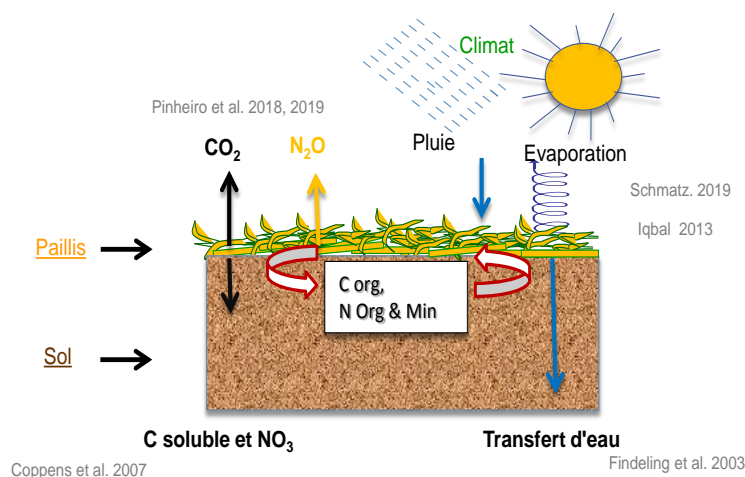


# LES PAILLIS DE RESIDUS DE CULTURES EN SYSTEMES SANS TRAVAIL DU SOL : IMPACTS SUR LE FONCTIONNEMENT DU SOL ET LE DEVENIR DU CARBONE ET DE L'AZOTE

Sylvie Recous<sup>1</sup>, Sandro Giacomini<sup>2</sup>, Pascal Thiébeau<sup>1</sup>, Akhtar Iqbal<sup>1,3</sup>  
Patrick Pinheiro<sup>2</sup>, Raquel Schmatz<sup>2</sup>, Patricia Garnier<sup>4</sup>

<sup>1</sup>UMR FARE, INRA, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2 Esplanade R. Garros, 51100 Reims, <sup>2</sup>Department of Soils, Federal University of Santa Maria, Santa Maria, RS 97105-900, Brazil, <sup>3</sup>COMSATS University Islamabad, Abbottabad Campus, Abbottabad 22060, Pakistan, <sup>4</sup>INRA, UMR ECOSYS, F-78500 Thiverval-Grignon, France. [sylvie.recous@inra.fr](mailto:sylvie.recous@inra.fr)

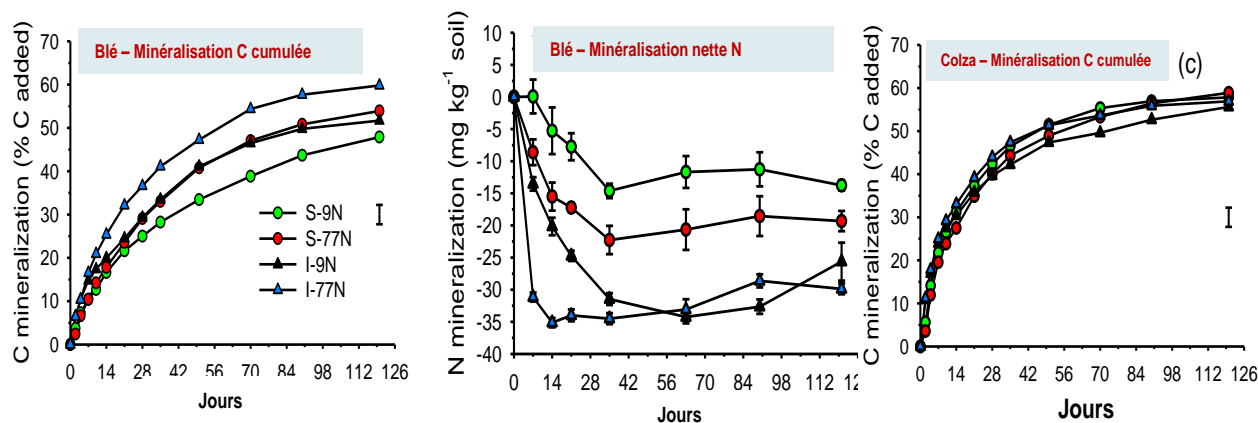
Le travail du sol a un effet direct sur la structure du sol, la distribution spatiale de la matière organique humifiée et la localisation des matières organiques récemment apportées (résidus de culture, déchets et effluents). Il a aussi un effet indirect sur le fonctionnement du sol car le placement initial des résidus de cultures, notamment par la présence ou l'absence de paillis à la surface du sol, la masse et l'épaisseur de ces paillis, modifient de nombreux paramètres physiques du sol, qui influencent à leur tour la composition et l'activité des communautés vivantes et les cycles biogéochimiques (Figure 1). L'objectif de la communication présentée est de montrer quelles sont les conséquences de la présence de paillis de résidus végétaux de natures différentes, sur leur dynamique de décomposition et la dynamique de l'azote associée. Elle vise à souligner la complexité des interactions entre fonctionnements physique, chimique et biologique dans de tels systèmes. Cet article illustrera les principaux résultats à travers plusieurs exemples en agriculture de conservation (Thiébeau 2019, Thiébeau et Recous, 2016 et 2017) ou sans travail du sol, en situations de région tempérée ou tropicale (travaux de thèse de Filip Coppens, 2006 ; Akhtar Iqbal, 2013 ; Patrick Pinheiro, 2018 et Raquel Schmatz, 2019).



**Figure 1 : Impacts de la présence d'un paillis sur les flux d'eau (interception de la pluie, évaporation, infiltration), de solutés (nitrate et carbone soluble), sur les flux de minéralisation et organisation de l'azote, et les flux gazeux.**

Dans les systèmes sans travail du sol ou à travail du sol réduit, les résidus de cultures sont laissés à la surface du sol. Le contact sol-résidus est alors limité, ce qui rend les nutriments du sol spatialement « distants » du carbone ajouté à la surface du sol. Les résidus de cultures, ayant une faible concentration en azote (C:N élevé), ont alors tendance à se décomposer plus lentement que lorsqu'ils sont incorporés dans le sol, en raison de la faible disponibilité en N pour les micro-organismes décomposeurs (Recous et al. 1995). Ceci a été observé par Redin et al. (2014) qui a montré une forte interaction entre l'effet de la localisation (en surface ou incorporé) et la richesse en azote des résidus végétaux sur leur vitesse de décomposition (Figure 2a), mais aussi sur la minéralisation nette de l'azote au cours de leur décomposition. Plus les résidus se décomposent en présence d'une concentration élevée d'azote disponible (Traitements I-77N > I-9N > S-77N > S-9N) et plus l'azote organisé par les décomposeurs est important, et plus la minéralisation nette d'azote est faible (valeurs négatives dans la Figure 2b). Cette interaction dépend elle-même de la richesse en azote du résidu comme le montre la comparaison entre les résidus de blé et les résidus de colza (culture intermédiaire) (Figure 2c).

La présence d'un paillis a d'autres effets sur la dynamique de l'azote : on a pu observer une concentration en azote minéral plus élevée de la couche du sol sous-jacente au paillis en comparaison à la situation de résidus incorporés dans cette même couche (Coppens et al. 2007). L'absence d'incorporation des résidus induit une organisation microbienne plus faible de l'azote au cours de la décomposition même si on la rapporte à une même quantité de paillis décomposé, résultant d'un certain nombre d'adaptation de la communauté des micro-organismes décomposeurs à la limitation relative en azote (Recous et al. 1995). Cette réduction de l'immobilisation d'azote minéral, en présence de résidus non incorporés, peut donc accroître temporairement l'accumulation d'azote minéral dans les couches supérieures du sol, et avoir d'autres conséquences environnementales (par exemple risque accru d'émission de N<sub>2</sub>O).



**Figure 2 : Effet de la localisation et de la disponibilité de l'azote, sur la minéralisation du carbone et la minéralisation nette de l'azote du sol, au cours de la décomposition de résidus de blé (C:N= 96) et de résidus de colza (C:N=16) incubés en conditions contrôlées en mésocosmes. 4 traitements : résidus à la surface sans apport d'N min dans le sol (S-9N), surface avec apport N min dans le sol sous-jacent (S-77N), incorporés dans le sol sans apport d'N min (I-9N), incorporés avec apport d'N min (I-77N). (Redin et al., 2013)**

Un autre effet majeur de la présence d'un mulch de résidus végétaux à la surface du sol est la modification des régimes hydrique et thermique du sol (Pinheiro et al. 2019). Ces effets dépendent de la nature des résidus et de l'épaisseur du paillis (et donc de sa masse), en raison de l'interception de la pluie par les paillis et de la réduction possible de l'évaporation d'eau à partir du sol. Cette dernière conduit en général à une augmentation significative de l'humidité du sol sous le paillis, sous certains climats et/ou saisons.

La capacité maximale de rétention en eau des résidus de culture (de l'ordre de 1 à 4 g H<sub>2</sub>O par g de résidu sec) et la vitesse d'humectation varient fortement selon les résidus (Figure 3a). Elle dépend principalement de la densité des tissus végétaux, ou à l'inverse, de leur porosité (Figure 3b). Cette capacité à s'humidifier et à rester humide après les pluies influence la décomposition en surface. Les vitesses de décomposition peuvent être principalement dépendantes du régime de pluie, effaçant alors l'effet du type de résidu (Coppens et al., 2007). Cette capacité de rétention d'eau influence aussi les mélanges de résidus d'espèces différentes (par exemple un mélange de paille de maïs et de résidus verts de légumineuse étudié par Iqbal et al., 2015) : il a été observé des synergies dans la décomposition de mélanges de résidus, c'est-à-dire une décomposition du mélange supérieure à celle imputable proportionnellement à chacune des deux composantes. Ceci a été observé par exemple dans les mélanges maïs et dolique et blé et luzerne par Iqbal et al. (2015), avec une décomposition plus rapide du mélange maïs + dolique, en raison de la capacité du paillis de maïs à retenir une humidité importante bénéficiant à la dégradation de l'autre composante du mélange moins susceptible de retenir l'eau (Iqbal et al., 2015). Le paillis a donc un effet majeur sur le régime hydrique du paillis lui-même et du sol, dont les effets importants ou parfois négligeables dépendent totalement du climat des situations considérées.

Résidu (tige)	Teneur en eau maximale g H <sub>2</sub> O / g MS	Temps d'immersion heure
Blé	2.3	16
Riz	2.0	6
Brachiaria	1.8	16
Maïs	3.1	30
Soja	2.1	20
Pois	3.3	8
Luzerne	1.3	10
Lablab	1.3	24
Stylosanthes	2.0	16
Tournesol	3.8	20
Colza	3.2	16

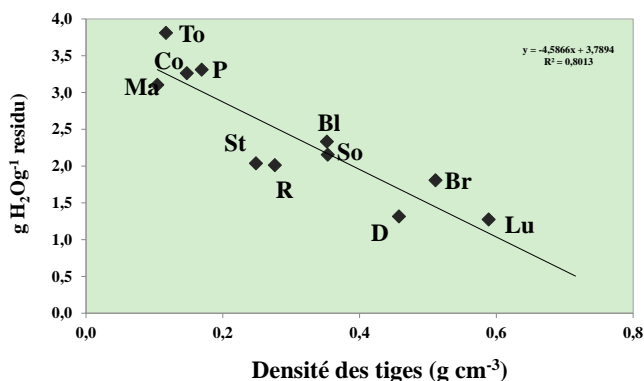


Figure 3 : Teneur maximale en eau de tiges et temps d'immersion (heures) nécessaires pour obtenir la teneur en eau maximale, données obtenues par trempage de fragments de tige de 5cm de longueur dans l'eau (a) . Relation entre la teneur en eau maximale et la densité des tiges (b). (Iqbal et al., 2013)

Enfin, des quantités importantes de C et N peuvent être lessivées des paillis soumis à des pluies de durées et d'intensités variables, comme cela a été observé en conditions contrôlées (Thiébeau et al., soumis) ainsi qu'au champ, en conditions tropicales avec des paillis de vesce et de blé (Schmatz et al., soumis). La pluie influence aussi la distribution de l'azote apporté par la fertilisation, à la surface du paillis, que ce soit de l'urée (Pinheiro et al., 2019) ou des produits organiques résiduels (Kyulavski et al., 2019). Par ailleurs, le paillis

atténuée de manière significative les fluctuations de température sous le paillis. Dans certaines conditions, une élévation de la température à la surface du sol est possible, conduisant à des conditions globalement plus favorables à l'activité microbienne à l'interface sol-paillis.

Finalement, la hiérarchie des déterminants qui pilotent l'évolution des paillis s'établit en fonction des caractéristiques dominantes des situations concernées. Par exemple, nous avons pu montrer, pour des exploitations agricoles du Grand-Est pratiquant l'agriculture de conservation, deux années distinctes et différentes cultures, que la dynamique de perte de masse ou de carbone des paillis pouvait être décrite par la somme de jours normalisés par la température. Cela reflète l'effet dominant de la température sur la décomposition par rapport aux autres facteurs tels que la nature des paillis et l'humidité (Thiébeau et Recous, 2017). Par contre, en conditions subtropicales du sud du Brésil, où les températures varient relativement peu et où le régime des pluies est très contrasté (fortes précipitations en un nombre réduit de jours de pluies, entre lesquels les paillis sont très secs), la décomposition des couches de paillis de différentes masses a été très bien prédite par la teneur en eau moyenne des paillis au cours de l'année (Dietrich et al., 2019).

Dans des situations culturales et sous des climats variés, la présence de paillis de feuilles sénescents (*Miscanthus*) ou l'augmentation de la masse de paillis (canne à sucre ; vesce) ont fait croître significativement les émissions de  $N_2O$  comparativement aux mêmes situations sans résidus (Figures 4 et 5) (Peyrard et al., 2017 ; Pinheiro et al., 2019 ; Schmatz et al., soumis), altérant à court terme le bilan positif du recyclage du carbone dans les sols. Dans les situations étudiées au Brésil (canne à sucre, vesce et blé), la vitesse de dégradation des paillis était identique quelle que soit la masse initiale de paillis (dans la gamme 0 à 12 t MS/ha).

A l'interface avec les sols, les paillis représentent donc des « hot spots » d'émissions de  $N_2O$  car cette situation combine l'activité microbienne des micro-organismes décomposeurs augmentées par l'apport de carbone des paillis, eux-mêmes consommateurs d'oxygène, une source d'azote des paillis et des conditions d'humidité favorables à la nitrification et dénitrification (Pinheiro et al., 2019). La présence de paillis peut aussi augmenter les émissions d'ammoniac par volatilisation après la fertilisation minérale ou organique car le paillis augmente les surfaces d'échange avec l'atmosphère (Pinheiro et al., 2018). L'ensemble de ces flux dépendent des disponibilités relatives des formes d'azote dans et sous les paillis, de la quantité et de la nature du carbone apporté, et des conditions microclimatiques dans ce système complexe que représente l'ensemble sol + paillis. Elles sont augmentées par l'apport de fertilisants, mais se produisent même en son absence, après les apports de paille (Figure 4)

## Flux de N<sub>2</sub>O pendant une année sur culture de canne à sucre (g/ha/jour)

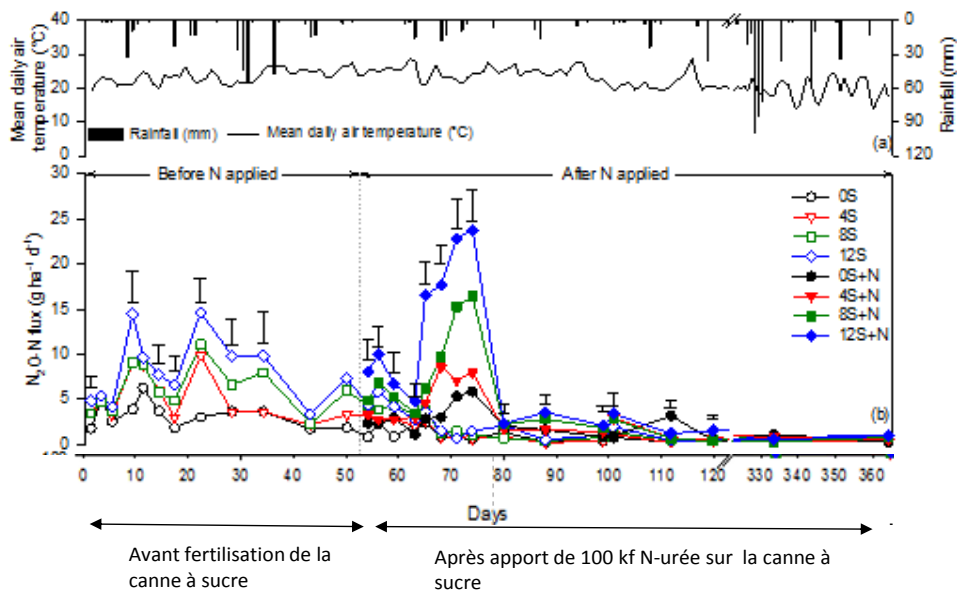


Figure 4 : Dynamique d'émission de N<sub>2</sub>O dans un système de culture avec canne à sucre fertilisée avec 100 kg N urée (+N) ou non fertilisée, et des quantités variables de paillis à la surface du sol (0, 4, 8 et 12 t MS/ha). La fertilisation intervient 52 jours après la récolte du cycle précédent de canne et l'apport des paillis. (Pinheiro et al., 2019).

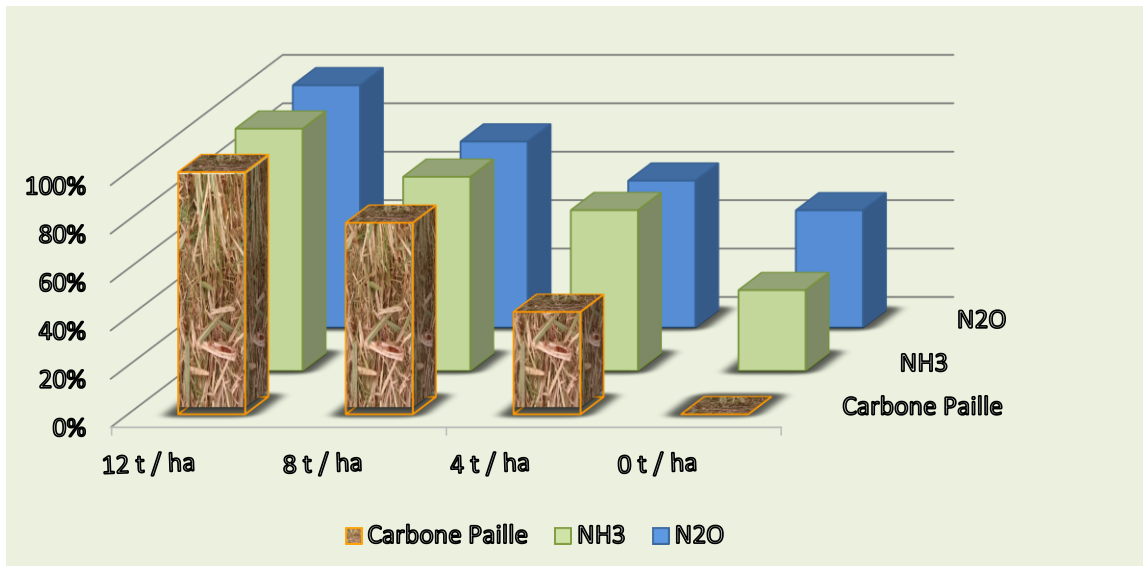


Figure 5 : Effet de la quantité de paille de canne à sucre laissée au sol (12, 8, 4 et 0 t MS/ha) dans une culture de canne à sucre (Rio Grande do Sul, Brésil), sur les quantités de carbone restant, les quantités d'ammoniac volatilisé et de N<sub>2</sub>O émis. Ces quantités sont exprimées en % des quantités mesurées pour le traitement 12 t MS/ha. On observe que l'exportation partielle des pailles réduit les quantités de C recyclé vers le sol, mais aussi les émissions gazeuses.

## Conclusion

Les paillis ont des effets directs, tels que les apports de C et N, et des effets indirects majeurs *via* les conditions environnementales, sur les processus du sol. Pour ces paillis, les processus physiques et leurs interactions avec les processus biologiques sont très importants, particulièrement sur les flux de C et N dans les sols et dans les paillis. Les pratiques de travail du sol (labour vs non labour et techniques culturales simplifiées) et de gestion des résidus de culture (notamment recyclage vs exportation partielle ou totale) modifient profondément la stratification des activités biologiques et les compartiments et formes de carbone et azote dans les sols, ainsi que les flux d'eau et de chaleur. Ceux-ci impactent à leur tour les flux de minéralisation et les pertes par lixiviation ou gazeuse. Pour bien comprendre et prédire ces effets, il est nécessaire de ne pas se focaliser exclusivement sur le fonctionnement biologique des sols, mais aussi sur la description des processus physiques et leurs interactions.

Les impacts de la gestion des résidus de cultures sur la séquestration du carbone doivent tenir compte de tous les flux, et notamment ceux impactés par la présence des paillis à la surface des sols : les émissions de N<sub>2</sub>O peuvent, dans certaines conditions, contrebalancer, voire annuler, le bénéfice produit par le recyclage des pailles sur le bilan des gaz à effet de serre.

## Références citées

- Coppens F., Garnier P., Findeling A., Merckx, R. Recous S. (2007) Decomposition of mulched versus incorporated residues: modelling with PASTIS clarifies interaction between residue quality and location. *Soil Biology and Biochemistry* 39, 1339-2350
- Iqbal A., Aslam S., Alavoine G., Benoit P., Garnier P., Recous S. (2015) Rain regime and soil type affect the C and N dynamics in soil columns that are covered with mixed-species mulches. *Plant and Soil* 393: 319-334.
- Iqbal A., Beaugrand J., Garnier P., Recous S. (2013) Tissue density determines the water storage characteristics of crop residues. *Plant and Soil* 367, 285–299.
- Kyulavski V., Recous S., Garnier P., Paillat J-M., Thuriès L. (2019) Application of N Fertilizer to Sugarcane Mulches: Consequences for the Dynamics of Mulch Decomposition and CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O Fluxes. *Bioenergy Research* 12, 484-496.
- Peyrard C., Ferchaud F., Mary B., Grehan E., Léonard J. (2017) Management practices of *Miscanthus x giganteus* strongly influence soil properties and N<sub>2</sub>O emissions over the long term. *Bioenergy Research* 10:208–224.
- Pinheiro P.L., Recous S., Dietrich G., Weiler D.A., Giovelli R.L., Mezzalana A.P., Giacomini S.J. (2018). Straw removal reduces the mulch physical barrier and ammonia volatilization after urea application in sugarcane. *Atmospheric Environment* 194, 179-187.
- Pinheiro P.L., Recous S., Dietrich G., Weiler D.A., Schu A.L., Bazzo H.L.S., Giacomini S.J. (2019). N<sub>2</sub>O emission increases with mulch mass in a fertilized sugarcane cropping system. *Biology and Fertility of Soils* 5, 511-523
- Recous S., Robin D., Darwis D., Mary B. (1995) Soil inorganic N availability: effect on maize residue decomposition. *Soil Biology & Biochemistry* 27, 12, 1529-1538.
- Redin M., Recous S., Dietrich G., Skolaude A.C., Chaves B., Pfeifer I.C., Aita C., Giacomini S.J. (2014) Interactions between the chemical quality of crop residues and their location in soil: how nitrogen availability controls mineralization of C and N. 18th International Nitrogen Workshop "Innovations for sustainable use of N resources" , 29/06 - 3/07 /2014, Lisbon, Portugal

- Schmatz R., Recous S., Weiler D., Pilecco G., Schu A., Giovelli R., Giacomini S.J. How the mass and quality of wheat and vetch mulches affect drivers of soil N<sub>2</sub>O emissions. Soumis à Geoderma, 2019.
- Thiébeau P. (2019). Mesurer l'épaisseur des résidus à la surface d'un sol pour estimer leur biomasse. Cahiers Agricultures 28: 11.
- Thiébeau P., Girardin C., Recous S. Water interception and release of soluble carbon by mulches of plant residues under contrasting rain intensities. Soumis à European Journal of Soil Science, 2019.
- Thiébeau P., Recous S. (2016) Une méthode pour quantifier les biomasses de résidus de récolte à la surface des sols après la moisson. Cahiers Agricultures 25(4):45001
- Thiébeau P., Recous S. (2017). Dynamiques de décomposition des résidus de cultures sur des exploitations pratiquant l'agriculture de conservation en région Grand Est, France. Cahiers Agricultures 26(6):65001

## **Remerciements**

La collaboration bilatérale Brésil-France a été soutenue par le gouvernement brésilien par l'intermédiaire du Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) et le programme CNPq-Ciência sem Fronteiras (208415/2017-3), et par l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA)