

Sustainability of irrigated farms in south-eastern Tunisia: Case of the private irrigated perimeter of Bsissi-Oued El Akarit, Gabes

Durabilité des exploitations irriguées dans le sud-est Tunisien: Cas du périmètre irrigué privé de Bsissi-Oued El Akarit, Gabès

HASSEN ABDELHAFIDH¹; NACEUR MAHDHI², MANEL HAMED¹

¹Labo Ecole Supérieure d'Agriculture de Mograne, Université de Carthage, Tunisie

²Institut des Régions Arides de Médenine, Tunisie

*Corresponding author: Abdelhafidhassen@yahoo.fr

Abstract - The target of this study is to assess the sustainability of irrigated farms in the governorate of Gabes in south eastern of Tunisia. The IDEA method (Indicators of Sustainability of Agricultural Operations) is adopted for this purpose. Then, on the basis of the obtained scores of sustainability, a principal component analysis (ACP) is carried out to identify a typology of farms according to their sustainability. The results obtained from 27 farms show a variability of sustainability within them. The economic sustainability is the strong component of this agriculture. It reached 74.4% of the theoretical maximum level for all farms. Agro-ecological sustainability is characterized by relatively lower amplitude of the scores at the level of its various indicators. Socio-territorial sustainability is the weak point of these farms, ie 38.7% of the theoretical maximum level. The results from the three sustainability scales show that farms still have the potential to improve their sustainability through the promotion of agricultural practices (use of pesticides, protection of soil resources), diversification of cropping systems (annual and temporary diversity), integration of breeding (animal diversity) and management of organic matter at the agro-ecological scale, and the improvement of indicators related to the accessibility of space and training (training day) at the socio-territorial level and the improvement of the productive efficiency process at the economic level. The results of the ACP show that farms adopting an integrated production system are relatively endowed with better sustainability thanks to a diversification of the practiced activities. Finally, regarding the obtained results, decision-makers can design their strategies taking into account the recorded strengths and weaknesses through the implementation of an awareness and training program for farmers.

Keywords : Sustainability ; IDEA; Arid Area; Irrigated agriculture; Tunisia.

Resumé - L'objectif de cette étude est d'évaluer la durabilité des exploitations en irrigué dans la zone de Bsissi au sud tunisien. La méthode IDEA (Indicateurs de Durabilité des Exploitations Agricoles) est adoptée pour cette fin. Ensuite, sur la base des scores de durabilité obtenus une analyse en composante principale est effectuée pour identifier une typologie d'exploitations selon leurs durabilités. Les résultats obtenus auprès de 27 exploitations montrent une variabilité des niveaux de durabilité au sein de celles-ci. La durabilité économique constitue le point fort de cette agriculture. Elle atteint 74.4% du maximum théorique pour l'ensemble des exploitations. La durabilité agro-écologique se caractérise par une amplitude des scores au niveau de ses différents indicateurs relativement plus faible. La durabilité socio-territoriale constitue le point faible de ces exploitations soit 38.7% du maximum théorique. Les résultats issus des trois échelles de durabilité montrent que les exploitations ont encore un potentiel d'amélioration de leur durabilités à travers la promotion des pratiques agricoles (usage des pesticides, protection de la ressource sol), la diversification des systèmes de culture (diversité annuels et temporaires), l'intégration de l'élevage (diversité animale) et la gestion des matières organiques à l'échelle agro-écologique, et l'amélioration des indicateurs liés à l'accessibilité de l'espace et à la formation (journée de formation) à l'échelle socio-territoriale et à l'amélioration de l'efficacité du processus productif à l'échelle économique. Les résultats de l'ACP montrent que les exploitations adoptant un système de production intégré sont relativement dotées d'une meilleure durabilité grâce à la diversification des activités pratiquées. Enfin sur la base des résultats dégagés les décideurs peuvent concevoir leurs stratégies en tenant compte des forces et des faiblesses enregistrées à travers la mise en œuvre d'un programme de sensibilisation et de formation des agriculteurs.

Mots clés : Durabilité ; IDEA ; Zones Arides ; Agriculture irriguée ; Tunisie.



1. Introduction

La production agricole contribue de manière significative, au changement climatique, à la pollution de l'eau et à la perte de biodiversité, et à une concurrence croissante sur les ressources naturelles (Steinfeld et al., 2006).

La durabilité et la multifonctionnalité de l'agriculture sont devenues des objectifs largement partagés par la communauté scientifique et les décideurs publics. En effet, l'agriculture demeure fortement accusée par l'épuisement des ressources naturelles et la dégradation de l'environnement d'une part, de l'autre elle contribue à la fourniture de services non marchands (multifonctionnalité) qui dépassent la seule production de biens alimentaires (Elfkhi et al 2012). Le modèle agricole encore dominant qualifié de « productiviste » s'est traduit par des systèmes de production agricole très consommateurs d'intrants chimiques (produits phytosanitaires, engrais minéraux). Ce modèle est caractérisé par une forte mécanisation des moyens de production, permettant à la fois de réduire la pénibilité de certains travaux, mais aussi de se déconnecter des potentialités du milieu naturel et de résoudre les difficultés posées par une main d'œuvre parfois indisponible. En privilégiant l'amélioration de la productivité et des performances économiques, l'agriculture devient responsable de nombreux impacts négatifs et à la transformation du paysage rural.

Ces préoccupations sociales qui se posent concernant l'impact de la production agricole sur la santé publique et le bien-être des animaux et la diminution de la rentabilité des exploitations agricoles imposent la reconnaissance de l'urgence du développement durable de la production agricole. C'est pourquoi dans nos jours, il est devenu impératif d'évaluer non seulement la durabilité économique des exploitations agricoles, mais aussi leur durabilité environnementale et socio-territoriale.

La relation eau/agriculture revêt aujourd'hui une acuité majeure. Dans un contexte marqué à la fois par une pression démographique croissante conjuguée à l'urbanisation consommatrice de terres agricoles et à une forte évolution des pratiques alimentaires dans certaines parties du globe, il est impératif d'intégrer pleinement les exigences environnementales et le changement climatique. En particulier, la gestion de la ressource en eau est devenue une préoccupation majeure du monde entier. La Tunisie se place dans la catégorie des pays les moins dotés en ressources en eau dans le bassin méditerranéen. Ces ressources sont relativement faibles et leurs mobilisations est quasiment arrivée à terme avec, 95% du potentiel du pays. (Abdelhafidh et Bachtta, 2016). Toutefois, si dans un passé non lointain ces ressources sont parues suffisantes, voir même abondantes pour le développement agricole en zones arides, la situation actuelle n'est plus tellement rassurante. Les profondes mutations survenues aux cours des quarante dernières années se sont traduites par des évolutions marquées et rapides des systèmes de production et des modes d'exploitations et de gestion des ressources naturelles. C'est ainsi qu'on assiste à l'amorce de l'exploitation accrue des eaux souterraines et du développement de l'arboriculture et de l'extension remarquable du potentiel irrigable (469000 ha en 2012) aux dépens des espaces pastoraux, notamment, sur la zone littorale liée à des transferts de propriété foncière. Dans ce contexte, la complémentarité spatiale des systèmes agraires a disparu pour faire place à des systèmes de production interconnectés dont la dynamique s'exprime par une compétition pour l'accès aux ressources naturelles dont notamment les ressources en eau souterraine dans le sud-est tunisien. Toutefois, le secteur irrigué se trouve aujourd'hui parmi les secteurs les plus critiqués, que ce soit en matière de pollution environnementale, de sécurité alimentaire, de rôle paysager ou de performance économique. Dans plusieurs régions du sud-est tunisien, la surexploitation des ressources en eau souterraine a conduit à des risques environnementaux, économiques et sociaux. Devant la baisse de débit de leur forage les irrigants se trouvent obligés à investir toujours pour continuer de disposer d'eau douce en quantité suffisante pour leurs cultures, soit à modifier leurs systèmes de cultures pour s'adapter à la rareté et la surexploitation des ressources en eau souterraine (Mahdhi et al, 2016). En l'absence de politiques spécifiques les différences s'accroissent entre les exploitations agricoles qui ont les moyens d'investir toujours plus pour avoir suffisamment d'eau et celles qui doivent adapter leurs cultures à la pénurie. Ainsi des interrogations peuvent être posées : est-il possible de soutenir la durabilité de ses pratiques de gestion ?

Faire face à ces problèmes nécessite d'inviter les exploitations agricoles de s'inscrire de plus en plus dans un objectif de durabilité encourageant une agriculture écologiquement saine, socialement équitable et économiquement viable. Ce travail vise l'évaluation de la durabilité des exploitations en irrigué dans le sud-est tunisien où l'agriculture joue un rôle crucial dans le développement local.

En Tunisie, l'évaluation de la durabilité est un sujet relativement récent et les essais réalisés dans ce domaine, malgré leur importance et utilité, restent limités où plusieurs systèmes de production présentent, aujourd'hui, des failles importantes au niveau de la durabilité et demandent la prise de mesures concrètes afin d'améliorer la durabilité (AVFA, 2016). Une agriculture durable doit être

économiquement viable, écologiquement saine et socialement équitable (Francis et Youngberg, 1990, Zahm et al, 2019). Les exploitations agricoles durables doivent donc concilier au mieux entre ces trois objectifs, dans le contexte de leur territoire et de leur système agraire. Toutefois, ce concept reste assez flou et implique une certaine réflexion quant aux critères à retenir pour évaluer les différentes composantes de la durabilité d'une exploitation agricole. Quelle sont les variables qui pourraient représenter de façon synthétique les trois échelles de la durabilité ci-dessus avancées.

Pour permettre la transition vers une production plus durable, un large éventail d'outils a été développé pour mieux comprendre la performance en matière de durabilité des systèmes agricoles. Les outils d'évaluation de la durabilité fondés sur des indicateurs varient considérablement en termes de portée (géographique et sectorielle), de groupes cibles (par exemple, agriculteurs ou décideurs), en terme de sélection des indicateurs, de la méthode d'agrégation et de pondération, ainsi que le temps nécessaire pour leurs exécutions (Marchand et al., 2014; Schader et al., 2014).

Bien que plusieurs auteurs soulignent l'importance de l'intégration des thèmes environnementaux, économiques et sociaux dans les outils de l'évaluation du développement durable, les thèmes et les outils environnementaux perçoivent souvent plus d'attention (Binder et al., 2010; Finkbeiner et al., 2010; Lebacqz et al., 2013; Marta-Costa and Silva, 2013; Schader et al., 2014).

En particulier, l'approche IDEA (Indicateurs de la durabilité des exploitations agricoles), est utilisée dans ce papier pour évaluer la durabilité des exploitations agricoles dans la zone de Bsis-Gabès en première phase et d'examiner les résultats esquissés afin d'étudier l'influence du comportement et des pratiques des agriculteurs sur la durabilité de l'agriculture en seconde phase.

2. Méthodologie

2.1 Choix de la méthode

Le choix est axé sur la méthode IDEA car il s'agit d'un essai de quantification de la durabilité. C'est une méthode de scoring qui évalue la durabilité d'une exploitation agricole à partir de 42 indicateurs structurés dans trois échelles de durabilité indépendantes (l'échelle de durabilité agroécologique, l'échelle de durabilité socioéconomique et l'échelle de durabilité socio-territoriale) et offre un contenu pratique à la notion de durabilité à l'échelle de l'exploitation. Chacune de ces trois échelles est subdivisée en trois ou quatre composantes qui synthétisent les grandes caractéristiques fondamentales du diagnostic de durabilité (Girardin et al., 2004).

2.2 Base conceptuelle de la méthode IDEA

Plusieurs définitions d'un modèle de développement durable existent. En 1988, le groupe consultatif pour la recherche agricole internationale considère que «l'agriculture durable consiste à gérer de manière efficace les ressources utilisables pour l'agriculture dans le but de satisfaire les besoins changeants de l'être humain, tout en veillant au maintien, voir à l'amélioration de la qualité de l'environnement, ainsi qu'à la préservation des ressources naturelles». HARWOOD définit l'agriculture durable comme «une agriculture capable d'évoluer indéfiniment vers une plus grande utilité pour l'homme, vers une meilleure efficacité de l'emploi des ressources et vers un équilibre avec le milieu qui soit bénéfique à la fois pour l'homme et pour la plupart des autres espèces» (Harwood, 1990). Dans la méthode IDEA, on retient qu'une agriculture durable repose sur trois grandes fonctions essentielles: la fonction de production de biens et services, la fonction de gestionnaire de l'environnement et la fonction d'acteur du monde rural.

2.3 Les indicateurs de durabilité

Les indicateurs de durabilité sont présentés par échelle dans les tableaux 5,6et 7. Le défaut de certaines données rend l'évaluation de certains indicateurs difficile. En ce sens, Zahm et al. (2008) déclarent: «Il serait irréaliste de croire qu'une méthode unique pourrait couvrir tous les types de production. En effet, Les indicateurs devront être adaptés aux contextes locaux tout en continuant à respecter les principes clés de leur construction scientifique ». Pour ces raisons, une adaptation de la méthode IDEA à la présente étude de cas a été entreprise. Au total, 39 indicateurs ont été sélectionnés et adaptés à l'étude de cas, conduisant par conséquent à un nouveau système de notation.

2.2 L'analyse en composante principale

Une analyse par composante principale (ACP) qui nous a permis de définir les principaux facteurs caractérisant les exploitants et faire une typologie de ces derniers. Cette analyse a été faite par le logiciel SPSS. Elle consiste à extraire de nouvelles variables, facteurs qui sont en fonction des anciens et qui sont plus informatifs possibles à propos de l'ensemble des relations entre variables initiales. Elle permet de définir les relations latentes entre les variables. L'extraction des composantes principales est faite

sur la base de valeurs propres supérieures à l'unité. Les valeurs propres correspondent aux quantités d'information extraites par chacun des facteurs. Ceci se comprend par la mesure où tout facteur pris isolément est porteur d'une quantité d'information égale à 1. Un facteur qui extrait une quantité d'information moindre que 1 est donc moins porteur d'information qu'une variable prise isolément et par conséquent n'a en général pas grand intérêt.

L'ACP a été effectué par l'introduction de 15 indicateurs de durabilité choisis parmi les 39 utilisés. Le choix a été basé sur la relation d'indépendance ou de très faible colinéarité entre les indicateurs ainsi que sur la quantité d'information apportée pour la définition des nouvelles composantes. Cette analyse nous a permis aussi de faire une typologie des exploitations selon leurs scores de durabilité. Ceci permettra de caractériser chacun des types d'exploitations obtenus.

1.3 Collecte des données

La zone d'étude est le périmètre irrigué privé d'El Bsissi-Oued El Akarit qui est une plaine côtière localisée dans le gouvernorat de Gabès situé dans le sud-est de la Tunisie. Cette zone, d'une superficie totale de 5122 ha, est délimitée par la mer à l'Est, la route GP1 à l'Ouest, l'oued El Akarit au Nord et l'oued El Maleh au Sud. Les ressources en eau sont assurées par deux nappes : La nappe phréatique dont le potentiel des ressources est de 1,25 Mm³ /an. La salinité de l'eau est globalement de 4 g/l. Cette nappe est exploitée par des puits de surface. On dénombre 380 puits dont 364 sont équipés et 18 non exploités. La nappe de Djefara très peu renouvelable, est renfermée dans les sables miopliocènes entre 40 et 100 m de profondeur. La salinité est de l'ordre de 3,5 à 5 g/l. Les données présentées ont été recueillies par des enquêtes auprès de 27 agriculteurs du périmètre El Bsissi. La superficie totale des exploitations enquêtées est de la valeur de 778 ha, cependant la superficie utile est égale à 636 ha répartie comme suit : Les oliviers occupent une place moyennant importante avec une superficie de 253 ha et un pourcentage de (39.78%). Les cultures maraîchères possèdent aussi presque la même importance des oliviers avec une superficie de 251 ha et un pourcentage de 39.46%. L'arboriculture se présente avec 109.5 ha, l'équivalent de 17.21%. Les cultures fourragères avec une superficie de 26.5 ha et un pourcentage de 4.16%. Les cultures industrielles avec 2ha (0.3%) et les céréales qui ne dépassent pas 0.5 Ha

3. Résultats et Discussion

3.1 Résultats de l'ACP.

Détermination de composantes principales

Pour une meilleure interprétation des résultats, Il est plus convenable de présenter ceux issus de l'ACP. Les variables utilisées dans cette analyse sont des indicateurs de durabilité et sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Statistique descriptives des variables utilisées dans l'ACP

VARIABLES	Moyenne	Min	Max	Ecart type
a2	3.8	0	10	2.8
a3	4.5	0	10	4.0
a4	2.6	0	3	2.1
A5	1.2	0	6	1.9
a10	2	0	5	2.1
a12	7	0	8	2.8
a15	0.8	0	3	0.8
a16	4	0	5	2.0
b2	2	0	6	1.7
b7	3	0	7	2.7
b10	2	0	4	1.3
b13	0.6	0	2	0.8
b17	1.7	1	3	0.5
c1	18.6	0	20	2.2
c2	3.5	0	8	5.2

Le déterminant de la matrice de corrélation est égal à 2.93×10^{-5} . Il est plus grand que 0,00001 et confirme que cette matrice n'est pas singulière c'est-à-dire qu'il existe au moins un cas de dépendance linéaire dans la matrice, ou en d'autres mots, qu'une variable peut être entièrement expliquée ou prédite par une combinaison linéaire d'autres variables. L'examen de la matrice des poids factoriels après rotation (tableau 3) permet de constater que la première composante qualifiée de diversification valorisation et conservation du patrimoine. Elle est définie par l'indicateur : A3 (0.886), A4 (0.851) et l'indicateur B13

(0.867), l'indicateur B7 (0.809) et l'indicateur A10 (0.754). Deuxième composante : Pratiques agricoles elle, se définit par l'indicateur A5 (0.921) et l'indicateur B2 (0.784).

Tableau 2 : Variance totale expliquée

Composantes	Valeurs propres initiales			Variance extradite après rotation		
	Total	% de la Variance	% cumulé	Total	% de la Variance	% cumulé
1	4,75	31,69	31,69	4,6	31,0	31,0
2	2,55	17,00	48,69	2,2	14,7	45,6
3	1,84	12,27	60,96	1,9	12,9	58,5
4	1,48	9,88	70,84	1,8	12,3	70,8
5	0,98	6,52	77,36			
6	0,78	5,23	82,59			
7	0,65	4,34	86,93			
8	0,50	3,36	90,28			
9	0,45	3,00	93,28			
10	0,31	2,07	95,35			
11	0,28	1,84	97,19			
12	0,16	1,05	98,24			
13	0,12	0,81	99,05			
14	0,09	0,58	99,64			
15	0,05	0,36	100,00			

La troisième composante : cultures pérennes et est définie par A2 (0.713) , B10 (0.66) et en antagonisme avec A12 (-0.674). La quatrième composante : isolement et faible intégration. Elle est définie par B17 (0.827) et A16 (0.753). L'ACP nous a permis de réduire le nombre de variables de 15 à 4 qui serviront à regrouper les agriculteurs ayant des caractéristiques et des comportements semblables.

Tableau 3 : Matrice des composantes

Variables	Composantes			
	1	2	3	4
a2	0,086	0,505	0,713	-0,222
a3	0,886	0,135	-0,088	0,026
a4	0,851	-0,104	0,038	-0,171
A5	0,140	0,921	0,120	0,050
a10	0,754	-0,055	0,125	-0,445
a12	0,268	-0,074	-0,674	-0,065
a15	0,689	0,026	-0,116	0,178
a16	0,088	-0,070	0,411	0,753
b2	-0,267	0,784	0,016	-0,085
b7	0,809	-0,016	-0,102	0,020
b10	-0,344	-0,348	0,676	0,109
b13	0,867	0,024	-0,139	0,007
b17	-0,131	-0,008	-0,067	0,827
c1	0,245	0,191	0,512	0,324
c2	0,558	0,527	0,038	0,392

Formation des groupes.

La projection des scores des individus sur le plan factoriel formé par les axes n°1 et n°4 a permis de visualiser les 3 groupes d'exploitations (figure1) , composés de 9 (33%), 7 (26%) et 11 (41%) exploitations pour le premier, deuxième et le troisième groupe respectivement.

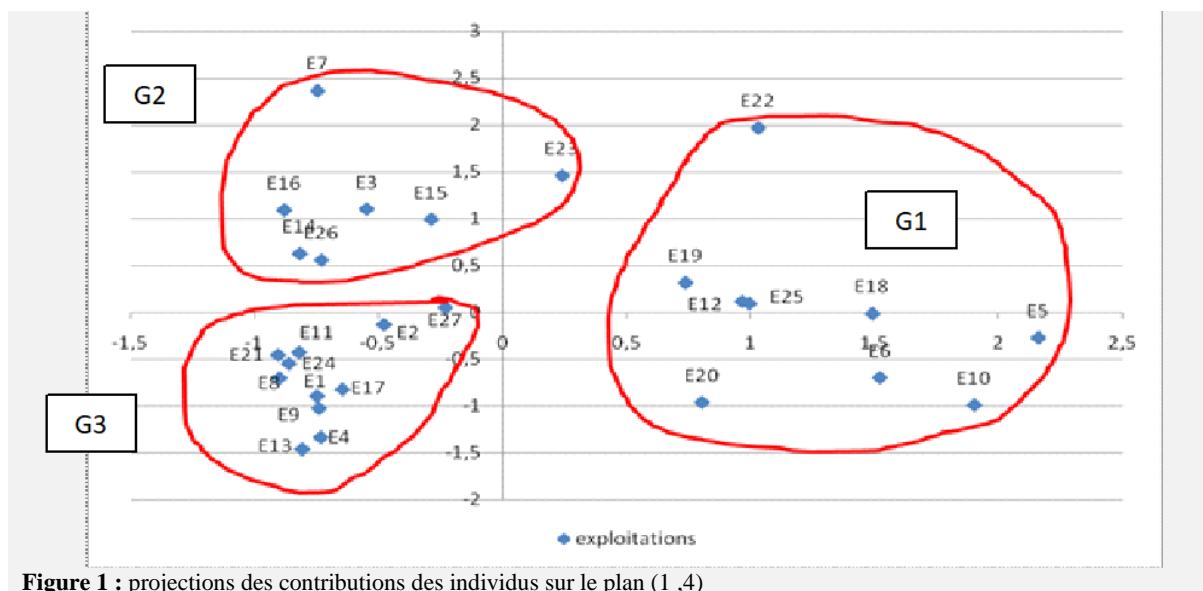


Figure 1 : projections des contributions des individus sur le plan (1 ,4)

Le test One -Way ANOVA permet de tester l’hypothèse nulle que les variances et les moyennes des groupes sont égaux. Le tableau 7 montre le test de Levene qui rejette l’hypothèse nulle que les variances des groupes sont égales pour toutes les variables utilisées au seuil de 5% sauf pour les indicateurs A2, B17 .

Tableau 4 : Test d’homogénéité des Variances

	Test de Levene	df1	df2	Sig.
A2	1,828	2	24	0,182
A4	15,444	2	24	0,000
A5	7,457	2	24	0,003
A10	16,883	2	24	0,000
A12	3,597	2	24	0,043
A15	21,897	2	24	0,000
B2	7,025	2	24	0,004
B7	7,883	2	24	0,002
B10	38,815	2	24	0,000
B13	12,418	2	24	0,000
B17	1,821	2	24	0,184
C1	5,477	2	24	0,011
C2	3,185	2	24	0,059

3.2 Analyse de la durabilité des exploitations

Sur la base des données collectées, une analyse empirique a été effectuée en vue d’évaluer la durabilité des exploitations irriguées faisant l’objet de notre étude. Dans cette section, on décrira les résultats de l’étude. On procédera successivement à la description de l’indicateur utilisé, à l’appréciation des différentes composantes de la durabilité globale des exploitations moyennant la méthode IDEA.

3.2.1 Durabilité Globale des exploitations

La méthode IDEA considère que les scores de durabilité obtenus des trois échelles ne sont pas cumulables et que le niveau réel de durabilité du système étudié est limité par la plus faible de ces trois valeurs. La figure 2 montre que la durabilité économique constitue le point fort de cette agriculture et la durabilité globale est limitée par la durabilité Socio-territoriale qui prend la valeur globale de 38% sur l’échelle de l’IDEA. Cette valeur est de 40% au niveau du groupe 1 contre 37% et 36% au niveau du groupe 2 et 3 respectivement. A l’échelle Agro-écologique le premier groupe d’exploitation est nettement plus durable avec un score de 67% contre 44 et 42 % pour le deuxième le 3eme groupe respectivement. De même à l’échelle économique le premier groupe d’exploitation est nettement plus durable avec un score de 78% contre 71 et 74 % pour le deuxième le 3eme groupe respectivement. La durabilité globale pour la totalité des exploitations est en moyenne de 38.7% qui est le score moyen de la durabilité socio-territoriale, contre un score moyen de 51 et 75% pour les composantes agro-écologique et économique respectivement.

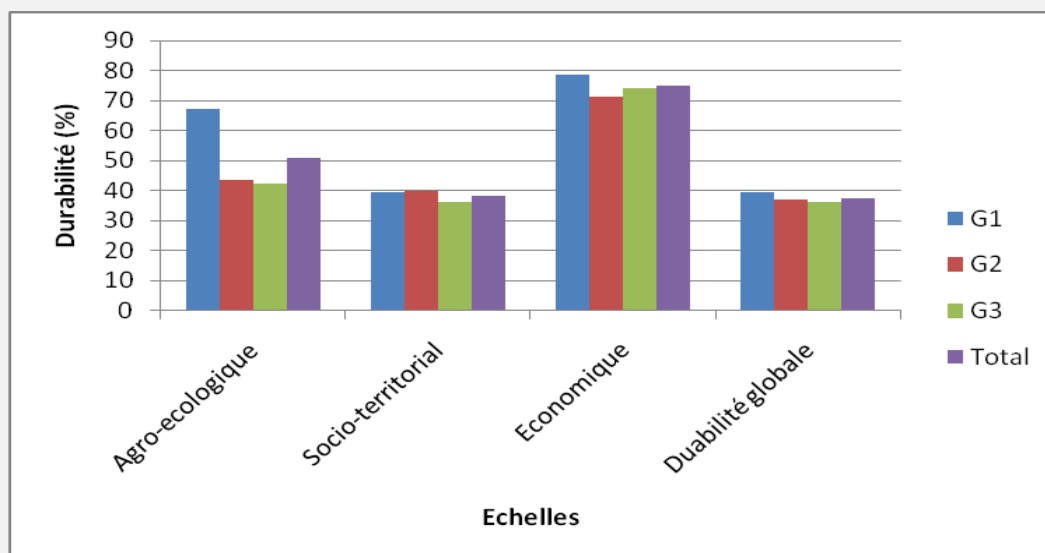


Figure 2 : scores moyens de durabilité par échelle et par types d'exploitation

3.2.2 L'échelle de durabilité agro-écologique

Elle rassemble des indicateurs illustrant la capacité des exploitations à auto-entretenir leur fertilité et leur potentiel productif à long terme, capacité étroitement corrélée à la gestion du capital naturel (eau, sol, biodiversité, air et lumière). De façon plus positive, cette échelle vise plutôt l'optimisation des facteurs de production orientés vers une rentabilité nouvelle, moins vulnérable aux fluctuations du marché et des aides publiques, et plutôt solide au plan agronomique, écologique et sanitaire. Cette échelle est divisée en trois composantes de même poids et sont expliquées par des indicateurs qui seront présentés ultérieurement.

Tableau 5 : Echelle de durabilité Agro-écologique

Composante	Indicateurs	Score	Maximum possible	
Diversité Domestique	Diversité des cultures annuelles et temporaires	A1	3.8	10
	Diversité des cultures pérennes	A2	4.5	10
	Diversité animale	A3	2.6	10
	Valorisation et conservation du patrimoine génétique	A4	1.2	3
	Sous total : DIVERSITE DOMESTIQUE		12.1	33
Organisation de l'espace	Assolement	A5	2	8
	Dimension des parcelles	A6	7	6
	Gestion des matières organiques	A7	1	5
	Zones de régulation écologique	A8	4	12
	Contribution aux enjeux environnementaux du territoire	A9		supprimé
	Valorisation de l'espace	A10	2	5
	Gestion des surfaces fourragères	A11	1	3
	Sous total: ORGANISATION DE L'ESPACE		17	39
Pratiques agricoles	Fertilisation	A12	7	8
	Effluents organiques liquides	A13		supprimé
	Pesticides	A14	7	8
	Traitements vétérinaires	A15	0.8	3
	Protection de la ressource des sols	A16	4	5
	Gestion de la ressource en eau	A17	3	4
	Dépendance énergétique	A18		supprimé
	Sous total: PRATIQUES AGRICOLES		21.8	28
Total:		50.9	100	

3.2.2.1 Diversité des cultures annuelles et temporaires

Cet indicateur vise à favoriser la biodiversité végétale, la cohérence technique et la gestion de la fertilité du sol à long terme en encourageant le nombre d'espèces cultivées. En effet, plus le système est diversifié, plus il est capable de combiner des productions complémentaires qui limitent les risques de fluctuations économiques, climatiques ou sanitaires, protègent les sols de l'érosion, et optimisent les rotations et la gestion agronomique de la fertilité. La présence des légumineuses dans le système de production est ainsi indispensable au fonctionnement agronomique du biotope sol; c'est aussi une source d'azote pour les cultures suivantes. Si la présence des légumineuses est significative (>10%) dans

l'assolement, la méthode IDEA attribue une note de 3 à 10 points, alors que si elle n'est pas significative la note est égale à 0. La note moyenne obtenue par cet indicateur est faible : 3,8 sur 10. Cela s'explique par la faiblesse de la diversité des cultures au sein de chaque exploitation et à l'absence des légumineuses.

3.2.2.2. Diversité des cultures pérennes

Cet indicateur permet une quantification de la diversité des cultures pérennes notamment les arbres fruitiers et les oliviers. La moyenne pour cet indicateur n'atteint que 45% du score maximal théorique, puisque 73% des exploitants ne possèdent qu'une seule espèce des cultures pérennes (oliviers) et seulement 40% possèdent plus d'une variété pérenne supplémentaire (variable qui donne une idée de la diversité des cultures pérennes).

3.2.2.3. Diversité animale

Les productions animales permettent de valoriser des ressources locales (herbe) et de limiter les apports d'intrants (fertilisants). Elles permettent également de maintenir le taux de matière organique du sol, clé de sa fertilité. La moyenne pour cet indicateur n'atteint que 26 % du score maximal théorique puisque 64% exploitations n'intègre pas l'activité d'élevage dans leurs systèmes de production à cause de l'élévation des charges d'alimentation et l'accroissement du phénomène du vol dans la zone étudiée.

3.2.2.4. Assolement

Une monoculture et des assolements simplifiés induisent des risques économiques, écologiques et parasitaires, c'est un indicateur précieux dans la détermination de la durabilité des exploitations agricoles. La moyenne observée pour cet indicateur atteint 25% du score théorique; cette faiblesse est exprimée par la spécialisation de certains agriculteurs dans la culture d'olivier, et la domination de certaines cultures par rapport à d'autres. En fait 30% des exploitations ont une culture dominante qui occupe entre 20 et 94% de la surface assolée (donc ayant entre 1 et 8 points). La mixité des cultures ne s'observe que chez 2% des exploitations enquêtées, ce qui explique en partie le faible score de cet indicateur

3.2.2.5. Gestion des matières organiques

Le score attribué à cet indicateur est positif et proportionnel à la quantité de fumier épandue jusqu'au niveau au-delà duquel l'agriculteur sera pénalisé (20 tonnes de fumier par hectare : -2 points). La quantité épandue moyenne pour les exploitations enquêtées est de 20% par rapport au maximum théorique. En effet 37% des exploitations enquêtées épandent moins qu'une tonne de fumier par hectare (parmi eux 68% n'ont pas de terrain et 32% en possèdent mais n'épandent qu'une quantité inférieure à 1 tonne/ha). Ils préfèrent vendre leur fumier à un prix acceptable puisqu'il est bien apprécié pour les cultures sous serre.

3.2.2.6. Fertilisation

Cet indicateur prend en considération la quantité d'azote annuel apporté par hectare, la quantité de potassium et de phosphore, et la présence des cultures pièges à nitrate. En se basant sur le barème de la méthode IDEA, une note égale à 7/8 est attribuée à cet indicateur puisque la fertilisation azotée est quasiment nulle (inférieure à 70 kg/ha) pour 90% des cas observés.

3.2.2.7. Pesticides

La pression polluante résulte de l'utilisation de pesticides. (Pression polluante (PP) = Surface développée / SAU). Aussi on tient compte de la lutte biologique et de l'utilisation des produits toxiques et le lavage des cuves de pulvérisation. La moyenne pour cet indicateur observé sur les 27 exploitations est de 7 sur 8 ce qui reflète l'utilisation raisonnée des pesticides par ces agriculteurs.

3.2.2.8. Protection de la ressource sol

La protection de la ressource sol est très nécessaire pour le maintien et la conservation du potentiel de production, également pour s'assurer de la durabilité de la ressource sol. La moyenne générale pour cet indicateur est de 80% par rapport au maximum théorique. Environ 74% des exploitations enquêtées pratiquent le labour antiérosif.

3.2.2.9. Gestion de la ressource en eau

Une bonne gestion de la ressource en eau est indispensable pour s'assurer de la réserve en eau et son existence pour les futures générations. La moyenne calculée pour les exploitations enquêtées se situe à 75% du maximum théorique. Cette moyenne relativement élevée est due au fait que 86.66% de la superficie irriguée totale est équipée en système d'irrigation goutte à goutte.

3.2.3. Durabilité socio-territoriale

Elle caractérise l'insertion de l'exploitation dans son territoire et dans la société. Elle cherche à évaluer la qualité de vie de l'agriculteur et le poids des services marchands ou non marchands qu'il rend au territoire et à la société. En ce sens, elle permet une réflexion sur des enjeux dépassant la seule exploitation agricole et elle nous informe sur le rôle de l'exploitation dans la création de l'emploi et sa contribution à l'amélioration des niveaux de vie de la population existante. Les trois composantes de la durabilité socio-territoriale ont le même poids et sont expliquées par des indicateurs qui seront présentés ultérieurement.

3.2.3.1. Accessibilité de l'espace

Dans la région de Bsissi, cet indicateur constitué par deux modalités présente un score moyen de l'ordre de 40% du maximal théorique. Si la circulation des randonneurs est favorisée dans 75% des exploitations, par contre les chemins et les haies sont rarement entretenus (10% des exploitations enquêtées).

3.2.3.2. Implication sociale

Les agriculteurs étant désormais minoritaires dans la plupart des communes rurales, leur point de vue et les valeurs qu'ils défendent seront d'autant mieux reconnus qu'ils resteront fortement insérés, du côté social, sur le territoire et dialogueront avec les autres représentants de la société. Leur participation active à des associations ou à des structures électives non professionnelles, qui sont des lieux de rencontre avec des non-agriculteurs, permet ce dialogue et cette vitalité territoriale. Cet indicateur atteint une note moyenne de 3 ce qui représente 60% du maximum théorique. La note obtenue reflète l'implication des irrigants dans des structure associative (GDA de surveillance et d'exploitation de la nappe de Bsissi-Oued El Akarit) et dans des structures professionnelles (l'union des agriculteurs) pour pouvoir bénéficier des aides de l'Etat.

Tableau 6 : Echelle de durabilité socio-territoriale

Composante	Indicateurs	Score	Maximum Possible	
Qualité des produits et des territoires	Démarche de qualité	B1	1	10
	Valorisation du patrimoine bâti et du paysage	B2	2	8
	Gestion des déchets non organiques	B3	2	5
	Accessibilité de l'espace	B4	2	5
	Implication sociale	B5	3	5
	Sous-total:QUALITE DES PRODUITS ET DU TERRITOIRE		10	33
Emploi et services	Valorisation par filières courtes	B6	1.5	7
	Autonomie et valorisation des ressources locales	B7	3	7
	Services, pluriactivité	B8	1	5
	Contribution à l'emploi	B9	3.7	6
	Travail collectif	B10	2	5
	Pérennité probable	B11	1.5	3
Sous-total: EMPLOI ET SERVICES		12.7	33	
Ethique et développement humain	Contribution à l'équilibre alimentaire mondial	B12	7	9
	Bien-être animal	B13	0.6	3
	Formation	B14	1.6	5
	Intensité de travail	B15	0.1	5
	Qualité de vie	B16	3	5
	Isolement	B17	1.7	3
	Accueil, hygiène et sécurité	B18	2	4
	Sous-total: ETHIQUE ET DEVELOPPEMENT HUMAIN		16	34
	Total:		38.7	100

3.2.3.3. Contribution à l'emploi

Etant donné l'importance de l'emploi, des jeunes notamment, dans le volet « social » du développement durable, il est primordial de prendre conscience de la contribution à l'emploi sur son territoire d'une exploitation agricole ; c'est le but du présent indice. Les exploitations employant une main d'œuvre importante par unité de surface ou de production, main d'œuvre de préférence locale, seront ici valorisées. Cet indicateur bénéficie de la note 3.7/6 de la méthode IDEA. Cette moyenne élevée

s'explique par la forte contribution à l'emploi du secteur irrigué en zone aride notamment la femme rurale.

3.2.3.4. Travail collectif

La participation à des formes de travail collectif développées au sein du territoire favorise la solidarité, génère une meilleure efficacité, développe des économies d'échelle et des synergies et constitue, ainsi, un puissant levier de développement local. L'évolution des systèmes agricoles vers une plus grande durabilité est également facilitée quand plusieurs agriculteurs d'un même territoire marchent dans la même direction. Dans notre cas d'étude seulement 60% des agriculteurs touchés par notre enquête, appartiennent à un groupement d'agriculteurs. Cette caractéristique permet aux exploitations un bon classement sur l'échelle de la durabilité socio-territoriale. La moyenne observée pour cet indicateur représente 40% du score maximal théorique. Seuls 11% de l'échantillon ont atteint la note maximale. En effet, l'entraide et le travail collectif sont limités aux travaux de récolte (récolte des oliviers). En outre le travail en réseau est limité à l'intérieur de la grande famille.

3.2.3.5. Formation

Il existe de nombreuses façons de se former. Deux actions relèvent du champ de cet indicateur : participer à des sessions de formation et accueillir des stagiaires ou des groupes de professionnels ou d'étudiants. Pour le périmètre irrigué de Bsis cet indicateur est très faible et ne concerne que 8,5% des exploitants pour lesquels la formation dépasse cinq jours/personne/an; 9,3% accueillent des stagiaires et 8,5% accueillent des groupes de professionnels. Ainsi le score moyen de l'indicateur ne dépasse pas 26% du maximum théorique et le score de zéro est observé pour 32% des cas.

3.2.3.6. Intensité de travail

Cet indicateur a une valeur moyenne quasi nulle, 70% pour cent des exploitants se sentent surchargés entre 30 et 59 jours par an et 22% plus de 50 jours et seuls 2% des irrigants un temps de surcharge qui ne dépasse pas les 30 jours par an.

3.2.3.7. Qualité de vie

Le calcul de cet indicateur repose surtout sur l'auto-estimation (entre 0 et 6 points) donnée par l'exploitant sur sa qualité de vie. Cet indicateur a une moyenne de 50% du maximum théorique. Ceci est considéré comme très acceptable puisque tout d'abord aucun exploitant n'a choisi la note zéro, et qu'une abondance de résultats s'observe pour les tranches allant de 3 à 5 points soit 87% de l'ensemble. Les résultats montrent que les irrigants sont en général satisfaits en ce qui concerne leur indépendance et la possibilité de gérer librement leur temps et le lien avec la nature; par contre, ils se plaignent longuement des prix des intrants et de la faiblesse du soutien de l'Etat.

3.2.4. Durabilité économique

L'échelle de durabilité économique, dont les indicateurs résultent des orientations techniques et financières du système de production, analyse les résultats économiques au-delà du court terme et des aléas conjoncturels. Appréhendée par six indicateurs, cette dimension est étudiée depuis plus longtemps par les agroéconomistes qui utilisent couramment de nombreux ratios de gestion économique et financière. L'évaluation de la durabilité économique dépasse, cependant, l'analyse de la seule performance économique à court terme. En effet, la pérennité d'un système de production dépend d'abord de sa viabilité économique, mais aussi de son indépendance économique, de sa transmissibilité et de son efficacité.

La viabilité économique caractérise l'efficacité économique des systèmes agricoles à court et moyen terme. C'est une donnée essentielle qui doit être relativisée par les indicateurs suivants. L'indépendance économique et financière garantit généralement le moyen terme, en permettant aux systèmes de production de s'adapter plus facilement aux inévitables évolutions des aides publiques, mais aussi d'avoir la capacité d'adapter l'exploitation agricole par de nouveaux investissements.

La transmissibilité constitue un élément de l'analyse du long terme. En effet, la durabilité des systèmes agricoles provient aussi de leur capacité à perdurer d'une génération à l'autre. En cas de succession, l'importance des capitaux nécessaires au fonctionnement de l'exploitation et à sa reprise peut finalement conduire à son démantèlement.

Tableau 7 : Echelle de durabilité économique

Composante	Indicateurs	score	Maximum Possible
Viabilité	Viabilité économique	C1	18.6
	Taux de spécialisation économique	C2	3.5
	Sous-total: VIABILITE		22.1
Indépendance	Autonomie financière	C3	14
	Sensibilité aux aides	C4	10
	Sous-total: INDEPENDANCE		24
Transmissibilité	Transmissibilité	C5	14.2
	Sous-total: TRANSMISSIBILITE		14.2
Efficienc	Efficienc du processus productif	C6	14.1
	Sous-total: EFFICIENC		14.1
Total:			74.4
			100

3.2.4.1. Viabilité économique

Cet indicateur basé sur la déduction des besoins de financement de l'excédent brut de l'exploitation et en rapportant cette différence au nombre d'UTH non salarié (familiale ou associé), le résultat est comparé au SMAG. Le score moyen observé par cet indicateur est de l'ordre de 18,6 soit 93% du maximum théorique ceci s'explique par une bonne rentabilité dégagée au niveau des exploitation étudiées.

3.2.4.2. Taux de spécialisation économique

La méthode IDEA considère qu'un système de production diversifié est moins vulnérable et moins dépendant de la conjoncture économique. Cet indicateur est évalué par la contribution de la principale activité dans le chiffre d'affaire. Il est déterminé par la formule suivante: $TS = \text{Produit brut de la production principale} / \text{Produit brut total}$. Cet indicateur marque une moyenne de 35% par rapport au total théorique. Ce résultat est expliqué par des systèmes de production moins diversifiés et par la dominance de la monoproduction (production oléicole) chez 70% des exploitants.

3.2.4.3. Autonomie financière

Cet indicateur renseigne sur l'autonomie financière et la dépendance de l'exploitation. La recherche d'une autonomie importante est l'un des objectifs de l'agriculture durable. Elle nous renseigne sur les dettes vis-à-vis des fournisseurs et des banques; par conséquent, plus ces dettes sont faibles, plus l'exploitation est indépendante et donc, l'autonomie est élevée. La dépendance financière (DF) est calculée par la formule suivante: $DF = \Sigma \text{annuités} / \text{EBE}$ Avec EBE: Excédent brut de l'exploitation
 Cet indicateur marque un moyen très élevé, elle est de l'ordre de 93% du maximum théorique. Cela s'explique par le fait que la plupart des exploitants ne font pas recours au crédit bancaire mais ils des dettes envers les fournisseurs pour le financement de leurs campagne agricole.

3.2.4.4. Sensibilité aux aides

Cet indicateur prend en compte les subventions d'exploitation et les aides publiques à la production versées aux exploitations, et exclut les aides financées directement par les producteurs. Les aides à l'investissement et les aides indirectes sous forme de bonification d'intérêts. La sensibilité aux aides est : $\Sigma \text{aides} / \text{EBE}$. Dans la zone de Bsissi, cet indicateur marque un score très élevé de l'ordre de 100%, puisque seulement 5% des exploitants reçoivent des aides supérieures à 1% de leur EBE.

3.2.4.5. La composante transmissibilité économique

Cet indicateur rend compte de la capacité de l'exploitation à être transmise, Dans notre étude on a pu calculer tous les indicateurs à l'exception de celui de la transmissibilité économique qui nécessite des informations détaillées sur le capital d'exploitation (la valeur du foncier, la valeur des équipements d'accès à l'eau - puits/ sondage; la valeur des plantations..), qui ne sont pas toutes des données qui ont pu être collectées lors des enquêtes.

Cet indicateur atteint un pourcentage important de 100% du maximum théorique. Les déclarations des irrigants concernant la pérennité de leur exploitation sont généralement optimistes. En effet, 95% des enquêtés ont donné une réponse de quasi-certitude alors que 5% s'attendaient à la disparition totale de leur exploitation. De plus, 9% seulement considèrent que le financement peut être un obstacle à la pérennité de leur activité.

3.3.4.6. La composante efficience du processus productif

Cet indicateur est pertinent car il permet d'évaluer sur le long terme la durabilité de l'exploitation. Il se limite aux aspects économiques et traduit avec quelle efficience technique les intrants sont transformés par le système de production. Il exprime la tendance vers l'autonomie et l'économie des ressources. Il se calcule par la formule suivante :

Efficience = (Produit – Intrants) /Produit, avec les produits sont le montant des ventes hors primes, et les intrants présentent le montant des consommables (énergie, eau, engrais, pesticides, semences, aliments du bétail, médicaments,...), et les frais de MO temporaire spécifique.

Quand l'efficience dépasse 90%, elle est à sa valeur maximale, cependant ce n'est pas le cas de nos exploitations enquêtés, qui présentent des pourcentages relativement faibles à moyennes et qui résultent un score de 14.1 sur 25 soit 65% du score maximal théorique, ce qui reflète que ces exploitants ne valorisent pas leurs potentialités et/ou leur savoir-faire en matière de production, de transformation et de commercialisation.

3.3. Caractérisation des groupes d'exploitations

L'analyse des résultats de L'ACP et des scores de durabilité montre que les exploitations du premier groupe sont dotées d'une durabilité clairement plus forte que celles des deux autres. Les exploitations de ce groupe sont menées par la première et la deuxième composante. Ces exploitations sont caractérisées par un système de production intégré basé sur la production animale, les cultures annuelles et l'arboriculture. Cette diversification leur permet d'adopter les meilleures pratiques agricoles et une meilleure valorisation des produits de terroir en plus de la conservation des ressources naturelles. Cette attitude permet aussi de réaliser la meilleure performance économique ce qui leur concède en conséquence une meilleure durabilité économique avec un score de 78%. A l'encontre des exploitations du premier groupe, celles du deuxième groupe sont moins durables et sont menées essentiellement par la deuxième composante de l'ACP. Ces exploitations sont caractérisées par des systèmes de production basés sur la pratique des cultures annuelles. Ce système semble être favorable pour la conservation du patrimoine et du paysage et est marqué par une bonne gestion des ressources en sol contre une faible conservation des ressources en eau. Ces exploitations sont trop spécialisées et dotées d'une faible durabilité économique à cause de cette spécialisation culturelle nonobstant la bonne viabilité économique.

Le troisième groupe d'exploitations présente le score de durabilité le plus faible relativement aux deux premiers groupes. Ces exploitations sont menées par les axes 3 et 4 de l'ACP. Elles sont caractérisées par un système de production basé sur la production arboricole, et un fort isolement donc faible intégration au marché. Cette catégorie d'exploitation est caractérisée par un faible taux de diversification et une faible valorisation des espaces ce qui peut expliquer sa faible durabilité agro-écologique et socio-territoriale. Ces exploitations présentent une faible viabilité économique à cause du système de production monoculturel adopté.

4. Conclusion

L'analyse globale de la durabilité laisse apparaître une même tendance pour toutes les exploitations: elles sont durables à l'échelle économique, moyennement durables à l'échelle agro-écologique et moins durables à l'échelle socio-territoriale. Il n'existe pas cependant d'exploitations bien ou mal notées sur les trois dimensions de la durabilité. La caractérisation du profil de durabilité de ces exploitations permet, en outre de préciser les tendances de durabilité en lien avec le modèle d'exploitation. En effet celles adoptant un système de production intégré révèlent une durabilité relativement plus consistante. Sur le plan méthodologique, il convient de s'interroger sur l'utilisation de cet outil d'autodiagnostic (IDEA) dans le contexte de l'agriculture tunisienne. En effet, si plusieurs indicateurs se révèlent pertinents, beaucoup d'autres semblent totalement inadaptés au contexte de l'agriculture irriguée en zone aride, ils semblent surestimer les barèmes de notation ou manquer de précision dans leurs modalités de détermination. Ainsi, en plus de l'identification des modifications qu'il convient d'apporter à quelques indicateurs, il convient également de s'interroger sur la nécessité d'intégrer d'autres indicateurs spécifiques au contexte de l'agriculture tunisienne, comme, l'expansion urbaine et industrielle au détriment du foncier agricole. Enfin sur la base des résultats dégagés les décideurs peuvent concevoir leurs stratégies en tenant compte des forces et des faiblesses enregistrées.

Par cette étude on a voulu sensibiliser les agriculteurs à la notion de durabilité et à la nécessité de mieux prendre en compte la protection des milieux naturels dans ces régions difficiles pour faire faces aux enjeux des ressources naturelles à l'échelle locale (rareté et changement climatique). A cet effet le recours à des solutions favorisant le renforcement de la gestion des systèmes de production fragiles

serait important pour contribuer à leur durabilité et à la viabilité des exploitations agricoles, tout en assurant un développement durable. Ainsi, la mise en œuvre d'un programme de sensibilisation et de formation des agriculteurs, à des modes de production adaptés aux conditions locales, notamment, au choix des spéculations rentables avec une utilisation conservatrice et optimale des ressources en eau, devient impérative.

Références

- Abdelhafidh H. and M.S. Bacht** (2016). «Groundwater pricing for farms and water users associations sustainability », *Arabian Journal of Geosciences*, volume 9 N° 8, May-2016.
- Agence de la Vulgarisation et de la Formation Agricoles (AVFA), (2016).** : Référentiel du développement agricole durable en Tunisie. Document de base pour la formation et le conseil agricole, 60p.
- Binder, C.R., Feola, G., Steinberger, J.K., 2010.** Considering the normative, systemic and procedural dimensions in indicator-based sustainability assessments in agriculture. *Environ. Impact Assess. Rev.* 30, 71–81.
- Elfkhi S., I. Guidara and N. Mtimet (2012).** Are Tunisian organic olive growing farms sustainable? An adapted IDEA approach analysis. *Spanish Journal of Agricultural Research* 2012 10(4), 877-889.
- Finkbeiner, M., Schau, E.M., Lehmann, A., Traverso, M., 2010.** Towards life cycle sustainability assessment. *Sustainability* 2, 3309–3322.
- Francis C. A., Youngberg G.,1990,** Sustainable agriculture - an overview, In : *Sustainable Agriculture in Temperate Zones*, Ed. C. A. Francis, C. B. Flora & L. D. King, New York, John Wiley & Sons.
- Girardin, Ph., Mouchet, Ch., Schneider, F., Viaux, Ph., Vilain, L., (2004).** Etude prospective sur la caractérisation et le suivi de la durabilité des exploitations agricoles françaises. Rapport de l'étude n° 04 F5 02 03 sur le chapitre budgétaire 37-11 article 44, Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche et des Affaires Rurales, France.
- Harwood R.R., (1990).** An history of sustainable agriculture. In C.A. EDWARD et al. : *Sustainable agricultural Systems*. Soil and Water Conservation Society, USA, 3-19.
- Lebacqz, T., Baret, P.V., Stilmant, D., 2013.** Sustainability indicators for livestock farming. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 33, 311–327.
- Mahdhi N., Smida Z., Fouzai A., (2016).** Farmers' strategies and determinants of choice to cope with the groundwater crisis in the private irrigated perimeters in south-eastern Tunisia. 2nd EWaS International Conference, 1- 4 June, 2016 - Chania, Crete, Greece.
- Marchand, F., Debruyne, L., Triste, L., Gerrard, C., Padel, S., Lauwers, L., 2014.** Key characteristics for tool choice in indicator-based sustainability assessment at farm level. *Ecol. Soc.*, 19.
- Marta-Costa, A.A., Silva, E., 2013.** Approaches for sustainable farming systems assessment. In: Marta-Costa, A.A., Soares da Silva, E.L.D.G. (Eds.), *Methods and Procedures for Building Sustainable Farming Systems*. Springer, pp. 21–29.
- Schader, C., Grenz, J., Meier, M.S., Stolze, M., (2014).** Scope and precision of sustainability assessment approaches to food systems. *Ecol. Soc.* 19.
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., Haan, C.d., (2006).** Livestock's long shadow: environmental issues and options. In: *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*.
- Zahm F, Viaux P, Vilain L, Girardin P, Mouchet C, (2008).** Assessing farm sustainability with the IDEA method-From the concept of agriculture sustainability to case studies on farms. *Sust Dev* 16(4): 271-281.
- Zahm F, A. Alonso Ugaglia, J.M. Barbier, H. Boureau, B. Del'Homme, et al (2019).** Évaluer la durabilité des exploitations agricoles : La méthode IDEA v4, un cadre conceptuel combinant dimensions et propriétés de la durabilité. *Cahiers Agricultures*, EDP Sciences, 2019, 28 (5), pp.10. fhal-02267338