (Arrouays et al., 2002) ne concernait que le carbone. Nous avons comparé nos résultats aux leurs en ce qui concerne le carbone. L'application des scénarios SD et L01/5 conduit dans notre étude à un stockage additionnel de carbone dans les sols moyen de 17 et 11 TgC, respectivement, sur la période 2010-30. Arrouays et al. (2002) ont estimé que l'adoption progressive du semis direct et du labour un an sur quatre sur 50% de la SAU, soit 9,5 Mha (valeur proche de nos 10 Mha d'assiette maximale technique), conduisait en 20 ans à un stockage additionnel de 20 et 12 TgC respectivement. Nos estimations sont donc plus faibles, bien que du même ordre de grandeur. En effet, les travaux récents de la littérature nous ont conduits à revoir à la baisse le potentiel de stockage additionnel de C en semis direct.

Une évaluation du potentiel d'atténuation des émissions de GES par la mise en œuvre de techniques simplifiées de travail du sol a été menée à l'échelle internationale (Smith et al., 2008), ou pour certains pays (Angleterre : Moran et al., 2008 ; Irlande : Teagasc, 2012). Les résultats en sont donnés dans le Tableau 24. On constate que nos estimations sont bien

supérieures à celles de Moran et al. (2008) (qui considéraient toutes les pratiques de simplification de travail du sol), mais très proches de celles de Smith et al. (2008) ou celles établies pour l'Irlande. Cependant pour ces deux études, l'estimation du potentiel de stockage de C est nettement supérieure à la nôtre, et leur estimation des émissions de N_2O est par contre moindre.

Tableau 24. Résultats d'études analogues et de synthèses bibliographiques récentes (cf. aussi Tableau 2)

Référence	notre étude, semis direct			Moran et al., 2008	Teagasc, 2012	Smith et al., 2008		
Zone géographique	France			Angleterre	Irlande	climats humides et froids		
$MgCO_2e$/ha/an	haut	bas	**moyen**	**moyen**	**moyen**	haut	bas	**moyen**
	1,24	-0,03	**0,60**	**0,15**	**0,67**	1,12	-0,04	0,53

7.e. Interactions avec les autres actions

Des interactions peuvent être envisagées avec d'autres actions considérées dans cette étude :

- Cultures intermédiaires : celles-ci sont souvent détruites par labour, mais on peut les détruire également à l'aide d'herbicides, ou bien les broyer. L'implantation de cultures intermédiaires et la simplification du travail du sol sont donc compatibles, en ajustant la méthode de destruction de ces couverts.
- Le développement de bandes enherbées diminuera potentiellement (mais marginalement) l'assiette maximale technique du non-labour, cependant ces actions sont compatibles.
- Agroforesterie et haies : de manière similaire, les surfaces en haies et en rangées d'arbres doivent être retirées de l'assiette maximale technique du non-labour, ces actions étant compatibles.
- Légumineuses : les cultures en pois étant préférentiellement conduites en labour, l'introduction de légumineuses dans la rotation peut conduire à éviter, sur les surfaces concernées, le scénario 1 (semis direct continu) au profit d'un semis direct discontinu ou d'un travail superficiel.
- Le développement du non-labour pourrait affecter la taille du parc de tracteurs et donc avoir un impact sur l'assiette maximale technique de l'action économie d'énergie *via* le réglage de tracteurs et l'écoconduite.

7.f. Autres effets attendus de l'action, synergies/antagonismes avec l'adaptation au changement climatique et avec d'autres objectifs de politique publique

Cette étude est centrée sur les émissions de gaz à effet de serre. Cependant, les techniques culturales sans labour (TCSL) affectent fortement certaines propriétés du sol et ont des impacts environnementaux divers, qui ont fait l'objet de nombreux travaux et nombreuses synthèses. On renverra en particulier à l'expertise réalisée par l'ADEME en 2007 (Labreuche et al., 2007).

Les principales conséquences des TCSL, et tout particulièrement de l'adoption du semis direct, sur les sols sont :

- une modification de la répartition spatiale des matières organiques et leur stratification selon la profondeur ;
- une augmentation de la diversité des organismes vivants et de l'abondance de certains groupes (en particulier vers de terre, limaces, carabes, etc.) (Kladivko, 2001 ; van Capelle et al., 2012) ;
- une acidification du sol en surface (Soane et al., 2012) ;
- une modification de la structure du sol avec diminution de la porosité (tassement) et une augmentation de la résistance à la pénétration, mais avec une augmentation de la porosité correspondant à des pores verticaux permettant l'infiltration de l'eau (Soane et al., 2012) ;
- une augmentation de l'agrégation et de la stabilité structurale dans les couches de surface du sol (Labreuche et al., 2007 ; Soane et al., 2012), ayant pour conséquence une diminution de la battance et de l'érosion.

Le non-labour a également des effets environnementaux :

- une réduction du ruissellement et de l'érosion (par ex. Bonafos et al., 2007) ;
- une modification des voies de transfert du phosphore (moins de lixiviation, plus de ruissellement), mais des pertes équivalentes ;
- une modification de la dynamique des produits phytosanitaires (plus de rétention mais aussi de biodégradation, moins de lixiviation ; Labreuche et al., 2007), alors que l'usage des herbicides est généralement plus important en TCSL. Ce changement de pratiques peut avoir des impacts négatifs importants sur la qualité de l'eau.

D'un point de vue social, le semis direct s'inscrit dans un développement de techniques culturales sans labour dont les effets ne sont pas neutres sur la structure des productions. En libérant du travail, il peut favoriser la course aux hectares et jouer donc dans le sens de la concentration des exploitations. Or cette évolution, si elle est mal maîtrisée, peut être contraire à des objectifs de politiques publiques sur l'aménagement du territoire. En revanche, la baisse des charges de mécanisation permettrait d'améliorer la compétitivité de la production céréalière.

8. Conclusions

Les techniques culturales sans labour ont un potentiel d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre qui est avéré et confirmé par cette analyse. Les deux principaux volets d'atténuation sont le stockage de C dans le sol et l'économie de carburants. Par contre, les émissions potentielles de N_2O peuvent fortement réduire ce potentiel. Les estimations de potentiel d'atténuation sont entachées d'une incertitude très importante, et recouvrent aussi des situations où la mise en place de techniques culturales simplifiées augmente les émissions de GES, *via* les émissions de N_2O.

Les fortes incertitudes associées aux estimations présentées ici pointent de forts besoins de connaissances :

- sur la variabilité des émissions et du stockage de carbone, en particulier en fonction du type de sol ;
- sur la maîtrise possible des émissions de N_2O ;
- sur des pratiques à mieux renseigner : pratiques de labour occasionnel et de travail superficiel comme mentionné antérieurement, mais aussi combinaisons de pratiques au sein de systèmes de culture. Ainsi, la simplification du travail du sol peut s'accompagner et s'accompagne souvent de modifications du système de culture (choix de la rotation, changements du calendrier de semis, utilisation de plantes de couverture). L'interaction entre simplification du travail du sol et implantation de cultures intermédiaires ou plantes de couverture apparaît particulièrement intéressante à approfondir du point de vue des émissions de GES.

Références bibliographiques citées

Nous avons privilégié, lorsqu'elles existaient, des synthèses et méta-analyses de données.

Abdalla, M., Jones, M., Ambus, P., Williams, M., 2010. Emissions of nitrous oxide from Irish arable soils: effects of tillage and reduced N input. Nutrient Cycling in Agroecosystems 86, 53-65.

Agreste, 2010. Enquête pratiques culturales. Les Dossiers n°8.

Alvarez, C., Costantini, A., Alvarez, C.R., Alves, B.J.R., Jantalia, C.P., Martellotto, E.E., Urquiaga, S., 2012. Soil nitrous oxide emissions under different management practices in the semiarid region of the Argentinian Pampas. Nutrient Cycling in Agroecosystems 94, 209-220.

Angers, D.A., Bolinder, M.A., Carter, M.R., Gregorich, E.G., Drury, C.F., Liang, B.C., Voroney, R.P., Simard, R.R., Donald, R.G., Beyaert, R.P., Martel, J., 1997. Impact of tillage practices on organic carbon and nitrogen storage in cool, humid soils of eastern Canada. Soil and Tillage Research 41, 191-201.

Angers, D.A., Eriksen-Hamel, N.S., 2008. Full-inversion tillage and organic carbon distribution in soil profiles: a meta-analysis. Soil Science Society of America Journal 72, 1370-1374.

Arrouays, D.; Balesdent, J.; Germon, J.C.; Jayet, P.A.; Soussana, J.F.; Stengel, P., 2002. Contribution à la lutte contre l'effet de serre, Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Rapport d'expertise scientifique collective. Paris: INRA, 334 p. http://www5.paris.inra.fr/depe/content/download/3187/32268/version/2/file/rapport_carbone_inra.pdf

Arvidsson, J., 2010. Energy use efficiency in different tillage systems for winter wheat on a clay and silt loam in Sweden. Eur. J. Agron. 33,, 250–256.

Balabane, M., Bureau, F., Decaens , T., Akpa, M., Hedde, M., Laval, K., Puget, P., Pawlak, B., Barray, S., Cluzeau, D., Labreuche, J., Bodet, J.M., Le Bissonnais, Y., Saulas, P., Bertrand, M., Guichard, L., Picard, D., Houot, S., Arrouays, D., Brygoo, Y., Chenu, C., 2005. Restauration de fonctions et propriétés des sols de grande culture intensive. Effets de systèmes de culture alternatifs sur les matières organiques et la structure des sols limoneux et approche du rôle fonctionnel de la diversité biologique des sols (Dmostra), Rapport final de contrat MEDD 01105. Gestion durable des Sols. INRA, p. 119.

Balesdent, J., Chenu, C., Balabane, M., 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. Soil & Tillage Research 53, 215-230.

Ball, B.C., 2013. Soil structure and greenhouse gas emissions: a synthesis of 20 years of experimentation. European Journal of Soil Science in press, doi: 10.1111/ejss.12013.

Ball, B.C., Scott, A., Parker, J.P., 1999. Field N(2)O, CO(2) and CH(4) fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland. Soil & Tillage Research 53, 29-39.

Beheydt, D., Boeckx, P., Ahmed, H.P., Van Cleemput, O., 2008. N(2)O emission from conventional and minimum-tilled soils. Biology and Fertility of Soils 44, 863-873.

Blanchart, E., Bernoux, M., Sarda, X., Siqueira Neto, M., Cerri, C.C., Piccolo, M., Douzet, J.M., Scopel, E., Feller, C., 2007. Effect of direct seeding Mulch-based systems on soil carbon storage and macrofauna in Central Brazil. Agriculturae Conspectus Scientificus (Poljoprivredna Znanstvena Smotra) 72, 81-87.

Bonafos A, Le Bissonais Y. Ouvry JF, 2007. Impact des TCSL sur le ruissellement et l'érosion. In : Labreuche J, et al, eds. Évaluation des impacts environnementaux des techniques culturales sans labour (TCSL) en France. Rapport final du contrat ADEME 04 75C 0014. Angers : Ademe éditions.

Chambres d'Agriculture de Bretagne, 2008. Techniques culturales sans labour en Bretagne. Guide pratique, 43 p.

Chapelle-Barry, C., 2008. Dans le sillon du non-labour. Agreste Primeur 207, 1-4.

Conant, R.T., Easter, M., Paustian, K., Swan, A., Williams, S., 2007. Impacts of periodic tillage on soil C stocks: A synthesis. Soil and Tillage Research 95, 1-10.

Constantin J., Mary B., Laurent F., Aubrion G., Fontaine A., Kerveillant P., Beaudoin N. (2010) Effects of catch crops, no till and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching and balance in three long-term experiments. Agriculture, Ecosystems and Environment, 135: 268-278.

Constantin, J., Mary, B., Laurent, F., Aubrion, G., Fontaine, A., Kerveillant, P., Beaudoin, N., 2010. Effects of catch crops, no till and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching and balance in three long-term experiments. Agriculture Ecosystems & Environment 135, 268-278.

Corbeels, M., Scopel, E., Cardoso, A., Bernoux, M., Douzet, J.M., Siqueira Neto, M., 2006. Soil carbon storage potential of direct seeding mulch-based cropping systems in the Cerrados of Brazil. Global Change Biology 12, 1773-1787.

de Rouw, A., Huon, S., Soulileuth, B., Jouquet, P., Pierret, A., Ribolzi, O., Valentin, C., Bourdon, A., Chantharath, B., 2010. Possibilities of carbon and nitrogen sequestration under conventional tillage and no-till cover crop farming (Mekong valley, Laos). Agriculture, Ecosystems and Environment 136, 148–161.

Dimassi, B., Cohan, J.P., Labreuche, J., Mary, B., 2013. Changes in soil carbon and nitrogen following tillage conversion in a long-term experiment in Northern France. Agriculture, Ecosystems and Environment 169, 12–20.

Eagle, A.J.; Olander, L.P.; Henry, L.R.; Haugen-Kozyra, K.; Millar, N.; Robertson, G.P., 2012. Greenhouse Gas Mitigation Potential of Agricultural Land Management in the United States - A Synthesis of the Literature. Durham (USA): Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions, (Report NI R 10-04), 76 p. http://nicholasinstitute.duke.edu/ecosystem/land/TAGGDLitRev/at_download/paper

Gonzalez-Sanchez, E.J., Ordonez-Fernandez, R., Carbonell-Bojollo, R., Veroz-Gonzalez, O., Gil-Ribes, J.A., 2012. Meta-analysis on atmospheric carbon capture in Spain through the use of conservation agriculture. Soil & Tillage Research 122, 52-60.

Hermle, S., Anken, T., Leifeld, J., Weisskopf, P., 2008. The effect of the tillage system on soil organic carbon content under moist, cold-temperate conditions. Soil & Tillage Research 98, 94–105.

Hernanz, J.L., Sanchez-Giron, V., Navarrete, L., 2009. Soil carbon sequestration and stratification in a cereal/leguminous crop rotation with three tillage systems in semiarid conditions. Agriculture Ecosystems & Environment 133, 114-122.

Kladivko, 2001. Tillage systems and soil ecology. Soil & Tillage Research, 61, 61-76.

Koch, H.J., Stockfisch, N., 2006. Loss of soil organic matter upon ploughing under a loess soil after several years of conservation tillage. Soil & Tillage Research 86, 73–83.

Labreuche J., Le Souder C., Castillon P., Ouvry J.F., Real B., Germon J.C., de Tourdonnet S., 2007. Evaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturales Sans Labour (TCSL) en France. Rapport de contrat ADEME, 400p. http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=51256&p1=02&p2=11&ref=17597

Labreuche, J., Lellahi, A., Malaval, C., Germon, J.-C., 2011. Impact des techniques culturales sans labour (TCSL) sur le bilan énergétique et le bilan des gaz à effet de serre des systèmes de culture. Cahiers Agricultures 20, 204-215.

Lopez-Fando, C., Pardo, M.T., 2011. Soil carbon storage and stratification under different tillage systems in a semi-arid region. Soil & Tillage Research 111, 224-230.

Luo, Z.K., Wang, E.L., Sun, O.J., 2010. Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments. Agriculture Ecosystems & Environment 139, 224-231.

Maltas, A., Corbeels, M., Scopel, E., Oliver, R., Douzet, J.-M., Macena da Silva, F.A., Wery, J., 2007. Long-term effects of continuous direct seeding mulch-based cropping systems on soil nitrogen supply in the Cerrado region of Brazil. Plant and Soil 298, 161-173.

Metay, A., Mary, B., Arrouays, D., Labreuche, J., Martin, M., Nicolardot, B., Germon, J.C., 2009. Effects of reduced or no tillage practices on C sequestration in soils in temperate regions. Canadian Journal of Soil Science 89, 623-634.

Moran, D., MacLeod, M., Wall, E., Eory, V., Pajot, G., Matthews, R., McVittie, A., Barnes, A., Rees, B., Moxey, A., Williams, A., and Smith, P.: UK Marginal Abatement Cost Curves for the Agriculture and Land Use, Land-Use Change and Forestry Sectors out to 2022, with Qualitative Analysis of Options to 2050. Final Report to the Committee on Climate Change, SAC Commercial Ltd, 152, 2008.

Morris, N.L., Miller, P.C.H., Froud-Williams, R.J., 2010. The adoption of non-inversion tillage systems in the United Kingdom and the agronomic impact on soil, crops and the environment—A review. Soil and Tillage Research 108, 1–15.

Mosier, A.R., Halvorson, A.D., Peterson, G.A., Robertson, G.P. and Sherrod, L., 2005. Measurement of net global warming potential in three agroecosystems. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 72, 67-76.

Mutegi, J.K., Munkholm, L.J., Petersen, B.M., Hansen, E.M., Petersen, S.O., 2010. Nitrous oxide emissions and controls as influenced by tillage and crop residue management strategy. Soil Biology & Biochemistry 42, 1701-1711.

Nicoletti, J.P., 2009. Intérêt économique des techniques culturales sans labour. Quel travail du sol aujourd'hui : travailler autrement pour produire mieux ? Salon international de l'agriculture Paris – 26 février 2009

Oorts, K., Bossuyt, H., Labreuche, J., Merckx, R. and Nicolardot, B., 2007. Carbon and nitrogen stocks in relation to organic matter fractions, aggregation and pore size distribution in no-tillage and conventional tillage in northern France. European Journal of Soil Science, 58, 248-259.

Powlson, D.S. et al., 2012. The potential to increase soil carbon stocks through reduced tillage or organic material additions in England and Wales: A case study. Agriculture Ecosystems & Environment, 146, 23-33.

Quincke, J.A., Wortmann, C.S., Mamo, M., Franti, T., Drijber, R.A., 2007. Occasional tillage of no-till systems: carbon dioxide flux and changes in total and labile soil organic carbon. Agronomy Journal 9, 1158–1168.

Regina, K., Alakukku, L., 2010. Greenhouse gas fluxes in varying soils types under conventional and no-tillage practices. Soil & Tillage Research 109, 144-152.

Rochette, P. 2008. No-till only increases N2O emissions in poorly-aerated soils. Soil and Tillage Research, 101 (1-2), pp. 97-100.

Roussel, M., Mary, B., Gréhan, E., Cohan, J.P., Léonard, J., 2012. Long-term effects of no-till and catch crops on N2O emissions during a three year rotation. Agric. Forest Meteorol., submitted.

Sanderman, J., Farquharson, R. and Baldock, J. 2010. Soil Carbon Sequestration Potential: A review for Australian agriculture. National Research Flagship Reports. 81p. http://www.csiro.au/Portals/Publications/Research--Reports/Soil-Carbon-Sequestration-Potential-Report.aspx

Six, J. Feller, C., Denef, K., Ogle, S. de Moraes, J. C. de M., Albrecht, A.2002. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - effects of no-tillage. Agronomie, 22. 755–775

Smith, K.A. and Conen, F., 2004. Impacts of land management on fluxes of trace greenhouse gases. Soil Use and Management, 20, 255-263.

Smith, K.A., Conen, F., Ball, B.C., Leip, A. and Russo, S., 2002. Emissions of non-CO2 greenhouse gases from agricultural land, and the implications for carbon trading. Non-C02 Greenhouse Gases: Scientific Understanding, Control Options and Policy Aspects, 669-670 pp.

Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B., Sirotenko, O., Howden, M., McAllister, T., Pan, G., Romanenkov, V., Schneider, U., Towprayoon, S., Wattenbach, M., Smith, J., 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture. Phil. Trans. R. Soc. B 363, 789-813.

Soane, B.D., Ball, B.C., Arvidsson, J., Basch, G., Moreno, F., Roger-Estrade, J., 2012. No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. Soil & Tillage Research 118, 66–87.

Sun, B., Hallett, P.D., Caul, S., Daniell, T.J., Hopkins, D.W., 2010. Distribution of soil carbon and microbial biomass in arable soils different tillage regimes. Plant & Soil. 338, 17-25.

Ussiri, D.A.N., Lal, R., Jarecki, M.K., 2009. Nitrous oxide and methane emissions from long-term tillage under a continuous corn cropping system in Ohio. Soil & Tillage Research 104, 247-255.

Van Capelle, C., Schrader, S., Brunotte, J., 2012. Tillage-induced changes in the functional diversity of soil biota – A review with a focus on German data. European Journal of Soil Biology 50, 165–181.

van Kessel, C., Venterea, R., Six, J., Adviento-Borbe, M.A., Linquist, B., van Groenigen, K.J., 2012. Climate, duration, and N placement determine N2O emissions in reduced tillage systems: a meta-analysis. Global Change Biology, on line.

Van Oost K., T. A. Quine, G. Govers, S. De Gryze, J. Six, J. W. Harden, J. C. Ritchie, G. W. McCarty, G. Heckrath, C. Kosmas, J. V. Giraldez, J. R. Marques da Silva, and R. Merckx, 2007. The Impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle. Science 318, 626-629.

VandenBygaart, A.J., Kay, B.D., 2004. Persistence of soil organic carbon after plowing a long-term no-till field in southern Ontario, Canada. Soil Science Society America Journal 68, 1394–1402.

Venterea, R.T., Burger, M., Spokas, K.A., 2005. Nitrogen oxide and methane emissions under varying tillage and fertilizer management. Journal of Environmental Quality 34, 1467-1477.
Viaud, V., Angers, D.A., Parnaudeau, V., Morvan, T., Menasseri-Aubry, S., 2011. Response of organic matter to reduced tillage and animal manure in a temperate loamy soil. Soil Use and Management 27, 84-93.
Vieira, F.C.B., Bayer, C., Zanatta, J.A., Mielniczuk, J., Six, J., 2009. Building Up Organic Matter in a Subtropical Paleudult under Legume Cover-Crop-Based Rotations. Soil Science Society of America Journal 73, 1699-1706.
Virto, I., Barré, P., Burlot, A., Chenu, C., 2012. Carbon input differences as the main factor explaining the variability in soil organic C storage in no-tilled compared to inversion tilled agrosystems. Biogeochemistry 108, 17–26
West, T.O., Post, W.M., 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis. Soil Science Society of America Journal 66, 1930-1946.

Annexe 1. Consommation en carburant

Tableau A1-1. Consommation moyenne en carburant (fioul, l/ha /an) pour les opérations de travail du sol et de semis en fonction du mode de travail du sol : labour (L), travail superficiel (TS) et semis direct (SD), pour des sols de textures différentes et pour différentes rotations. Essais ITCF-ADEME, 1990-93 (Labreuche et al., 2011)

Localisation	Sol	Rotation	L	TS	SD	TS-L	SD-L
Coudray (45)	Limon argileux	B-Bl-C-Bl-P-Bl-T-Bl	27	18	9	-9	-18
La Jaillère (44)	Limon drainé	C-Bl-L-Bl-T-Bl-P-Bl	33	23	19	-10	-14
Le Magneraud (17)	Rendzine	Mg-Mg	44	23	21	-21	-23
Le Magneraud (17)	Rendzine	P-Bl-T-Bl	37	24	14	-13	-23
Parisot (81)	Limon drainé	Mg-S	36	17	9	-19	-27
Suscy (77)	Limon sain	B-Bl-P-Bl-C-Bl	40	25	20	-15	-20
moyenne						**-14,5**	**-20,8**
écart type						4,8	4,5

B = betterave, Bl = blé, C = colza, P = pois, T = tournesol, S =soja; Mg = Maïs grain

Annexe 2. Option technique labour un an sur deux

Calcul de l'atténuation unitaire pour le passage d'une situation de labour continu à une alternance travail superficiel - labour 1 an sur 2 (L-TS1/2). Cette modalité est fréquente selon l'enquête "Pratiques culturales" 2006.

Nous avons considéré que le stockage de C était 50% (un an sur deux) de celui en travail superficiel (selon Balesdent et al., 2002, et Conant et al., 2007). Le stockage additionnel étant de 0 pour une transition labour à travail superficiel, la valeur est de 0. Pour les émissions liées au carburant et au N_2O, nous avons considéré que l'atténuation calculée pour une transition labour à travail superficiel s'appliquait un an sur deux (donc = 50% de cette valeur).

Tableau A2-1. Atténuation unitaire potentielle en labour un an sur deux. Les résultats sont exprimés en $kgCO_2e$/ha/an. Pour les émissions de N_2O nous n'avons ici considéré que les sols non hydromorphes. L'atténuation est exprimée par une valeur positive, une augmentation des émissions est indiquée par une valeur négative. La référence est le labour continu.

en $kgCO_2e$/ha/an	**CO_2**			**N_2O**			**CH_4**			Références sur lesquelles s'appuient les quantifications
Emissions directes	haute	basse	moy.	haute	basse	moy.	haute	basse	moy.	
Carbone sol	0	0	0							Tableau 3
Carburant	52	23	37							Tableau 6
N_2O				0	-35	0				Tableau 5
CH_4							0	0	0	Mosier et al. 2005
Emissions induites	haute	basse	moy.	haute	basse	moy.	haute	basse	moy.	
Carburant	11	5	8							Tableau 6
Pesticides	0	-4	-2							Tableau 7
Sous - totaux	**63**	**24**	**43**	**0**	**-35**	**0**	**0**	**0**	**0**	
Potentiel d'atténuation total	haut	bas	moy.							
	63	**-12**	**43**							

Annexe 3. Estimation des coûts – bénéfices induits par l'action
Détail des estimations

Variations de rendement

Dans l'hypothèse de coûts élevés, on part du produit par hectare observé dans le RICA pour les cultures concernées, soit 1190 €. En s'appuyant sur les données de l'enquête "Pratiques culturales" (cf. Tableau 17), on peut estimer que le produit par hectare passe de 1214 à 1151 € entre le labour et le semis direct. De ce tableau, par différence, on déduit les variations de produit par hectare qui figurent dans le Tableau 19.

Tableau A3-1. Produit par hectare selon le mode d'implantation des cultures (hypothèse des coûts élevés)

	Produit/ha (€)
Labour	1 214
TS	1 202
TS1/2	1 208
LO1/5	1 164
SD	1 151

Charges en carburant

Tableau A3-2. Charges en carburant selon le mode d'implantation des cultures

	Litres	Coût (€)
Labour	95	44
TS	67	31
TS1/2	81	38
LO1/5	62	29
SD	54	25

Charges en herbicides

Tableau A3-3. Charges en herbicides selon le mode d'implantation des cultures

	Herbicides (€/ha)
Labour	53
TS	67
TS1/2	60
LO1/5	66
SD	73

Charges de travail

Tableau A3-4. Heures de travail et valorisation de ce travail à 17 € par hectare selon le mode d'implantation des cultures

	Heures/ha	€/ha
Labour	3,9	66
TS	3,4	57
TS1/2	3,6	62
LO1/5	2,7	45
SD	2,4	40

Coût d'investissement

Tableau A3-5. Annuité constante par hectare de l'achat d'un semoir selon le prix du semoir et le niveau de surface cultivée

Surface (ha)	50	100	150	200
Prix du semoir à 20000 €	29,43 €	14,72 €	9,81 €	7,36 €
Prix du semoir à 38000 €	55,92 €	27,96 €	18,64 €	13,98 €

Tableau A3-6. Synthèse par hectare et pour l'assiette maximale technique

Hypothèse haute		Coût par hectare (Euros)						Coût Global (millions d'euros)					
Scénario 1	**Surfaces: ha**	**Produit**	**Carburant**	**Travail**	**Pesticides**	**Semoir**	**Total**	**Produit**	**Carburant**	**Travail**	**Pesticides**	**Semoir**	**Total**
L -> SD	5793842	63	-19	-26	20	19	56	365	-110	-152	116	108	327
L-TS1/2 -> SD	4195541	57	-12	-22	13	19	55	239	-52	-90	55	78	229
SD-> SD	70000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	**9989383**	**60**	**-16**	**-24**	**17**	**19**	**56**	**604**	**-163**	**-242**	**171**	**186**	**555**
Scénario 2:													
L -> LO1/5	5793842	50	-15	-21	14	19	46	292	-88	-121	79	108	269
L-TS1/2 -> LO1/5	4195541	44	-9	-16	6	19	44	186	-36	-68	27	78	186
SD-> SD	70000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	**9989383**	**48**	**-12**	**-19**	**11**	**19**	**46**	**478**	**-125**	**-190**	**106**	**186**	**455**
Scénario 3													
L -> TS	7979636	12	-13	-9	14	0	4	97	-105	-74	115	0	32
L-TS1/2-> TS	5778357	6	-7	-5	7	0	2	35	-38	-27	42	0	12
SD-> SD	70000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	**13757994**	**10**	**-10**	**-7**	**11**	**0**	**3**	**132**	**-143**	**-101**	**156**	**0**	**44**

Hypothèse basse		Coût par hectare (Euros)						Coût Global (millions d'euros)					
Scénario 1	**Surfaces: ha**	**Produit**	**Carburant**	**Travail**	**Pesticides**	**Semoir**	**Total**	**Produit**	**Carburant**	**Travail**	**Pesticides**	**Semoir**	**Total**
L -> SD	5793842	0	-19	-26	20	0	-25	0	-110	-152	116	0	-146
L-TS1/2 -> SD	4195541	0	-12	-22	13	0	-21	0	-52	-90	55	0	-88
SD-> SD	70000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	**9989383**	**0**	**-16**	**-24**	**17**	**0**	**-23**	**0**	**-163**	**-242**	**171**	**0**	**-234**
Scénario 2:													
L -> LO1/5	5793842	0	-15	-21	14	0	-23	0	-88	-121	79	0	-131
L-TS1/2 -> LO1/5	4195541	0	-9	-16	6	0	-19	0	-36	-68	27	0	-78
SD-> SD	70000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	**9989383**	**0**	**-12**	**-19**	**11**	**0**	**-21**	**0**	**-125**	**-190**	**106**	**0**	**-209**
Scénario 3													
L -> TS	7979636	0	-13	-9	14	0	-8	0	-105	-74	115	0	-64
L-TS1/2-> TS	5778357	0	0	-5	7	0	3	0	0	-27	42	0	15
SD-> SD	70000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	**13757994**	**0**	**-8**	**-7**	**11**	**0**	**-4**	**0**	**-105**	**-101**	**156**	**0**	**-50**

Hypothèse Moyenne		Coût par hectare (Euros)						Coût Global (millions d'euros)					
Scénario 1	**Surfaces: ha**	**Produit**	**Carburant**	**Travail**	**Pesticides**	**Semoir**	**Total**	**Produit**	**Carburant**	**Travail**	**Pesticides**	**Semoir**	**Total**
L -> SD	5793842	31	-19	-26	20	0	6	182	-110	-152	116	0	36
L-TS1/2 -> SD	4195541	28	-12	-22	13	0	7	119	-52	-90	55	0	31
SD-> SD	70000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	**9989383**	**30**	**-16**	**-24**	**17**	**0**	**7**	**302**	**-163**	**-242**	**171**	**0**	**68**
Scénario 2:													
L -> LO1/5	5793842	25	-15	-21	14	0	3	146	-88	-121	79	0	15
L-TS1/2 -> LO1/5	4195541	22	-9	-16	6	0	4	93	-36	-68	27	0	15
SD-> SD	70000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	**9989383**	**24**	**-12**	**-19**	**11**	**0**	**3**	**239**	**-125**	**-190**	**106**	**0**	**30**
Scénario 3													
L -> TS	7979636	6	-13	-9	14	0	-2	48	-105	-74	115	0	-16
L-TS1/2-> TS	5778357	3	-3	-5	7	0	2	18	-19	-27	42	0	13
SD-> SD	70000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	**13757994**	**5**	**-9**	**-7**	**11**	**0**	**0**	**66**	**-124**	**-101**	**156**	**0**	**-3**

Annexe 4. Défiscalisation du gazole agricole et prix des carburants payés par les agriculteurs

En 1956, pour favoriser la mécanisation de l'agriculture française a été instauré le fioul agricole (distinguable par sa coloration) soumis à une taxation très réduite. Cette mesure a perduré et a même été accentuée. En 2010, la taxe intérieure de consommation sur les produits énergétiques était ainsi de 42,84 € l'hectolitre pour le diesel et de 5,66 € pour le gazole agricole. Cette taxe réduite concerne toutefois aussi certaines industries (le bâtiment) et le fioul domestique pour le chauffage. L'agriculture profite toutefois pour les deux tiers de cette "niche fiscale".

Depuis 2004, pour éviter à l'agriculture le choc de l'augmentation du prix du pétrole, les pouvoirs publics remboursent aux agriculteurs, par une aide individuelle fonction de leur consommation, 5 € l'hectolitre. La taxe restant à la charge de l'agriculteur n'est donc plus que de 66 centimes l'hectolitre.

Tableau A4-1. Principaux paiements aux exploitations dans l'Union Européenne et en France en 2010 (Source : Butault, 2012)

	UE		France
	Millions eur	% cumulé/total	Millions eur
Paiement unique	35 525	54,8%	7179
Détaxation des carburants	3 111	59,6%	1100
Aides à la modernisation des expl	3 098	73,8%	328
Aides aux zones défavorisées	3 071	64,3%	555
Mesures agroenvironnementales	3 047	69,0%	355
Primes à la vache allaitante	1 007	75,3%	662

Cette mesure a des effets financiers considérables. Dans le calcul des paiements effectués par l'OCDE, c'est le deuxième paiement après le DPU, dans l'Union Européenne. D'un montant de 3 milliards d'euros, il est d'un montant équivalent à celui des aides aux zones défavorisées ou de celui des mesures agro environnementales. En France, la défiscalisation correspondrait à 1,1 milliard d'euros, soit un montant supérieur à celui des aides cumulées du second pilier, mentionnées ci-dessus.

La remise en cause de cette défiscalisation fait l'objet d'un débat qui devient récurrent. En 2011, le gouvernement avait déjà envisagé de réduire cette défiscalisation pour transférer les fonds à des mesures d'allègement des cotisations sociales. Le débat risque d'être relancé par les discussions actuelles sur l'alignement de la TICPE entre le diesel et l'essence. La TICPE sur l'essence est de l'ordre de 60 centimes l'hectolitre, soit 20 centimes de plus que pour le diesel. Une adoption de cet alignement et le maintien du régime agricole accroîtraient indirectement le montant de cette aide.

Chiffrage des effets de la fiscalisation du carburant agricole

Si le carburant agricole était fiscalisé au taux courant (y compris en supprimant l'aide directe), son prix passerait de 0,47 € le litre à 0,89 €. Les dépenses de carburant augmenteraient dans les différents modes de travail du sol, mais le labour serait beaucoup plus pénalisé que le semis direct (Tableau A4-2). Cette mesure correspondrait à une baisse de la marge des agriculteurs et à une augmentation des recettes fiscales.

Tableau A4-2. Dépenses de carburants avant et après fiscalisation selon le mode de travail du sol

	Litres / ha	Coût actuel	Coût après fiscalisation	Variation
Labour	95	44	84	40
TS	67	31	59	28
TS 1/2	81	38	72	34
LO1/5	62	29	55	26
SD	54	25	48	23

Au prix du carburant fiscalisé, le chiffrage des effets de l'application des trois scénarios conduit à des résultats très différents (Tableau A4-3).

Le coût de la tonne de carbone devient ainsi négatif dans les trois scénarios.

Tableau A4-3. Les coûts associés aux scénarios pour les agriculteurs avant et après fiscalisation (hypothèse moyenne)

	Coût par hectare (€)		Coût par tonne (€)
	Total	dont carburant	Total
Situation actuelle			
Scénario 1	7	-16	12
Scénario 2	3	-12	8
Scénario 3	0	-9	-3
Après fiscalisation			
Scénario 1	-8	-31	-13
Scénario 2	-5	-20	-13
Scénario 3	-8	-17	-121

Proposition d'une mesure simple d'incitation : la suppression de la défiscalisation des carburants agricoles et son remplacement par une aide uniforme par hectare

Une mesure simple pour inciter le développement de la simplification du travail du sol est la suppression de la défiscalisation du gazole agricole et son remplacement par une aide uniforme par hectare. La défiscalisation du gazole agricole a été mise en place dans le contexte de modernisation de l'agriculture pour favoriser sa modernisation. Dans le contexte actuel où est discutée l'instauration d'une fiscalité écologique, le maintien d'un tel système, favorisant la consommation d'énergie fossile, peut prêter à discussion. Sa suppression pourrait favoriser le développement du semis direct. Si on reprend les données du Tableau A4-2, la fiscalisation induirait une perte par hectare de 40 € pour le labour et de 23 € pour le semis direct. Pour ne pas pénaliser les agriculteurs, le produit de la taxe peut être redistribué par une subvention uniforme par hectare, quelles que soient les cultures (y compris les prairies). Une subvention de l'ordre de 30 € par hectare favoriserait les modes de travail du sol peu gourmands en énergie.

Outre le fait d'inciter les exploitations économes en énergie, cette mesure allégerait les coûts de transaction. Ceux-ci sont en effet assez importants pour le remboursement des 5 € de la TICPE, alors qu'ils seraient nuls pour l'aide uniforme à la surface. La mesure serait assez neutre budgétairement, la distribution des subventions étant compensée par une hausse des recettes fiscales.

Annexe 5. Fourchette des émissions pour les différentes options techniques

Les valeurs sont issues de l'Annexe 2.

Tableau A5-1. Différence entre valeurs hautes et basses des différents postes contribuant aux émissions de GES

($kgCO_2e/ha/an$)	**SD**	**L-TS1/2**	**LO1/5**	**TS**
Emissions directes				
Carbone sol	1100	0	715	0
Carburant	217	29	6	59
N_2O	140	35	112	70
CH_4	0	0	0	0
Emissions induites				
Carburant	2	6	1	12
Pesticides	20	4	16	8
Potentiel d'atténuation total	1270	75	851	150