

Etude expérimentale des performances technicoéconomiques et environnementales de l'agriculture de conservation dans les régions semi-arides en Tunisie

SALEM TALBI*, MONGI SGHAIER

DOI: 10.30682/nm2401b

JEL codes: O32, Q12, Q14

Abstract

Conservation agriculture, based on direct seeding, offers an ecological production method based on an integrated and sustainable management of mulch and soil resources. The techno-economic and environmental impacts of this production alternative are variable depending on the production system and the agroecological zone. This work aims to assess different impacts of conservation agriculture compared to conventional agriculture, using a set of agronomic, economic and environmental indicators at the scale of an experimental station. The experimental device combines a set of crop rotations, in rainfall and irrigated system under conventional and conservation agriculture. The analytical methodological framework used the tools of descriptive statistics and multidimensional analysis, including principal component analysis (PCA). Results show the added value of conservation agriculture, which has higher economic and agronomic performance and positive environmental benefits.

Keywords: *Conservation agriculture, Direct seeding, Sustainable agriculture, Agroecology, Economic and environmental performance.*

1. Introduction

L'agriculture d'aujourd'hui confronte nombreux défis dont notamment satisfaire la demande alimentaire croissante et procurer un revenu économique décent aux agriculteurs à travers la promotion des systèmes de production agricoles durables (Kumar and Pant, 2023). La concrétisation du dernier objectif passe impérativement par l'amélioration de la performance environnementale de l'agriculture, notamment qu'elle est soupçonnée d'être une cause de dété-

rioration de la qualité de l'environnement [11% des émissions mondiales du gaz carbonique] et s'empare de la grande part de la consommation mondiale d'eau [70%] (Brooks *et al.*, 2019).

La demande alimentaire croissante, les évolutions technologiques rapides et la diversité des besoins en denrées alimentaires ont accéléré le processus d'intensification de l'activité agricole et l'exploitation des nouvelles terres écologiquement fragiles (Joumard *et al.*, 2020). Au fil des années et avec l'évolution des préférences des consommateurs, des nouvelles demandes des

* INAT: Institut National Agronomique de Tunis, Tunisia.

** Laboratoire d'Economie et Sociétés Rurales, Institut des Régions Arides de Médenine, Université de Gabes, Tunisia.
Corresponding author: talbi.salem@gmail.com

marchés sont apparues et des pratiques de gestion inappropriées, à l'échelle des exploitations agricoles, sont mises en place. L'interaction de ces nouvelles préférences avec les évolutions technologiques de pointe (mécanique et chimique) détermine aussi le niveau de la performance environnementale de l'agriculture (Guerrero, 2021). Le progrès technique s'est accompagné par des conséquences négatives manifestées par des fortes pressions sur les ressources notamment en sol et en eau. Durant les dernières décennies, un large consensus s'est manifesté sur la nécessité de créer un changement profond au niveau du modèle de production agricole. En effet, les modèles conventionnels de production agricole semblent atteindre des limites, parfois irréversibles sur les plans économique et environnemental (Diogo *et al.*, 2018). C'est pour cette raison que, les orientations vers le renforcement des performances économiques et environnementales du secteur agricole, deviennent de plus en plus des exigences incontournables (Peccia *et al.*, 2017).

Les perspectives de développement d'une agriculture durable considèrent que l'exploitation agricole devrait inscrire ses stratégies de production dans une démarche socioéconomique et environnementale basée des pratiques écologiques qui protègent l'environnement (Bommarco *et al.*, 2013; Zahm *et al.*, 2019; Muhie, 2022).

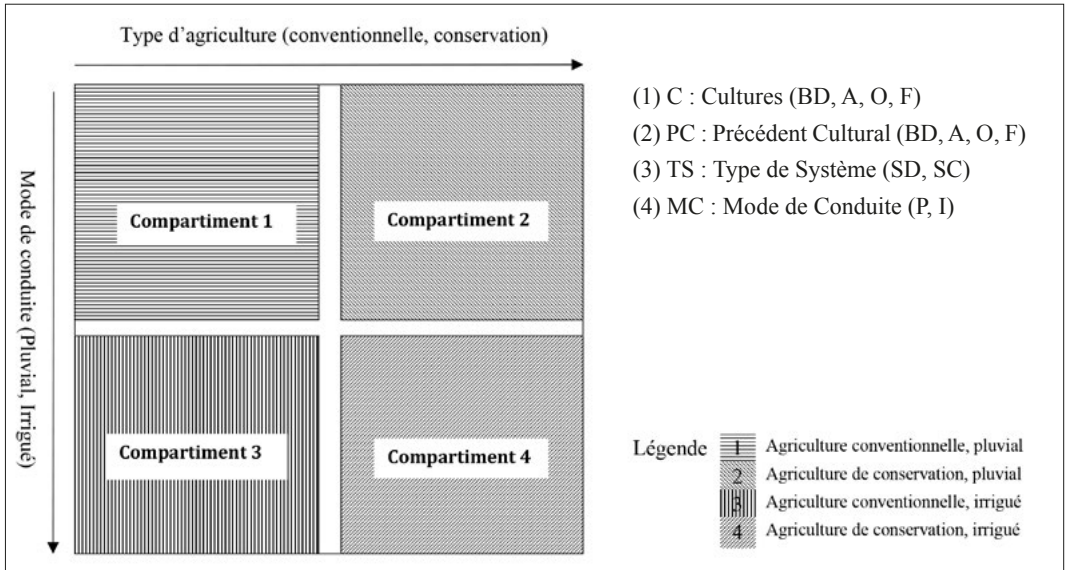
L'agriculture de conservation (AC) basée sur le semis direct (SD) fait partie de l'agriculture écologiquement intensive [AIE] (Ghali *et al.*, 2014). Elle est apparue comme une forme d'intensification écologique des systèmes de production qui vise la stabilité de la production agricole et favorise la restauration des milieux dégradés (Laurent, 2015; FAO, 2022). Durant les dernières décennies, les systèmes de production agricole basés sur des pratiques de conservation du sol ont montré leur efficacité, comparative-ment aux pratiques conventionnelles basées sur le labour, notamment en matière de réduction de l'érosion, de la séquestration du carbone et de la stabilité de la production (Bastiège et Favreau, 2019; Bekin *et al.*, 2021; Chabert et Sarthou, 2020; Mendes *et al.*, 2019).

Les performances agronomiques de l'AC, au niveau d'une parcelle expérimentale, sont assez remarquables et sont en faveur des systèmes de

conservation. En effet, 80% des cultures sous les systèmes de conservation présentent des rendements meilleurs qu'en système conventionnel (Thierfelder *et al.*, 2015). A l'échelle de l'exploitation agricole, les résultats économiques et financiers des systèmes de conservation sont confirmés et le revenu additionnel par hectare demeure encourageant (Jacobs *et al.*, 2022; Cusser *et al.*, 2023; Rouabhi *et al.*, 2019). Les vrais impacts économiques ne seront observés qu'à moyen et long terme [équilibre écologique], contrairement aux effets financiers immédiats à court terme (Friedrich *et al.*, 2012). C'est pour cette raison, que la mise en place d'un mécanisme de soutien financier adapté, semble être une priorité afin de surmonter les difficultés financières qui accompagnent généralement l'adoption des nouvelles technologies par les agriculteurs notamment des zones arides (Dhehibi *et al.*, 2023).

Le contexte de développement agricole en Tunisie n'échappe pas au contexte mondial et il est caractérisé par une forte pression sur les ressources naturelles. En effet, la dégradation continue des terres fertiles constitue une vraie menace de la durabilité globale de la production agricole. En revanche, l'appui sur des nouvelles technologies, pour remédier aux problématiques environnementales demeure limité (Bouzaida et Doukali, 2019; Dhehibi *et al.*, 2023). Bien que « la vraie » introduction des pratiques écologiques basées sur l'AC chez des agriculteurs pilotes remonte à la fin des années 90, les conclusions préliminaires tirées, en milieu réel, en matière de rentabilité économique sont encourageantes (Ben-Hammouda *et al.*, 2010). En effet, il y a un consensus général, après plus de deux décennies d'expérimentation, que les résultats technicoéconomiques obtenus chez cette catégorie d'agriculteurs leaders ne peuvent pas être considérés comme des résultats finaux et définitifs. Par conséquent, il est difficile d'extrapoler des conclusions confirmées et robustes pour tous les systèmes de production. Même les économies en ressources, issues de la conversion en AC, ne sont pas de la même ampleur pour tous les systèmes de cultures et elles pourraient être absorbées par des coûts additionnels de désherbage ou des réductions potentielles de niveau de rendement.

Figure 1 - Dispositif expérimental.



En revanche, les impacts environnementaux positifs de l'AC demeurent aussi pertinents et plus tangibles sur la ressource sol. La réduction d'émission du gaz carbonique et des terres fertiles arables, en plus des services écosystémiques divers [externalités positives] de cette alternative de production, sont en réalité, sous-évaluées jusqu'à maintenant. Ce type de performances environnementales permet d'atténuer les effets négatifs du changement climatique et accroît, par conséquent, la durabilité des systèmes de production agricole. Dans le contexte tunisien d'adoption des pratiques agrologiques basées sur l'AC, deux questions pertinentes sont posées afin de bien cerner les différentes potentialités de cette approche de production : i) du point de vue technicoéconomique, l'AC basée sur le SD, convient-elle à toutes les cultures sous les systèmes pluvial et irrigué et ii) comment varie l'ampleur des retombées économiques et environnementales, des systèmes de conservation à l'égard des systèmes conventionnels ?

Le présent travail se propose de fournir quelques éléments de réponse pour les questions posées dans un cadre d'une analyse systémique, à l'échelle d'une station expérimentale. Les résultats de cette étude vont servir comme un outil

d'aide à la décision pour les agriculteurs de proximité qui désirent expérimenter cette alternative de production. Il ambitionne, également, de présenter des orientations en matière de conduite et des conditions de réussite de l'AC en Tunisie.

2. Approche méthodologique et outils d'analyse

2.1. Dispositif expérimental et collecte de données

Les données technico-économiques sont collectées auprès de la station expérimentale de l'École Supérieure de l'Agriculture du Kef (ES-AK)¹. L'objectif de l'expérience est d'évaluer les performances technicoéconomiques et environnementales d'un ensemble de cultures (blé dur [BD], orge [O], avoine [A] et féverole [F]) sous deux systèmes de production différents (système conventionnel vs système de conservation), en irrigué (I) et en pluvial (P). Afin de simplifier la lecture et l'analyse des résultats et pour des questions ergonomiques, le *système de conservation* est représenté par SD alors que le *système conventionnel* est représenté par SC.

¹ École supérieure de l'agriculture du Kef [36°07'14.3»N 8°42'56.3»E].

Tableau 1 - Matrice de données et variables d'analyse.

Rotations	Variables								
	Dés.	Ren.	ConsEn.	HT	CDéh	MB	EmCO2	SelDép	Irr.
O.BD.SD.P	R1	0,27	0,151	0,015	2,18	4,6	0,38	0	0
BD.O.SD.P	R2	0,46	0,151	0,015	2,86	23,4	0,38	0	0
A.BD.SD.P	R3	0,29	0,151	0,015	1,6	11,7	0,38	0	0
BD.A.SD.P	R4	0,43	0,151	0,015	2,86	21,9	0,38	0	0
F.BD.SD.P	R5	0,11	0,151	0,015	2,48	3,1	0,38	0	0
BD.F.SD.P	R6	0,5	0,151	0,015	2,86	22,6	0,38	0	0
O.BD.SD.I	R7	0,42	0,151	0,015	2,18	6,2	0,38	16	6,4
BD.O.SD.I	R8	0,48	0,151	0,015	2,86	21,2	0,38	16	6,4
A.BD.SD.I	R9	0,42	0,151	0,015	1,6	12,5	0,38	16	6,4
BD.A.SD.I	R10	0,56	0,151	0,015	2,86	21,5	0,38	16	6,4
F.BD.SD.I	R11	0,25	0,151	0,015	2,48	6,7	0,38	16	6,4
BD.F.SD.I	R12	0,53	0,151	0,015	2,86	21,7	0,38	16	6,4
O.BD.SC.P	R13	0,22	1,306	0,014	1,6	7,9	3,29	0	0
BD.O.SC.P	R14	0,44	1,306	0,014	2,27	25,1	3,29	0	0
A.BD.SC.P	R15	0,25	1,306	0,014	1,01	14,8	3,29	0	0
BD.A.SC.P	R16	0,42	1,306	0,014	2,27	22,7	3,29	0	0
F.BD.SC.P	R17	0,12	1,306	0,014	1,89	2,8	3,29	0	0
BD.F.SC.P	R18	0,43	1,306	0,014	2,27	28,2	3,29	0	0
O.BD.SC.I	R19	0,38	1,306	0,014	1,6	9,6	3,29	18,75	7,55
BD.O.SC.I	R20	0,51	1,306	0,014	2,27	20,3	3,29	18,75	7,55
A.BD.SC.I	R21	0,35	1,306	0,014	1,01	19,4	3,29	18,75	7,55
BD.A.SC.I	R22	0,52	1,306	0,014	2,27	26	3,29	18,75	7,55
F.BD.SC.I	R23	0,25	1,306	0,014	1,89	7,9	3,29	18,75	7,55
BD.F.SC.I	R24	0,52	1,306	0,014	2,27	23,8	3,29	18,75	7,55

Ren. : Rendement, ConsEn. : consommation en énergie, HT : heures de travail, CT : Coût Total, CDéh. : Coût de Désherbage, MB. : Marge Brute, EmCO2 : Emission de CO2, SelDép. : Sel déposé Irr. : Irrigation, Dés. : Désignation.

Le dispositif expérimental est composé de quatre grands compartiments cultivés des mêmes rotations culturales [O/BD, BD/O, A/BD, BD/A, F/BD, BD/F]. Deux types de rotations culturales sont testées : une céréale précédée par une céréale (C/C) et une céréale précédée par une légumineuse (C/L). Chaque culture est représentée par 4 indices [C (1), PC (2), TS (3), MC (4)], comme le montre la Figure 1.

La présente analyse porte sur 9 variables et 24 observations, comme l'illustre le tableau de données (Tableau 1).

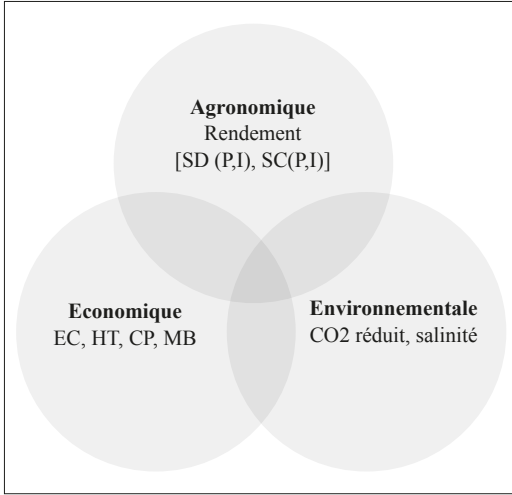
2.2. Méthodes et outils d'analyse des données

Analyse descriptive

L'analyse statistique descriptive appliquée, consiste à une comparaison de deux systèmes de production (SD et SC), basée sur des indicateurs [écarts relatifs] (Figure 2) pour les trois dimensions suivantes :

- Agronomique [indicateurs de mesure : rendement des cultures]
- Economique [indicateurs de mesure : heures

Figure 2 - Dimensions d'analyse et indicateurs de mesure.



de travail (HT), énergie consommée (EC), coût de production (CP), marge brute (MB)]

- Environnementale [indicateurs de mesure : dioxyde de carbone émis, sel déposé]

Analyse multivariée

L'objectif de l'analyse multivariée est de synthétiser les liens entre les variables par l'analyse des covariances ou des corrélations, de dresser une « carte » des individus et d'indiquer leurs positions par rapport à ces liens. L'analyse en composantes principales (ACP), proposée comme outil d'analyse, constitue un outil extrêmement puissant de synthèse de l'information et il est préconisé dans le cas de traitement et d'interprétation de données quantitatives complexes, en particulier les données exploratoires multidimensionnelles (Guerrien, 2003). Elle vise, également, à synthétiser les informations de départ seulement en quelques nouvelles variables groupées, appelées *composantes principales* (Helbling, 2018; Saracco *et al.*, 2018).

L'application de l'ACP pour la présente base de données [matrice (24,9)], permet l'extraction et la visualisation des informations importantes sous forme d'un nouvel ensemble plus réduit des variables. La synthèse des variables permet de mieux interpréter les résultats et d'analyser en profondeur les relations de dépendance entre les variables les plus déterminantes.

Afin d'appliquer correctement l'ACP, trois

conditions sont bien vérifiées, au préalable [corrélation des variables, indice de KMO et test de *Bartlett*]. L'application de l'ACP permet d' :

- étudier et visualiser les corrélations entre les variables qui décrivent les deux systèmes de production (conservation vs conventionnel), afin de limiter et de mieux regrouper les variables à mesurer par la suite ;
- obtenir, de construire des facteurs non corrélés, formés par des combinaisons linéaires des variables de départ et d'identifier les variables qui contribuent à chaque facteur. Chaque groupe de variables sera nommé selon le degré d'homogénéité des variables qui le composent ;
- élaborer une typologie des cultures, par type de dimension définie, d'évaluer et d'interpréter les potentialités de chaque système de production à travers la cartographie des cultures.

3. Résultats et discussions

3.1. Mesure des performances technicoéconomiques de l'agriculture de conservation

3.1.1. Effets des pratiques de conservation sur le rendement des cultures

Comparativement aux systèmes conventionnels, les rendements des cultures sous les systèmes de conservation, sont assujettis à des impacts variables. Les amplitudes de ces impacts mesurées en matière d'écart de rendements [q/ha] ($Ren^*.SD.(I,P) - Ren.SC.(I,P)$), dépendent essentiellement du précédent cultural et du régime de la conduite [pluvial ou irrigué].

Il ressort de l'analyse du Tableau 2 que :

- l'impact des pratiques de conservation sur les rendements des cultures, demeure variable, mais plus remarquable en pluvial qu'en irrigué ;
- le rendement de la culture de F/BD [groupe1] est meilleur en conventionnel qu'en conservation dans le régime pluvial ou irrigué. Cette chute de rendement varie de -0,05 q/ha [-4%] à -0,2 q/ha [3,5%] en pluvial et en irrigué, elle est expliquée, en

grande partie, par un problème technique de régalage de semoir ;

- de même, le rendement de la culture de BD/O [groupe 1] est meilleur sous le système conventionnel que le système de conservation, en irrigué, une chute de -1,4 q/ha [-5,7%] est remarquée. En revanche, le rendement de cette même rotation [groupe 2] est légèrement meilleur sous le système de conservation en pluvial. Une augmentation de 1q/ha [4,8%] est obtenue ;
- l'effet des pratiques de conservation sur le rendement demeure légèrement meilleur en pluvial qu'en irrigué pour les rotations suivantes [groupe 2] : O/BD, BD/F. Les améliorations en matière de rendement de ces deux cultures s'élèvent respectivement à 2,6

et 3, 5q/ha, soient respectivement des taux d'augmentation de 25,5% et 17% ;

- en revanche, l'effet des pratiques de conservation est meilleur en irrigué qu'en pluvial, pour les rotations [groupe 2] A/BD et BD/A et BD/F, les taux de variation sont respectivement 3,4 q/ha [20%], 2 q/ha [8,6%] et 0,5 q/ha [2%].

3.1.2. *Effets financiers et économiques*

3.1.2.1. Réduction du temps de travail du sol
 Sous les systèmes conventionnels, les besoins en heures de traction mécanique nécessaires pour l'installation d'une culture, allant de la phase de préparation du sol jusqu'au semis, sont variables et dépendent du type de rotations culturales. Le nombre d'heures (h) de traction,

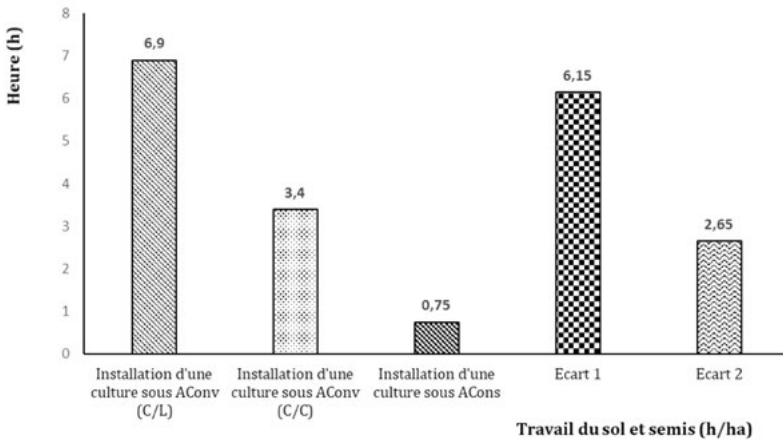


Figure 3 - Comparaison des besoins en heure de traction [h/ha, SD vs SC].

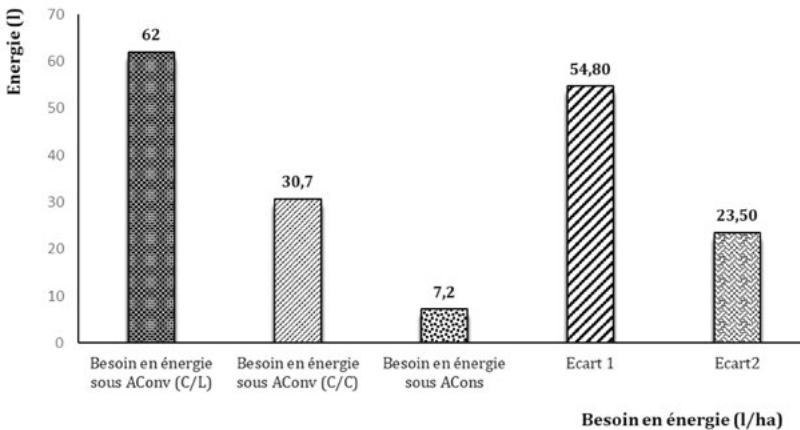


Figure 4 - Comparaison des besoins en énergie [l/ha, SD vs SC].

par hectare, s'élève à 3,4[C/C] et 6,9[C/L], alors que le système de conservation, requiert 0,75 h/ha. De ce fait, la conversion vers le système de conservation génère des économies plus importantes en heures de traction mécanique comparé au système cultural en conventionnel type C/L.

A l'échelle d'un hectare, ces économies s'élèvent à 6,15 h [Ecart 1] et 3,4 h [Ecart 2], respectivement pour le type de rotation C/L et C/C, soient des taux de réduction estimés respectivement à 89% et 78% par rapport aux mêmes systèmes en conventionnel, comme le montre la Figure 3.

3.1.2.2. Des économies variables en énergie fossile

La réduction du temps de traction s'est traduite par une moindre consommation en gasoil et les économies en énergie sont corrélées positivement au nombre d'heures de travail. Sous le système de conservation, le besoin d'énergie fossile pour l'installation d'une culture s'élève à 7,2 l/ha, alors qu'en conventionnel les besoins en énergie varient de 62 l/ha pour les rotations C/L et 30,7 l/ha pour les rotations type C/C. Les quantités réduites d'énergie sont respectivement de 54,8 l/ha [rotation C/L, écart1] à 23,5 l/ha

[rotation C/C, écart2] (Figure 4). Les économies relatives en énergie sont de l'ordre de 88,4% et 76,5% respectivement pour les rotations C/L et C/C.

3.1.2.3. Coût de désherbage post-semis

Le coût de désherbage post-semis constitue un coût supplémentaire pour les cultures installées sous le système de conservation à l'égard des systèmes conventionnels. Le coût de désherbage additionnel, à base de glyphosate, s'élève à presque +27% du coût total de traitement phytosanitaire.

3.1.2.4. Synthèse des indicateurs de la performance économique des deux systèmes SC et SD

La comparaison des écarts relatifs entre les deux systèmes de production [SD vs SC], en termes des coûts totaux de production (CTP), des produits totaux (PT) et des marges brutes (MB) des cultures montre une certaine performance économique variable, mais en faveur des systèmes de conservation à l'égard des systèmes conventionnels pour l'ensemble des rotations culturales [C/C et C/L] comme le montre le Tableau 3.

Tableau 3 - Synthèse des charges de production [DT/bloc], par mode de semis [P vs I].

Culture	Agriculture conventionnelle [P,I]						Agriculture de conservation [P,I]					
	O/BD	BD/O	A/BD	BD/A	F/BD	BD/F	O/BD	BD/O	A/BD	BD/A	F/BD	BD/F
Produits Totaux												
P.T [P, (SC, SD)]	12,3	33,0	19,9	31,6	9,9	32,2	15,5	34,6	22,9	32,2	9,6	37,7
P.T [I, (SC, SD)]	21,5	38,4	28,3	38,6	21,2	38,9	23,7	36,2	33,9	41,9	21,0	39,7
Coûts totaux de production												
CTP [SC (P), SD (P)]	7,7	9,6	8,2	9,6	6,9	9,6	6	7,9	6,5	7,9	5,2	7,9
CTP [SC (I), SD (I)]	15,3	17,2	15,8	17,2	14,4	17,2	12,4	14,3	12,9	14,30	11,6	14,34
*Vari. relative (%) [P]	-22	-18	-21	-18	-25	-18						
Vari. relative (%) [I]	-19	-17	-18	-17	-19	-17						
Marges brutes												
DT/bloc [P, (SC, SD)]	4,6	23,4	11,7	21,9	3,1	22,6	9,5	26,7	16,4	24,3	4,4	29,8
DT/bloc [I, (SC, SD)]	6,2	21,2	12,5	21,5	6,7	21,7	11,3	21,9	21	27,6	9,4	25,4
Vari. relative (%) [P]	107	14	40	11	42	32						
Vari. relative (%) [I]	82	3	68	28	40	17						

* Vari.relative : Variation relative: [CTP, MB] (SD-SC)*100/SC; SC représente le système conventionnel, SD représente le système de conservation.

L'analyse croisée des performances économiques des deux systèmes de production, montre que :

- l'avantage économique global en faveur du système de conservation n'est pas absolu. Il cache des avantages par poste en faveur du système conventionnel, tel que le cas du coût de traitement phytosanitaire ;
- les CTP des cultures [O/BD, de BD/A A/BD et de F/BD] sont réduits respectivement de -22.4%, -17.9%, -20.9% et -25% en pluvial, alors qu'en irrigué les réductions s'élèvent respectivement à -19%, -17%, -18% et -19% ;
- en pluvial, la performance économique [MB] des cultures sous le SD est nettement meilleure qu'en SC. En effet, la MB [O/BD] a presque doublé (107%), alors que les MB [F/BD, A/BD et BD/F] sont améliorées respectivement de 42%, 40% et 32%. En revanche, les MB [BD/O, BD/A] sont légèrement améliorées et elles varient de 14% à 11% ;
- en irrigué, d'une manière générale, la rentabilité économique des systèmes de cultures sous SD est meilleure que celle des systèmes conventionnels. Les rotations O/BD et A/BD sont les plus performantes (82% et 68%), alors que les rotations BD/A et F/BD sont moyennement performantes avec des taux respectivement de 28% et 40% ;
- les rotations culturales BD/O et BD/F sont relativement performantes, leurs améliorations sont respectivement de 3% et 17% ;
- les résultats économiques sont dans la majorité des cas en faveur des cultures sous le système de conservation. L'ampleur de ces résultats s'observe plus pour les systèmes culturaux sous AC en pluvial qu'en irrigué ;
- Finalement, les rendements des cultures sous les deux systèmes (SD vs SC) sont presque similaires aux rendements moyens de la région du Kef. Cette similitude est expliquée par l'application du paquet technique le plus répandu dans la région afin de faciliter des éventuelles comparaisons entre la station de la recherche et la réalité des agriculteurs.

3.1.3. Performances environnementales

3.1.3.1. Réduction de l'émission du gaz carbonique

Les systèmes conventionnels de production sont plus polluants en dioxyde de carbone gaz carbonique que les systèmes de conservation. Les ampleurs des réductions du gaz carbonique, à l'égard des systèmes culturaux conventionnels, s'élèvent à 147 kg /ha et 73 kg/ha respectivement pour les rotations C/C et C/L, comme le montre le Tableau 4.

3.1.3.2. Efficacité de gestion de l'eau d'irrigation et la salure du sol

L'efficacité des irrigations complémentaires exprimée en économie d'eau d'irrigation, s'élève à 7,85 m³/bloc, [374 m³/ha], soit 15,6% à l'égard du système conventionnel grâce à la couverture permanente du sol. Par conséquent, la quantité réduite du sel s'élève à 15,7 kg/bloc, soit 934 kg/ha, comme il est indiqué dans le Tableau 5.

Tableau 4 - Dioxyde de carbone émis par système de production.

	Rotation [C/C]		Rotation [C/L] céréale/légumineuse	
	SC	SD	SC	SD
Quantité d'énergie requise	30,7	7,2	62,2	7,2
Emission (Kg CO ₂ /bloc)	1,73	0,4	3,5	0,4
Emission (Kg CO ₂ /ha)	82	19	166	19
Réduction [Kg CO ₂ /ha]	73		147	

* La combustion d'un litre de gasoil émet 2,67 kg de CO₂ ; SC représente le système conventionnel, SD représente le système de conservation.

Tableau 5 - Sel déposé sous les systèmes irrigués [SD vs SC].

Mode de semis	Compartiments en irrigué		
	SD	SC	Ecart
Eau d'irrigation complémentaire*	42,5	50,35	7,85
Sel déposé (kg/bloc)	85	100,7	15,7
Sel déposé (kg/ha)	4047,6	4795,2	747,6

*Salinité de l'eau est de 2 g/l, bloc de 0.021 ha.

Tableau 6 - Contribution des variables par axe (après rotation).

Attributs	Axis_1		Axis_2		Axis_3	
	Corr.	% (Tot. %)	Corr.	% (Tot. %)	Corr.	% (Tot. %)
-						
EmCO2	0,971	94 % (94 %)	-0,077	1 % (95 %)	0,048	0 % (95 %)
ConsEn	0,971	94 % (94 %)	-0,077	1 % (95 %)	0,048	0 % (95 %)
HT	0,834	70 % (70 %)	0,242	6 % (75 %)	-0,014	0 % (75 %)
CDeh	-0,548	30 % (30 %)	0,657	43 % (73 %)	-0,101	1 % (74 %)
MB	0,249	6 % (6 %)	0,924	85 % (92 %)	-0,023	0 % (92 %)
Ren	-0,049	0 % (0 %)	0,894	80 % (80 %)	0,348	12 % (92 %)
SelDep	0,039	0 % (0 %)	0,081	1 % (1 %)	0,994	99 % (100 %)
Irr	0,042	0 % (0 %)	0,081	1 % (1 %)	0,994	99 % (100 %)
Var. Expl.	2,949	37 % (37 %)	2,168	27 % (64 %)	2,111	26 % (90 %)

Source : Output de Tanagra, 2023.

3.2. Analyse multidimensionnelle : Résultats de l'analyse en composantes principales

3.2.1. Vérification de la fiabilité de l'application de l'ACP à la matrice de données

La méthode de rotation orthogonale utilisée est la méthode de VARIMAX. La quantité d'information totale expliquée, est préservée même après rotation (90%), les nouvelles quantités d'informations expliquées par les axes F1, F2 et F3 sont respectivement 37%, 27% et 26%.

- L'analyse de la matrice des contributions des variables montre que les trois premières variables sont fortement corrélées au premier axe. Les variables, qui ont les poids les plus élevés sur ce facteur, sont « *heure de travail* » et « *énergie combustible utilisée* » en plus des « *émissions du gaz carbonique* ». Cette dimension représente l'efficacité d'utilisation de ces ressources et ses impacts sur l'environnement, il peut être nommé « *efficacité d'utilisation des ressources et performance environnementale* ».
- Le deuxième axe est représenté par trois variables de nature différente : une variable technique « *rendement* » et deux variables économiques « *coût de désherbage* » et « *marge brute* ». Cet axe exprime la « *performance technicoéconomique* ».
- Le troisième axe est représenté par deux principales variables « *irrigation* » et « *sel*

déposé ». Cet axe exprime « *la performance de pilotage d'irrigation et qualité d'eau* ».

3.2.2. Carte de représentation des individus

3.2.2.1. Interprétation du plan Factoriel (F1 vs F2)

L'analyse de la carte des individus (cultures), formée du plan factoriel (F1*F2) montre quatre principaux groupes bien distincts (Figure 5).

La répartition des cultures, par composante est synthétisée dans le Tableau 7.

Première composante

Cette composante est formée par des combinaisons culturelles uniquement en conventionnel [P et I], les plus exigeantes en ressources, les moins performantes sur le plan environnemental et les plus performantes sur le plan technicoéconomique.

En outre, cette composante est subdivisée en deux sous-composante distinctes : la première sous composante [R12 et R24] est constituée par la culture de BD/F[I,P], alors que la deuxième sous composante [R08, R22, R10 et R20] est constituée par la culture de BD avec des précédents cultureux type graminée (orge et avoine).

Cette classification montre que les cultures de la première sous composante sont les plus performantes sur le plan technicoéconomique et exigeantes en ressources, en plus d'impact négatif sur l'environnement (CO₂) alors que la deuxième sous-composante est formée par des cultures moins exigeantes en ressources avec une performance environnementale relativement meilleure.

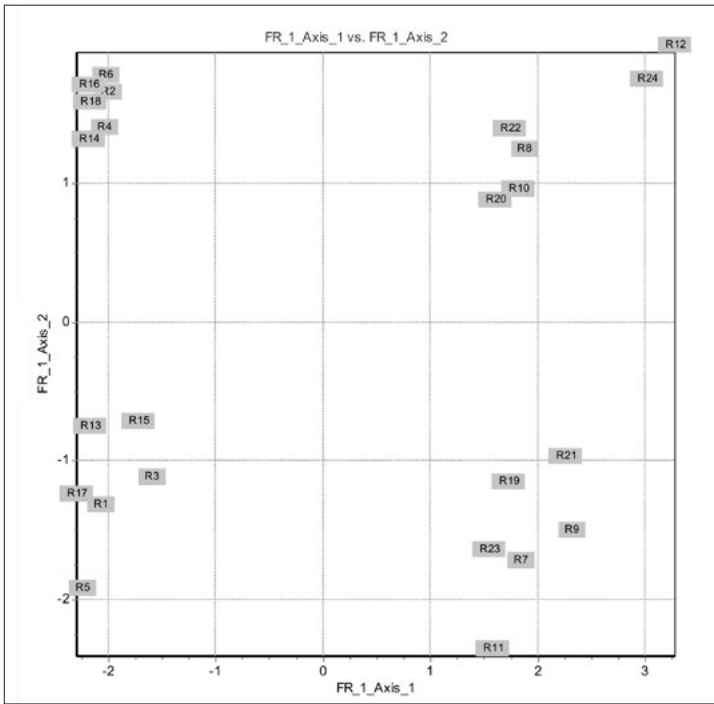


Figure 5 - Cartographie des individus (F1 vs F2).

Les résultats obtenus sont en harmonie avec la réalité. La culture de blé dur ayant précédé cultural, type légumineuse [féverole], nécessite plus d’heures de traction et consomme plus d’énergie. Par conséquent, elle émet plus de dioxyde de carbone comparativement à un précédent cultural, type graminée [avoine ou orge].

Deuxième composante

Cette composante est formée par les cultures, uniquement sous les systèmes de conservation [combinaisons de BD (I, P)]. Elles sont les plus performantes sur le plan environnemental et sur le plan technico-économique et les moins exi-

geantes en ressources. La performance environnementale est exprimée par la faible pollution en dioxyde de carbone alors que la performance économique est exprimée par l’effet du précédent cultural sur le rendement conjugué au prix élevé de ce produit sur le marché.

Troisième composante

Cette composante résulte l’ensemble des cultures, en conventionnel, les moins performantes sur le plan technicoéconomique et les plus émettrices du dioxyde de carbone. Elle est constituée par les cultures d’orge, de féverole et d’avoine en pluvial et en irrigué en conven-

Tableau 7 - Typologie des cultures du plan factoriel (F1*F2).

	<i>Composante 1</i>	<i>Composante 2</i>	<i>Composante 3</i>	<i>Composante 4</i>
Cultures*	<u>R12</u> : BD.F.SC.P	<u>R06</u> : BD.F.SD.P	<u>R21</u> : A.BD.SC.I	<u>R15</u> : A.BD.SD.I
	<u>R24</u> : BD.F.SC.I	<u>R16</u> : BD.A.SD.I	<u>R19</u> : O.BD.SC.I	<u>R13</u> : O.BD.SD.I
	<u>R08</u> : BD.O.SC.P	<u>R02</u> : BD.O.SD.P	<u>R09</u> : A.BD.SC.P	<u>R03</u> : A.BD.SD.P
	<u>R22</u> : BD.A.SC.I	<u>R18</u> : BD.F.SD.I	<u>R23</u> : F.BD.SC.I	<u>R17</u> : F.BD.SD.I
	<u>R10</u> : BD.A.SC.P	<u>R04</u> : BD.A.SD.P	<u>R07</u> : O.BD.SC.P	<u>R01</u> : O.BD.SD.P
	<u>R20</u> : BD.O.SC.I	<u>R14</u> : BD.O.SD.I	<u>R11</u> : F.BD.SC.P	<u>R05</u> : F.BD.SD.P

* SC: désigne le système conventionnel ; SD désigne le système de conservation.

tionnel. Ces cultures sont caractérisées par des rendements moyens avec des prix de vente relativement faibles. La culture de féverole demeure la moins performante sur le plan économique et environnemental.

Quatrième composante

La dernière composante est formée par les mêmes cultures que la troisième composante, mais en conservation. L'ensemble de ces cultures [avoine, orge avec différents précédents culturaux] est caractérisé par une bonne performance environnementale et une performance technicoéconomique moyenne. En revanche, la culture de féverole demeure un peu éloignée par rapport au reste des cultures de la composante, c'est la plus performante coté environnemental et moins performante coté économique.

Les conclusions qui peuvent être tirées de l'analyse du premier plan factoriel (F1*F2), sont :

- le demi-plan supérieur, formé par les deux composantes 1 et 2, contient uniquement la culture de blé dur, avec différents précédents culturaux. Ces deux composantes sont antagonistes sur le plan système de culture [composante 1 : conventionnel vs composante 2 : conservation] et sur le plan besoin en ressources et performances économique aussi. Cette typologie met en évidence que les pratiques de conservation sont moins exigeantes en heures de travail et en énergie fossile, indépendamment du système de production pluvial ou irrigué ;
- le demi-plan inférieur, formé par les deux composantes 3 et 4, contient les cultures d'orge, d'avoine et de féverole. Ces deux composantes sont aussi antagonistes sur le plan système de culture [composante 3 : conventionnel vs composante 4 : conservation] et sur le plan besoin en ressources et performance économique. Cette typologie met évidence que les pratiques de conservation sont moins exigeantes en heures de travail et en énergie fossile, indépendamment du système de production, pluvial ou irrigué. En revanche, les performances technicoéconomiques des cultures d'orge et d'avoine sont nettement meilleurs en conservation qu'en conventionnel.

4. Synthèse et comparaison des performances des systèmes de conservation à l'égard des systèmes conventionnels

Les systèmes de culture basés sur la simplification du travail du sol ne sont pas trop performants sur tous les aspects comparativement aux systèmes conventionnels basés sur le labour, comme il est indiqué dans le Tableau 8.

- *Performance économique* : les systèmes de conservation sont en général, plus performants que les systèmes conventionnels, en termes des coûts totaux de production par type de culture installée. En revanche, les systèmes de conservation nécessitent des coûts additionnels de désherbage et ces coûts sont généralement absorbés par l'amélioration des rendements et les économies en temps de travail du sol. En matière de marges brutes, la performance est en faveur des systèmes de conservation, exception faite pour la culture de féverole qui demeure en conventionnel.
- *Allocation des ressources* : les systèmes de conservation sont distingués par une meilleure allocation des ressources [heure de travail et énergie fossile] que les systèmes conventionnels.
- *Performance technique* : les systèmes de conservation sont caractérisés par une stabilité, voire des améliorations des rendements à l'égard des systèmes conventionnels. A l'équilibre écologique (3 à 7 ans), des améliorations nettes pourraient être mieux constatées.
- *Performance environnementale* : les systèmes de conservation réduisent davantage l'émission du gaz à effet de serre (CO₂) causé par la combustion d'énergie fossile en plus ils favorisent la séquestration du carbone et la réduction du processus de minéralisation de la matière organique. La réduction de la salure des sols compte aussi un point fort de ces systèmes de production en irrigué à l'égard des systèmes conventionnels. En revanche, le désherbant « glyphosate », utilisé en AC, demeure une molécule cancérigène et très polluante et peut-être lessivée facilement par les eaux de pluie et elle risque de contaminer les ouvrages de rétention des eaux (externalité négative).

Tableau 8 - Comparaison des performances des systèmes de conservation à l'égard des systèmes conventionnels.

Performance	Agriculture Conventiennelle		Agriculture de conservation	Conclusion
	Rotations C/C	Rotations C/L	Rotations C/C et C/L	
<i>Allocation des ressources</i>				
Préparation du sol	2-3 recroisements [2,75 h/ha]	1 gros labour et 2 à 3 recroisements [6,9 h/ha]	Suppression totale du labour	Aération biologique du sol à travers les rotations
Semis	Semis conventionnel [0,66 h/ha]		Semis direct [0,75 h/ha]	Gain du temps de travail sous AC
Besoin en énergie	30,7 l/ha	62 l/ha	7,5 l/ha	Gain d'énergie sous AC
<i>Economique</i>				
Coût de désherbage	Coût réduit de -27%, vs l'AC		Coût additionnel de +27% vs de l'AC	Coût supplémentaire de désherbage avant semis en AC
Coût de production	Coût total de production varie de +17 à +22% à l'égard de l'AC	Coût total de production de +25% à l'égard de l'AC	Réduction du coût total de production varie de -17% à -25%, à l'égard du SC	Coût de production généralement réduit sous AC
Marge brute	MB [O] réduite de -107% vs AC	MB [BD] réduite de -11% vs AC	Amélioration de 11% [O] à 107% [BD] vs conventionnel	Marge brute par culture généralement améliorée sous AC
<i>Technique</i>				
Rendement	Rendements réduits de -10% à -25% pour les cultures d'orge et avoine, à l'égard de l'AC	Stabilité ou légère augmentation pour le cas du BD à l'égard de l'AC	Rendements meilleurs, de 10 à 25,5% [O, A] vs conventionnel	Stabilité voire amélioration des rendements sous AC
<i>Environnementale</i>				
Emission du CO ₂	Emission du dioxyde carbone de 82 kg/ha	Emission du dioxyde carbone de 166 kg/ha	Emission du dioxyde carbone de 19 kg/ha	Réduction du gaz à effet de serre
Salure des sols	Salure des sols en irrigation complémentaire : 4795,2 kg/ha		Salure des sols en irrigation complémentaire : 4048 kg/ha	Dégradation de la qualité du sol plus rapide en conventionnel
Glyphosate	-	-	Glyphosate de 1 à 2 l/ha	Molécule cancérigène

5. Conclusion

L'intensification écologique de l'agriculture tunisienne est apparue comme une nouvelle approche de production agricole qui vise une gestion rationnelle et durable des ressources naturelles et de remédier aux problématiques de l'agriculture intensive conventionnelle. Les pratiques agricoles de conservation, dont l'AC fait partie, cherchent à répondre à un défi majeur : assurer une sécurité alimentaire durable du pays sans dégrader et nuire à la qualité des ressources naturelles. Les travaux de recherche qui ont accompagné la phase d'expérimentation et d'introduction de l'AC chez les agriculteurs sont focalisés, dans la plupart des cas, sur la me-

sure de diffusion ou des aspects techniques fins. La présente étude s'est proposée d'analyser, de manière systémique, les effets potentiels sur les plans technicoéconomique et environnemental, des systèmes de conservation comparativement aux systèmes conventionnels en pluvial et en irrigué à l'échelle d'une parcelle expérimentale.

Les résultats, en termes d'économie en ressources, sont en faveur des systèmes de conservation à l'égard des systèmes conventionnels, en matière du temps de travail et d'énergie fossile. Les ampleurs de ces économies dépendent des itinéraires de production en conventionnel et elles sont plus perçues en cas des itinéraires complexes de travail de sol [rotations à base de

légumineuse]. L'analyse multidimensionnelle appliquée aux résultats des expériences comparatives de deux systèmes de production [SC vs SD] à l'échelle d'une station de recherche expérimentale située dans une zone semi-aride, montre une stabilité de la production en faveur de l'AC. En effet, les rendements des cultures sont légèrement meilleurs pour la culture d'orge et d'avoine sous les systèmes de conservation qu'en conventionnel, alors que pour la culture de féverole, le rendement demeure meilleur sous le deuxième système que le premier. En revanche, les effets économiques demeurent variables et sont nettement meilleurs pour les cultures d'orge et d'avoine [+50%] alors que pour la culture de blé dur est légèrement meilleur. Le coût supplémentaire de désherbage est généralement absorbé par le gain en consommation d'énergie et parfois par le surplus de la production. Les pratiques de conservation conviennent mieux aux systèmes pluviaux et la gestion intégrée de mulch et du sol permet aux cultures de bien gérer les périodes de stress hydriques. Le bilan environnemental, demeure aussi important et il est manifesté par des réductions considérables des émissions du gaz carbonique dues à la combustion d'énergie fossile. En guise, les résultats technicoéconomiques et environnementaux obtenus à l'échelle de la station de recherche de l'ESA-Kef, pourraient servir comme un outil d'aide à la décision pour les agriculteurs et les décideurs. Ainsi, les résultats du présent travail contribuent à l'élaboration I) d'un référentiel technicoéconomique permettant l'amélioration de l'adoption et la diffusion de l'AC chez un nombre plus élevé d'agriculteurs, et II) des nouvelles stratégies d'adaptation au changement climatique qui permettent de renforcer la durabilité des systèmes de production agricole en Tunisie notamment dans un contexte de sécheresse prolongée.

Références bibliographiques

- Bastiège M., Favreau F., 2019. Management des ressources naturelles, le retour de l'État régalién ? *Revue Politiques et Management Public*, 4: 353-370.
- Bekin N., Prois Y., Laronne J., Egozi R., 2021. The fuzzy effect of soil conservation practices on runoff and sediment yield from agricultural lands at the catchment scale. *Catena*, 207: 105710. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105710>.
- Ben-Hammouda M., Thabet B., Talbi S., 2010. *Retombées technico-économiques et environnementales de l'agriculture de conservation*. Presented at the *Séminaire National : Dix ans d'Agriculture de Conservation en Tunisie : Bilan et Perspectives*, Tunis, 28 octobre 2010.
- Bommarco R., Kleijn D., Potts S.G., 2013. Ecological intensification: harnessing ecosystem services for food security. *Trends in Ecology & Evolution*, 28: 230-238. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2012.10.012>.
- Bouzaida M.A., Doukali H., 2019. Évaluation de la durabilité des exploitations agricoles irriguées en zones arides tunisiennes par la méthode IDEA: cas de la région de Zarzis. *New Medit*, 18(4): 89-104. <https://doi.org/10.30682/nm1904g>.
- Brooks J., Deconinck K., Giner C., 2019. *Three key challenges facing agriculture and how to start solving them*, June 6, OECD. <https://www.oecd.org/agriculture/key-challenges-agriculture-how-solve/>.
- Chabert A., Sarthou J.-P., 2020. Conservation agriculture as a promising trade-off between conventional and organic agriculture in bundling ecosystem services. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 292: 106815. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106815>.
- Cusser S., Jha S., Lonsdorf E., Ricketts T., 2023. Public and private economic benefits of adopting conservation tillage for cotton pollination. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 342: 108251. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108251>.
- Dhehibi B., Fouzai A., Frijia A., Adhim M.A., M'hamed H.C., Ouerghemmi H., Rekik M., 2023. Assessing complementary synergies for integrated crop-livestock systems under conservation agriculture in Tunisian dryland farming systems. *Frontiers in Sustainable Food System*, 6: 1022213. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.1022213>.
- Diogo R., Adodo P., Nouatin G.S., Djedje M., 2018. Durabilité agroécologique et déterminants du degré d'investissement des producteurs dans la gestion durable des terres au nord-est du Bénin. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin*, Numéro Spécial Développement Agricole Durable (DAD), pp. 75-86.
- FAO, 2022. *L'agriculture de conservation*. <https://www.fao.org/3/cb8350fr/cb8350fr.pdf>.
- Friedrich T., Derpsch R., Kassam A., 2012. Overview of the Global Spread of Conservation Agriculture. *Field Actions Science Reports*, 6. <https://journals.openedition.org/factsreports/1941>.

- Ghali M., Daniel K., Colson F., Sorin S., 2014. L'agriculture écologiquement intensive. Une approche économique. *Economie Rurale*, 341: 83-99. <https://doi.org/10.4000/economierurale.4338>.
- Guerrero S., 2021. *Characterising agri-environmental policies: Towards measuring their progress*. OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers, No. 155. Paris: OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/41257e3c-en>.
- Guerrien M., 2003. L'intérêt de l'analyse en composantes principales (ACP) pour la recherche en sciences sociales. *Cahiers des Amériques latines*, 43: 181-192.
- Helbling D.J.-M., 2018. *MATH 444 – Statistique multivariée*.
- Jacobs A.A., Evans R.S., Allison J.K., Garner E.R., Kingery W.L., McCulley R.L., 2022. Cover crops and no-tillage reduce crop production costs and soil loss, compensating for lack of short-term soil quality improvement in a maize and soybean production system. *Soil and Tillage Research*, 218: 105310. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105310>.
- Joumard I., Arriola C., Dek M., 2020. *Challenges and opportunities of India's enhanced participation in the global economy*. OECD Economics Department Working Papers, No. 1597. Paris: OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/a6facd16-en>.
- Kumar A., Pant S., 2023. Analytical hierarchy process for sustainable agriculture: An overview. *MethodsX*, 10: 101954. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2022.101954>.
- Laurent F., 2015. L'Agriculture de Conservation et sa diffusion en France et dans le monde. *Cybergeo: European Journal of Geography*, 747. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.27284>.
- Mendes I.D.C., Souza L.M.D., Sousa D.M.G.D., Lopes A.A.D.C., Reis Junior F.B.D., Lacerda M.P.C., Malaquias J.V., 2019. Critical limits for microbial indicators in tropical Oxisols at post-harvest: The FERTBIO soil sample concept. *Applied Soil Ecology*, 139: 85-93. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.025>.
- Muhie S.H., 2022. Novel approaches and practices to sustainable agriculture. *Journal of Agriculture and Food Research*, 10: 100446. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100446>.
- Peccia T., Kelej R., Hamdy A., Fahmi A., 2017. A reflection on Public-Private Partnerships contribution to the attainment of Sustainable Development Goals. *Science & Peace*, VIII(1): 81-103.
- Rouabhi A., Laouar A., Mekhlouk A., Dhehibi B., 2019. Socioeconomic assessment of no-till in wheat cropping system: a case study in Algeria. *New Medit*, 18: 52-64. <https://doi.org/10.30682/nm1901e>.
- Saracco J., Chavent M., Audin-Garcia L., Lespinet-Najib V., Ron-Angevin R., 2018. Classification de variables et analyse multivariée de données mixtes issues d'une étude BCI. *Ingénierie cognitive*, 2(1). <https://doi.org/10.21494/ISTE.OP.2018.0311>.
- Thierfelder C., Matemba-Mutasa R., Rusinamhodzi L., 2015. Yield response of maize (*Zea mays* L.) to conservation agriculture cropping system in Southern Africa. *Soil and Tillage Research*, 146: 230-242. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.10.015>.
- Zahm F., Alonso Ugaglia A., Barbier J.-M., Boureau H., Del'homme B., Gafsi M., Gasselin P., Girard S., Guichard L., Loyce C., Manneville V., Menet A., Redlingshöfer B., 2019. Évaluer la durabilité des exploitations agricoles. La méthode IDEA v4, un cadre conceptuel combinant dimensions et propriétés de la durabilité. *Cahiers Agricultures*, 28: 5. <https://doi.org/10.1051/cagri/2019004>.