



La récolte
 Broncia Koller-Pinell (1908)

PROJET PAQ COLLABORA

PROJET PAQ-COLLABORA : Cartes de suivi de la sécheresse



« Suivi / élaboration d'indices de sécheresse pour l'aide à la décision concernant la gestion de la productivité céréalière en Tunisie »

Projet financé par le Fonds Compétitif d'Innovation pour soutenir les projets de valorisation au sein et autour des technopôles (www.mes.tn)

En Partenariat avec la CTAMA, l'Association APAD, le Centre CNCT et le Pôle de compétitivité de Bizerte

Cartes d'indices de suivi de la sécheresse

Zoubeida Kebaili Bargaoui (Professeur, Ecole Nationale d'ingénieurs de Tunis, Département Génie Civil, Laboratoire de Modélisation en Hydraulique et Environnement (LMHE))

Nesrine Abid (Maître assistante, Faculté des Sciences de Gafsa, Département de géomatique), Chercheur associée LMHE

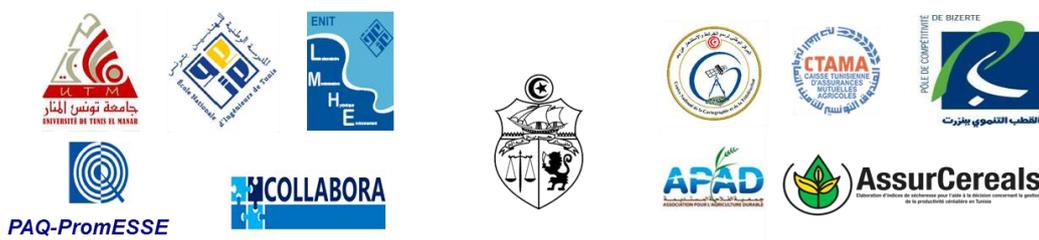


Table des figures

Figure 1. Part des produits importés dans les importations alimentaires à la fin décembre 2021 (source : https://www.oc.com.tn/fr/evolution-de-collecte-des-cereales-par-repartition/)..	5
Figure 2. Variabilité spatiale de la production de céréales (https://www.oc.com.tn/fr/evolution-de-collecte-des-cereales-par-repartition/)	6
Figure 3. Sélection et adaptation de la végétation en réponse au stress de l'environnement. (Source Eagleson, 1994)	10
Figure 4. (a) Exemple de données JORT (b) Pourcentage des surfaces sinistrées par Imada pour 2016-2017 (Zaghouan).....	13
Figure 5. Pourcentage des surfaces sinistrées par Imada pour 2000-2001 (Zaghouan).....	13
Figure 6. Fonction de répartition du pourcentage des surfaces sinistrées par an (Zaghouan) .	13
Figure 7. Série temporelle du SPI-3 (toutes stations) pour février, bassin versant de la Medjerda.....	14
Figure 8. SPI-3 de février de 1950 à 2018 pour le bassin versant de Medjerda	17
Figure 9. Répartition spatiale des postes où l'année la plus critique a connu une sécheresse extrême, sévère ou modérée.	17
Figure 10. Cartes des indices de productivité pour les 3 gouvernorats (Siliana, Jendouba et Zaghouan).....	20
Figure 11. Médianes pour les Imada du gouvernorat de Zaghouan	20
Figure 12. Variabilité interannuelle des indices à travers les box-plot par année (Zaghouan) ; en rouge les années JORT, années sont présentées dans l'ordre à partir de 2000.....	21
Figure 13. Fonction de répartition annuelle de l'indice de productivité de l'évapotranspiration comparativement aux courbes de référence 25%, 50% et 75%	22
Figure 14. Valeurs standardisées de l'indice de productivité de l'évapotranspiration pour trois années	23
Figure 15. Séries temporelles des indices de productivité de l'évapotranspiration standardisés par imada (Zaghouan)	26
Figure 16. Variabilité des rendements selon le type d'année et le gouvernorat.....	28

Table des tableaux

Tableau 1. Interprétation des valeurs de SPI-3 (WMO, 2012).....	9
Tableau 3. Nombre d'enquêtes réalisées et leur répartition (Agroservices)	27
Tableau 4. Evaluation des superficies emblavées moyennes par type de céréales (en HA)	27
Tableau 5. Proportion des agriculteurs ayant souscrit au moins une fois à un système d'assurance	28
Tableau 6. Degrés de satisfaction par rapport aux services de couverture des risques.....	29



I. Préambule

Le projet  **AssurCereals** a été financé à la suite de l'appel d'Offres national 2019 du programme COLLABORA du Programme national PAQ-PromESSE du ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique. Le programme PAQ-COLLABORA a pour objectif général de valoriser les travaux de thèse soutenus à l'université tunisienne.

Le projet  **AssurCereals** entre dans le cadre de la valorisation de la thèse en Génie Hydraulique de *Nesrine Abid* soutenue en 2018 (Abid et al. 2018) à l'ENIT. Le Consortium ENIT, APAD, CTAMA, CNCT et Pôle de compétitivité de Bizerte a proposé et développé le

projet  **AssurCereals**.

La thèse de *Nesrine Abid* a étudié un indice de sécheresse appelé *water stress coefficient* recommandé par la FAO (Allen et al. 1998) en utilisant des produits satellitaires et de la modélisation du bilan hydrique et radiatif à la surface du sol. Le projet  **AssurCereals** vise à :

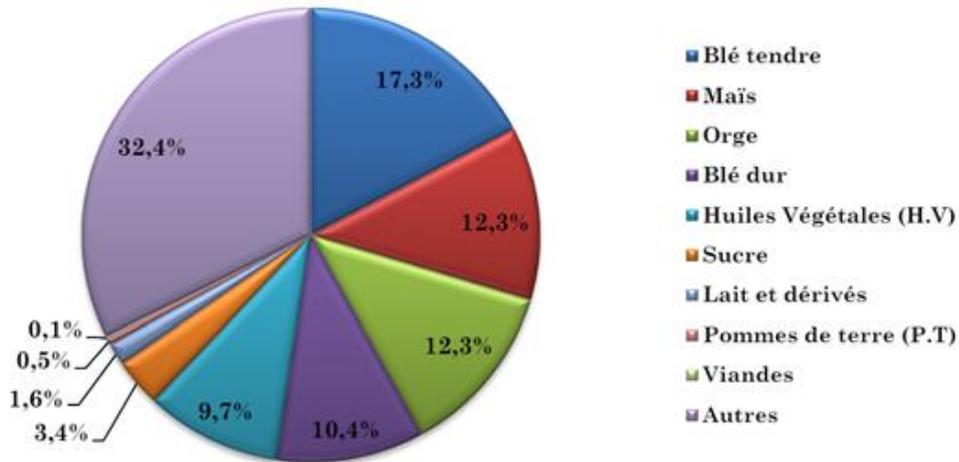
- a) Accroître les capacités d'innovation du Consortium en termes de développement d'une agriculture durable et de traitement de l'imagerie satellitaire pour la gestion du risque sécheresse relatif aux céréales
- b) Monter un réseau d'utilisateurs des indices proposés pour quantifier l'aléas de la sécheresse, assurer un suivi plus efficace du déroulement de la saison agricole et améliorer les provisions de couverture de l'indemnisation des sinistres dus à la sécheresse.

Les objectifs spécifiques en sont : (a) Développement d'outils d'évaluation et de suivi de la sécheresse dans la région d'étude (Gouvernorats de Siliana, Bizerte, Béja, Jendouba et Zaghouan) par la mise à disposition de cartes et séries temporelles d'indices de sécheresse (b) Renforcement de la couverture d'assurance agricole pour les céréales grâce au renforcement des capacités des conseillers agricoles, ingénieurs et techniciens agronomes et des filières Céréales, viandes, lait.

II. Présentation générale

Le taux de couverture de la balance commerciale alimentaire en Tunisie est estimé à 85% en 2020, 70% en 2021 et 75% en 2022. Le déficit est structurel. Il y a importation systématique de céréales chaque année (53% de la balance commerciale alimentaire en 2021). La figure 1 donne la répartition de la part dans la balance des produits alimentaires importés et montre la prédominance de l'importation des céréales (blé tendre 17.3 %, orge 12.3 %, blé dur 10.4 %).

En contrepartie la Tunisie est un exportateur d'huile d'olives, de dattes et de produits de la mer. Le cours du marché international de ces produits (blé, huile d'olives, dattes etc...) ainsi que la quantité produite à l'échelle nationale lors des campagnes agricoles sont les principaux facteurs déterminant l'importance du déficit de la balance pour une année donnée.



Source : Calculs de l'ONAGRI d'après les données de l'INS.

Figure 1. Part des produits importés dans les importations alimentaires à la fin décembre 2021 (source : <https://www.oc.com.tn/fr/evolution-de-collecte-des-cereales-par-repartition/>)

La figure 2 montre la variabilité spatiale de la production de céréales et les gouvernorats dominants comme producteurs (Béja, Bizerte, Jendouba, Siliana).

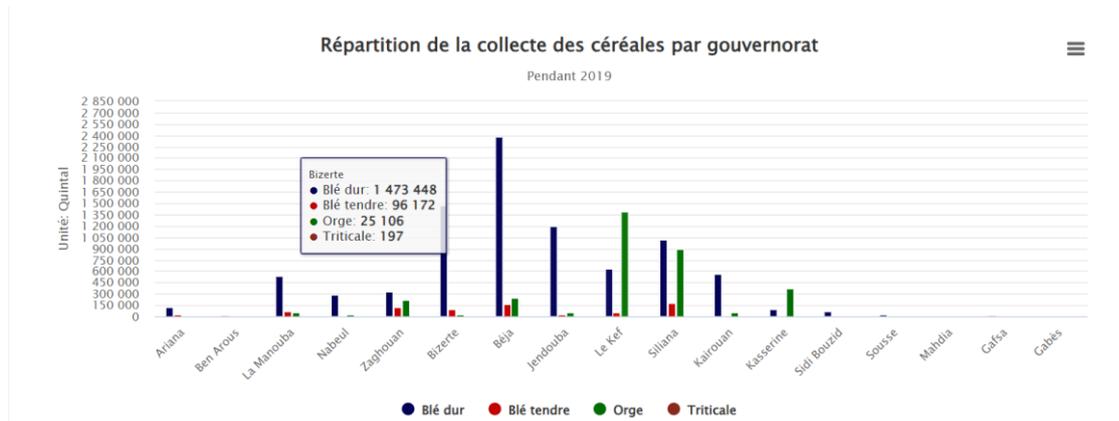


Figure 2. Variabilité spatiale de la production de céréales
(<https://www.oc.com.tn/fr/evolution-de-collecte-des-cereales-par-repartition/>)

Pour les cultures en sec et à moindre degré en irrigué, la sécheresse est un facteur important pour la balance commerciale alimentaire de la Tunisie.

Les quantités de céréales collectées (blé dur, blé tendre, orge, triticale) sur la période 2018-2023) (<https://www.oc.com.tn/fr/evolution-de-collecte-des-cereales-par-repartition/>) montrent une importante variabilité spatio-temporelle. A titre d'exemple, l'intervalle (Max-Min) sur le total national de production de blé dur représente 35% de la moyenne sur la période 2018-2023. Cette fluctuation interannuelle représente un facteur supplémentaire de risque.

Le FIDAC Fonds d'Indemnisation des Dommages Agricoles causés par les Calamités naturelles (depuis 2018) (https://www.afdb.org/sites/default/files/documents/projects-and-operations/tunisie_-_etude-gestion_des_risques_et_mise_en_place_dun_systeme_dassurance_et_de_micro_assurance_agricole_-_p-tn-a00-008_-_eer_fevrier_2022.pdf) est un fonds qui a été créé pour faire face aux dommages engendrés par les catastrophes naturelles, y compris la sécheresse. La CTAMA a été retenue, sur appel d'offres, comme l'assureur qui gèrera le fonds pour le compte du ministère de l'Agriculture, des ressources hydrauliques et de la pêche, pour un premier mandat de trois ans, puis pour un autre mandat de trois ans. Le projet  s'intéresse au Nord de la Tunisie et principalement aux gouvernorats de Siliana, Zaghouan et Jendouba ainsi qu'au bassin versant de la Medjerda comme entités territoriales.



L'innovation du projet  **AssurCereals** porte sur le montage d'un ensemble d'indices de sécheresse exploitables par les céréaliers et le système d'assurance sécheresse du FIDAC en Tunisie. Ce recueil permet de rendre disponibles deux indices à savoir le SPI-3 et l'indice de productivité de l'évapotranspiration. Le SPI-3 représente l'indice des précipitations standardisées sur 3 mois. L'indice de productivité de l'évapotranspiration est le rapport de l'évapotranspiration réelle à l'évapotranspiration potentielle calculé sur la saison agricole. Ces indices peuvent être utilement considérés dans la filière de l'élevage pour les répercussions de la sécheresse sur la production de lait et de viande et plus généralement par le secteur agro-alimentaire semouleries et entreprises de production de pâtes.

Ce recueil contribue à présenter les estimations de séries temporelles des deux indices, spatialisées, calculés d'après les observations du passé pour la pluviométrie (1950- 2018) et l'évapotranspiration (2000- 2020). Il n'est pas exhaustif des cartes réalisées dans le cadre du projet. Il donne les cartes du SPI-3 du mois de février et de l'indice de productivité pour l'intervalle compris entre novembre et mai de chaque année.

Des cartes peuvent être établies sur demande, pour les autres mois concernant le SPI-3 et pour d'autres intervalles de sommation pour l'indice de productivité de l'évapotranspiration.

Le document est divisé en quatre parties : (i) la mise en évidence des impacts de la sécheresse ; (ii) la sécheresse estimée en utilisant le SPI-3 ; (iii) la sécheresse estimée par l'indice de productivité de l'évapotranspiration ; (iv) évidence terrain d'après une enquête agricole réalisée dans le cadre du projet, confiée au bureau d'études Agroservices. La méthodologie d'obtention de ces estimations est présentée, suivie d'un ensemble de cartes obtenues.

III. Méthodologie

L'obtention d'une situation de référence pour démontrer l'existence d'un épisode de sécheresse est d'abord requise pour pouvoir évaluer l'adéquation des indices étudiés. Dans la thèse de *Nesrine Abid* (Abid, 2018) et pour la valorisation de laquelle le projet  **AssurCereals** a été financé, c'est le Journal Officiel de la République Tunisienne (JORT) qui a été adopté comme document de référence. Le projet  **AssurCereals** a poursuivi dans la même direction. D'autres approches existent telles que celle basée sur la collecte des données de production



agricole. Le projet  **AssurCereals** a financé une enquête de terrain pour appréhender les rendements obtenus par les céréaliers durant la période 1995-2023 et comprendre le comportement des agriculteurs face à l'aléas de la sécheresse.

La méthodologie a consisté à :

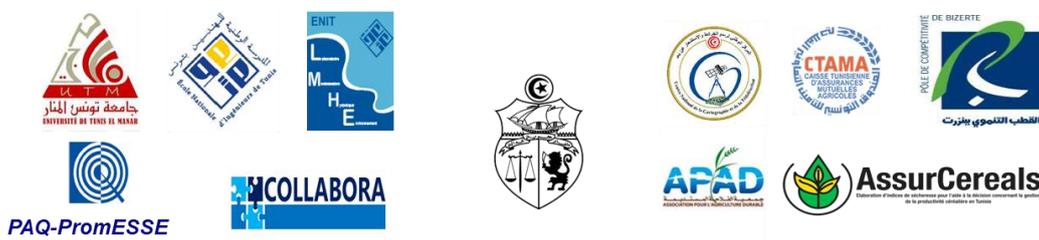
- Utiliser des données pluviométriques in situ pour estimer l'indicateur SPI-3. Les indices sont obtenus par station pluviométrique puis cartographiés. Le cas du bassin de la Medjerda est illustré.
- Utiliser des observations satellitaires MODIS pour estimer l'indice de productivité de l'évapotranspiration par Imada pour trois gouvernorats.
- Importer les données MODIS d'évapotranspiration pour les transformer en indices de productivité.
- Réaliser un questionnaire auprès d'environ 400 agriculteurs céréaliers des trois gouvernorats.
- Evaluer les deux indices et les réponses au questionnaire par rapport aux sécheresses déclarées dans le JORT

III.1 Adoption du JORT comme référence pour le constat de la sécheresse

La première année où le JORT publie la liste des zones sinistrées par la sécheresse est 1993. Le constat de la sécheresse se fait par décret gouvernemental. Nous avons répertorié tous les numéros des JORT où un décret sur la sécheresse a été publié depuis 1993 jusqu'à 2021.

III.2 Etablissement des cartes de SPI-3

Le SPI-3 est un indice standardisé. Il suit la loi normale centrée réduite. Sommairement, ses valeurs sont centrées autour de zéro avec un écart-type égal à 1. Cela signifie que la valeur -1 a une probabilité de non-dépassement (PND) égale à 0.16 et que la valeur 1 a une probabilité de non-dépassement (PND) égale à 0.84. Un SPI-3 négatif dénote un déficit pluviométrique et un SPI-positif une situation de surplus pluviométrique. Une variable normale centrée réduite prend des valeurs de -3.5 (de PND= 0.00023) à 3.5 (PND=0.9998). SPI-3 signifie que le cumul pluviométrique est calculé sur 3 mois. Le SPI-3 de février renseigne sur la situation des mois de décembre à février. Il y a ainsi un SPI-3 de février (et de n'importe quel mois de l'année)



par année. Les cumuls de trois mois de précipitation sont ensuite transformés en une variable standard (SPI-3) sans unités, qui reflète l'importance du déficit ou du surplus. Le tableau 1 donne la caractérisation des sécheresses selon la valeur du SPI-3 (WMO, 2012).

Tableau 1. Interprétation des valeurs de SPI-3 (WMO, 2012)

SPI3	Catégorie
< -2	Sécheresse extrême
-2 à -1.5	Sécheresse sévère
-1.5 à -1	Sécheresse modérée
-1 à 0	Légère sécheresse
0 à 1	Presque normale
1 à 1.5	Modérément humide
1.5 à 2	Très humide
> 2	Humide extrême

Dans le projet  AssurCereals tous les SPI-3 ont été calculés de 1950 à 2018 en utilisant les observations disponibles dans les annuaires pluviométriques de la Tunisie. Seules les séries totalisant au moins 30 ans d'observations pluviométriques cumulées sur 3 mois ont été utilisées. L'estimation du SPI-3 pour chaque station pluviométrique a fait l'hypothèse d'une loi de probabilité Gamma (Kebaili Bargaoui et Jemai, 2022). Cette loi est utilisée dans plusieurs régions du monde (WMO, 2012).

Une fois calculés, les SPI-3 ont été cartographiés à l'aide d'ARCGIS permettant de visualiser l'extension spatiale de la sécheresse. Le modèle d'interpolation choisi est Spline. En pratique, pour un mois donné, la sommation des surfaces exposées à un SPI-3 inférieur à -1 permet d'évaluer les zones touchées par une sécheresse modérée à extrême. De même, la sommation à partir du début de l'année hydrologique (septembre) des valeurs absolues des SPI-3 inférieures à -1 permet d'avoir la magnitude (ou intensité) d'une sécheresse de type modérée à extrême. Dans ce recueil nous donnons les résultats pour le SPI-3 du mois de février et le bassin versant de la Medjerda.

III.3 Etablissement des cartes de l'indice de productivité de l'évapotranspiration

Il faut d'abord souligner que l'évapotranspiration réelle (ETR) est considérée comme un proxy de la biomasse produite. L'évapotranspiration potentielle (ETP) est un plafond (une contrainte) pour l'ETR. Ainsi, Le ratio $k_v = ETR/ETP$ est considéré comme un coefficient de productivité de l'évapotranspiration (Eagleson, 1994). Proche de 1 il est interprété comme représentant des conditions favorables. Proche de zéro, il dénote l'existence d'une sécheresse. On trouve dans Eagleson (1994) un graphique (Figure 3) dans lequel on voit les limites naturelles de ce ratio, qui dépendent de l'écosystème considéré. Dans la zone d'étude les moyennes ou « climatologies » se situent dans l'intervalle 0.4-0.6.

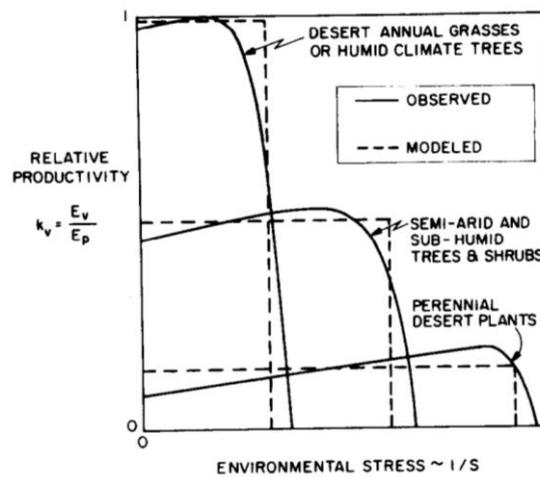


Figure 3. Sélection et adaptation de la végétation en réponse au stress de l'environnement. (Source Eagleson, 1994)

Pour obtenir l'indice de productivité de l'évapotranspiration nous avons utilisé les données satellitaires MODIS qui sont fournies à la résolution temporelle de 8 jours (totaux sur 8 jours) et à la résolution spatiale 500 m (Mu et al. 2007). Dans MODIS, l'estimation de ETR et ETP est basée sur l'équation de Penman-Monteith. Elle utilise des données satellitaire (albédo et indice foliaire LAI) et des données météorologiques provenant de réanalyses (température de l'air, humidité spécifique et rayonnement solaire à ondes courtes) (Hu et al. 2015).

Nous avons évalué les estimations MODIS comparativement à d'autres dans un précédent travail (Abid et al., 2024). Dans le projet  AssurCereals nous avons retenu la période 2000-2020. Pour chaque campagne agricole, nous avons considéré le cumul de l'évapotranspiration du premier novembre au 31 mai, pour chaque Imada des trois gouvernorats (Siliana, Zaghouan,



Jendouba). L'obtention des cumuls a été réalisée avec l'application APPERARS « Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples » (<https://appears.earthdatacloud.nasa.gov/>) en utilisant l'information sur la limitation géographique des imadas. La cartographie de ces informations permet de visualiser les imadas qui ont subi un préjudice lié à la sécheresse, identifiées grâce aux valeurs basses de l'indice.

Par la suite nous avons estimé des statistiques robustes (i.e. qui sont moins sensibles aux valeurs aberrantes et aux hypothèses du modèle). Il s'agit des médianes et quartiles 25% et 75% par imada. Positionner une année donnée par rapport à ces statistiques permet d'attribuer une situation de déficit ou de surplus et de mesurer sa sévérité. Nous avons finalement standardisé l'indice en calculant l'écart à la moyenne rapporté à l'écart-type pour chaque imada. Dans une précédente étude (Abid et Bargaoui, 2022), nous avons proposé une approche de correction de biais pour l'indice de productivité.

III.4 Réalisation d'une enquête agricole

Le projet  **AssurCereals** a fait réaliser une enquête par une société d'études et de prestation de services *Agroservices*. Il s'agit d'une enquête agricole sur la production céréalière et l'état de l'environnement. Par état de l'environnement nous entendons les conditions environnementales liées à la production (état du sol et du couvert végétal, état des variables atmosphériques).

L'enquête visait à savoir si l'exploitant

- Intègre la sécheresse comme risque, par quel moyen (technique, assurance, prêts, ou autres),
- S'il est disposé à s'insérer dans un système d'annonce de la sécheresse numérisé (sur le WEB), payant ou non payant, s'il utilise déjà le WEB pour s'informer sur la sécheresse à travers des sites en Tunisie ou ailleurs,
- S'il suit les conditions météorologiques et comment il relie cela à ses pratiques culturales, s'il dispose de séries d'observation pluviométriques et de température de l'air et ou humidité de l'air,
- S'il est disposé à acheter des équipements de suivi météorologique et ou de l'état d'humidité ou du couvert végétal,

- Ce qu'il propose pour faire face à la sécheresse selon son degré d'avancement, s'il est disposé à partager son évaluation de la situation hydrique avec un réseau de ses pairs, etc...

L'analyse a concerné les 3 gouvernorats : Siliana, Zaghouan et Jendouba qui sont situés sur 3 étages bioclimatiques. L'enquête concerne la période après 1995 pour laquelle le JORT a publié des constats de sécheresse en faisant mention aussi de la période post 2019, après la création du FIDAC. Trois sous-périodes (décennies) sont distinguées 1995-2005, 2005-2015 et 2015-2023. Des informations sur la production agricole sont demandées, ainsi que des informations sur la meilleure et la plus mauvaise année, par sous-période. L'enquête s'informe sur le recours à l'assurance, par type d'assurance et notamment au FIDAC. La méthodologie de l'enquête a emprunté un plan stratifié à 2 degrés : 1^{er} degré : sélection des délégations et 2^{ème} degré : sélection des producteurs (encore désignés comme exploitants).

IV. Résultats

IV.1 Mise en valeur de l'information du JORT

Les pourcentages des superficies sinistrées ont été publiés sous forme de tableaux dans décrets des différents JORT (Figure 4a). Nous visualisé ces tableaux sous forme de cartes (Figure 4b). La cartographie des informations du JORT par gouvernorat permet d'identifier les imadas qui ont subi un préjudice lié à la sécheresse, tout en montrant la variabilité de la sévérité des dommages subis à travers le gouvernorat.

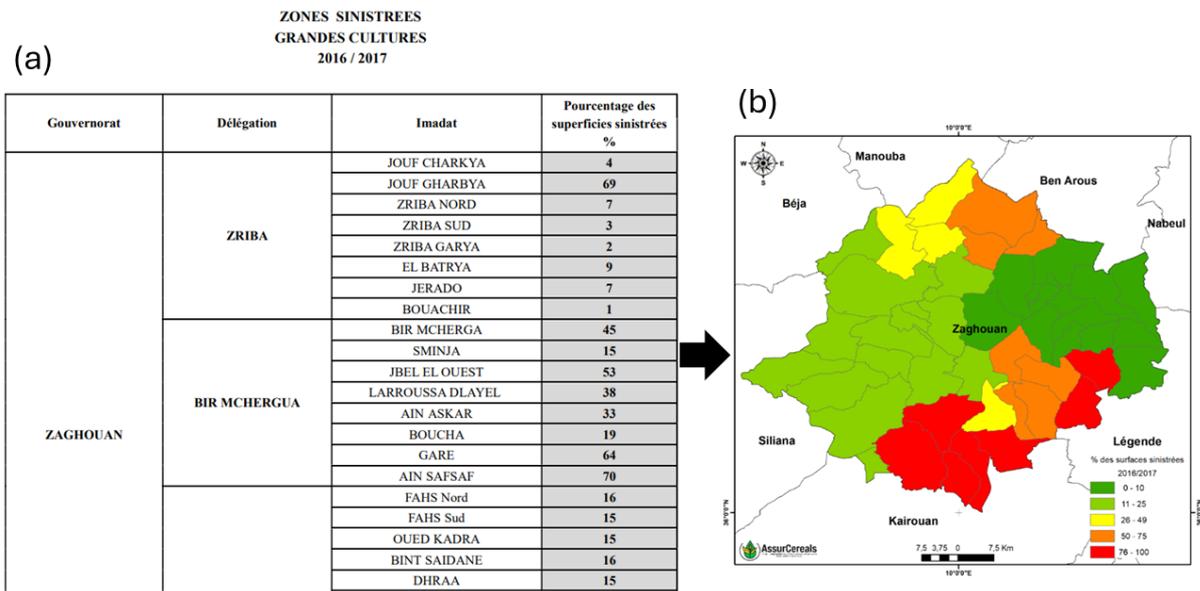




Figure 4. (a) Exemple de données JORT (b) Pourcentage des surfaces sinistrées par Imada pour 2016-2017 (Zaghouan)

La figure 5 montre le pourcentage de zone sinistrée par imada, pour une année particulière : 2000-2001. La figure 6 présente les informations recueillies pour huit années différentes, dans un format statistique, en donnant les fonctions de répartition des pourcentages de surfaces endommagées (cas du gouvernorat de Zaghouan). Les années agricoles 2001-2002 et 2015-2016 apparaissent comme celles où il y a eu le plus de surfaces endommagées (Figure 6).

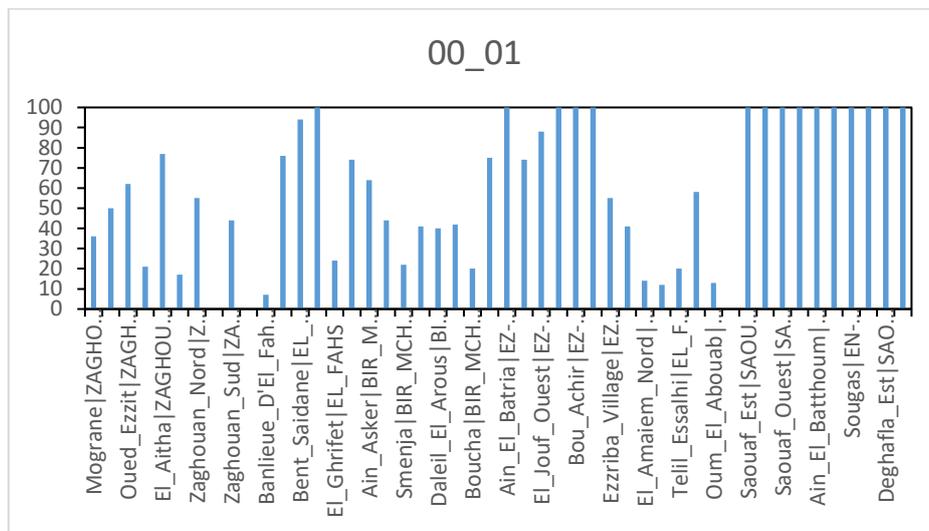


Figure 5. Pourcentage des surfaces sinistrées par Imada pour 2000-2001 (Zaghouan)

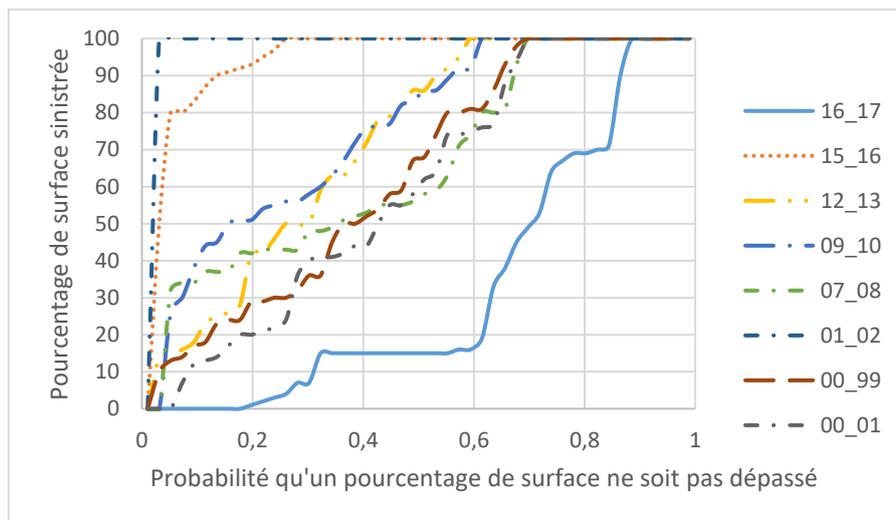


Figure 6. Fonction de répartition du pourcentage des surfaces sinistrées par an (Zaghouan)



IV.2 Traitement de l'information pluviométrique pour le SPI-3

Une série temporelle du SPI-3 de février est présentée en figure 7. Elle permet de voir que plusieurs stations pluviométriques du bassin versant de la Medjerda ont connu des sécheresses extrêmes ($SPI-3 < -2$) et sévères ($SPI-3$ compris entre -1.5 et -2). Les cartes de SPI-3 de février pour le bassin versant de la Medjerda sont montrées en Figure 8. L'examen de ces cartes permet d'identifier les 4 années les plus critiques ($SPI-3$ de février 20001, 2005, 1985 et 1977).

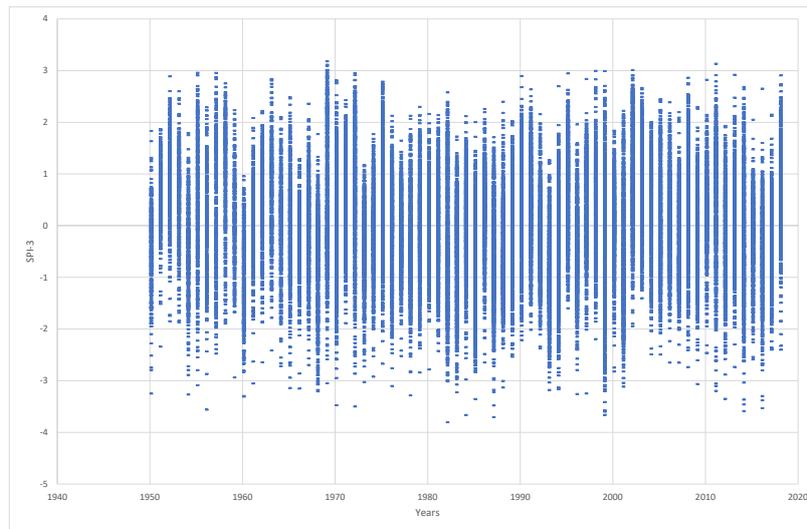


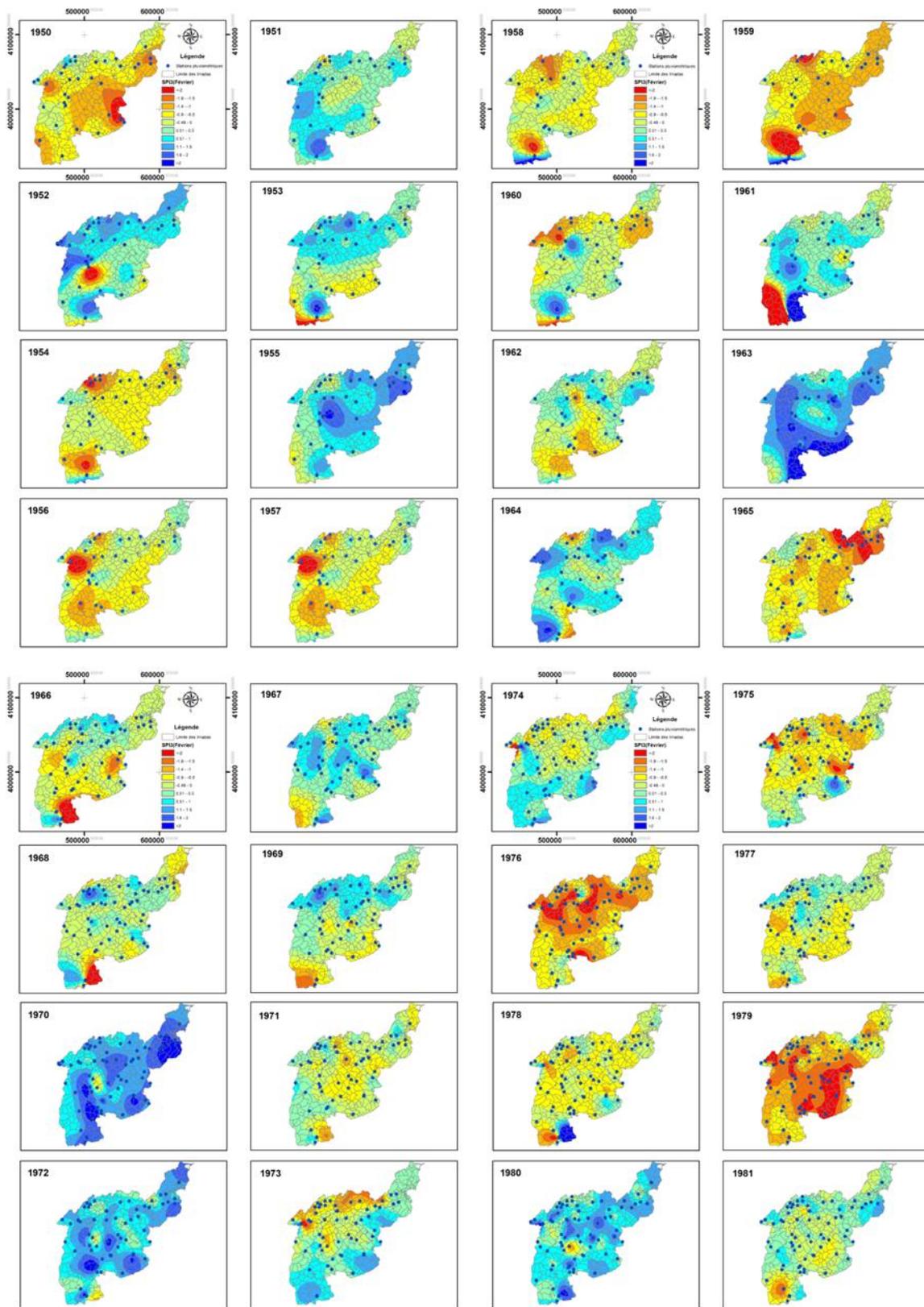
Figure 7. Série temporelle du SPI-3 (toutes stations) pour février, bassin versant de la Medjerda



PAQ-PromESSE



AssurCereals



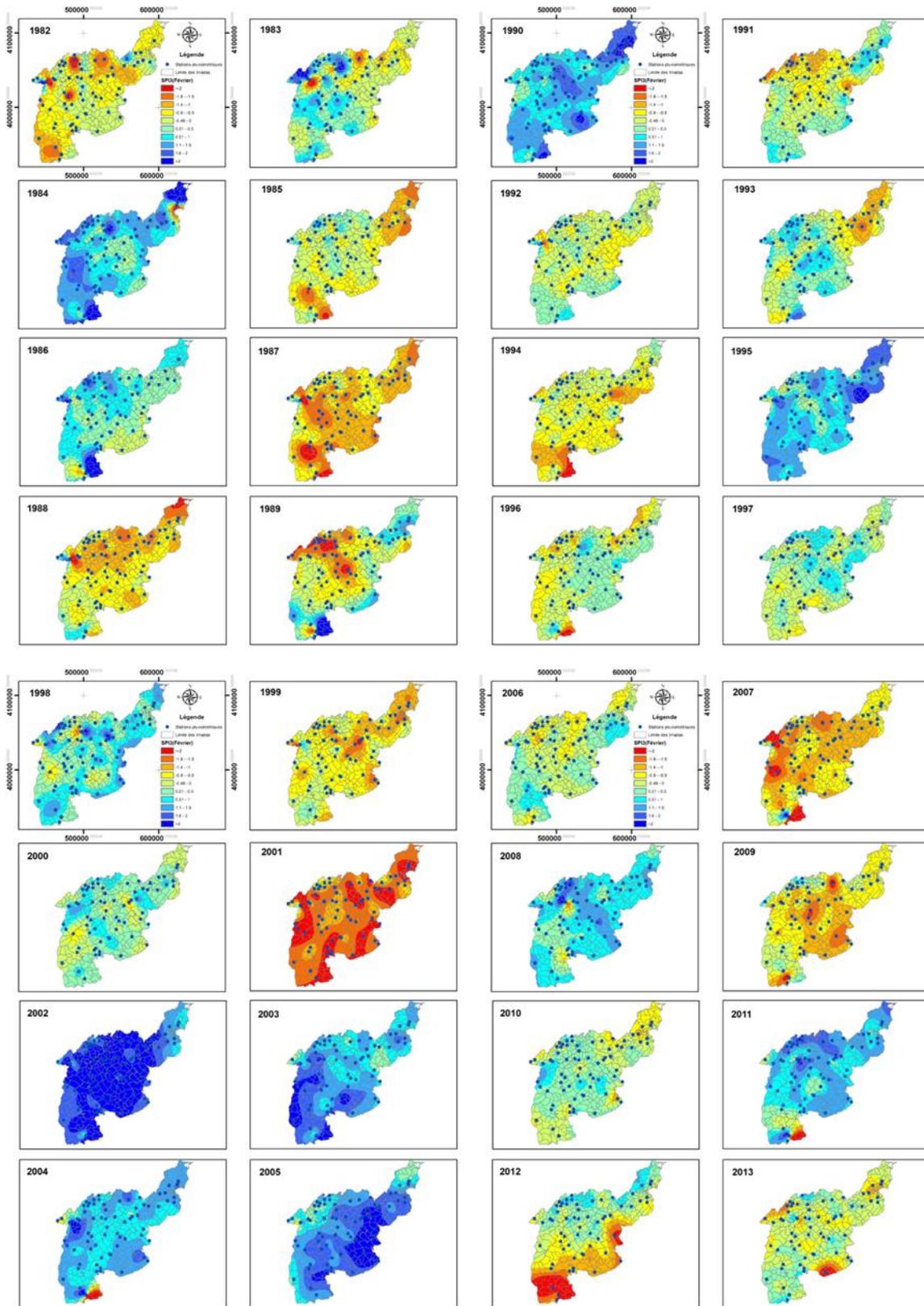
PROJET PAQ-COLLABORA : Cartes de suivi de la sécheresse



PAQ-PromESSE



AssurCereals



PROJET PAQ-COLLABORA : Cartes de suivi de la sécheresse

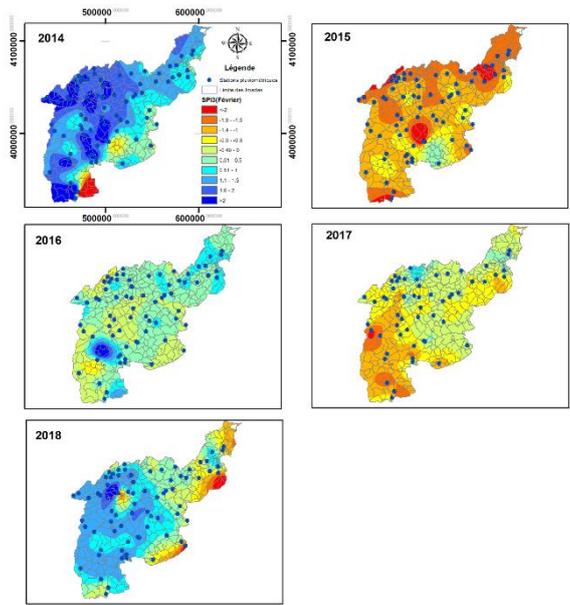


Figure 8. SPI-3 de février de 1950 à 2018 pour le bassin versant de Medjerda

Pour chaque station pluviométrique, la valeur minimum de de la série d'indices est identifiée. La figure 9 reporte pour chaque station, la classe du minimum du SPI-3 observé : (a) en rouge si le minimum du SPI-3 de février est inférieur à -2 ; (b) en orange si le minimum observé du SPI-3 de février est entre -1.5 et -2 ; (c) en jaune si le SPI-3 minimum à la station était entre -1 et -1.5. On voit que ces minimums critiques ne présentent pas d'organisation spatiale (Figure 9).

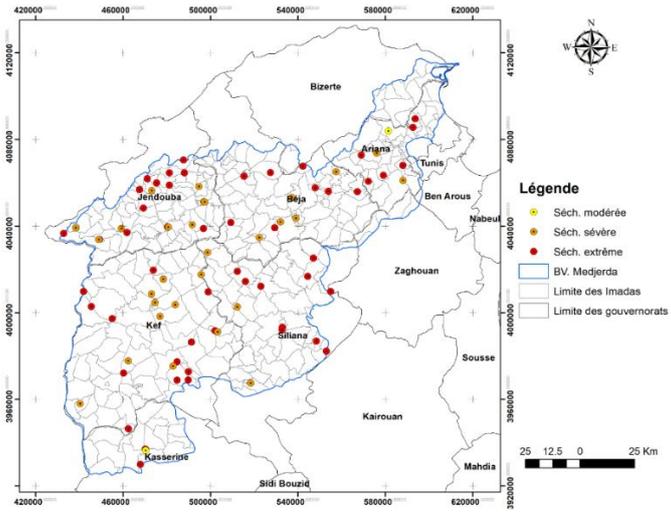


Figure 9. Répartition spatiale des postes où l'année la plus critique a connu une sécheresse extrême, sévère ou modérée.

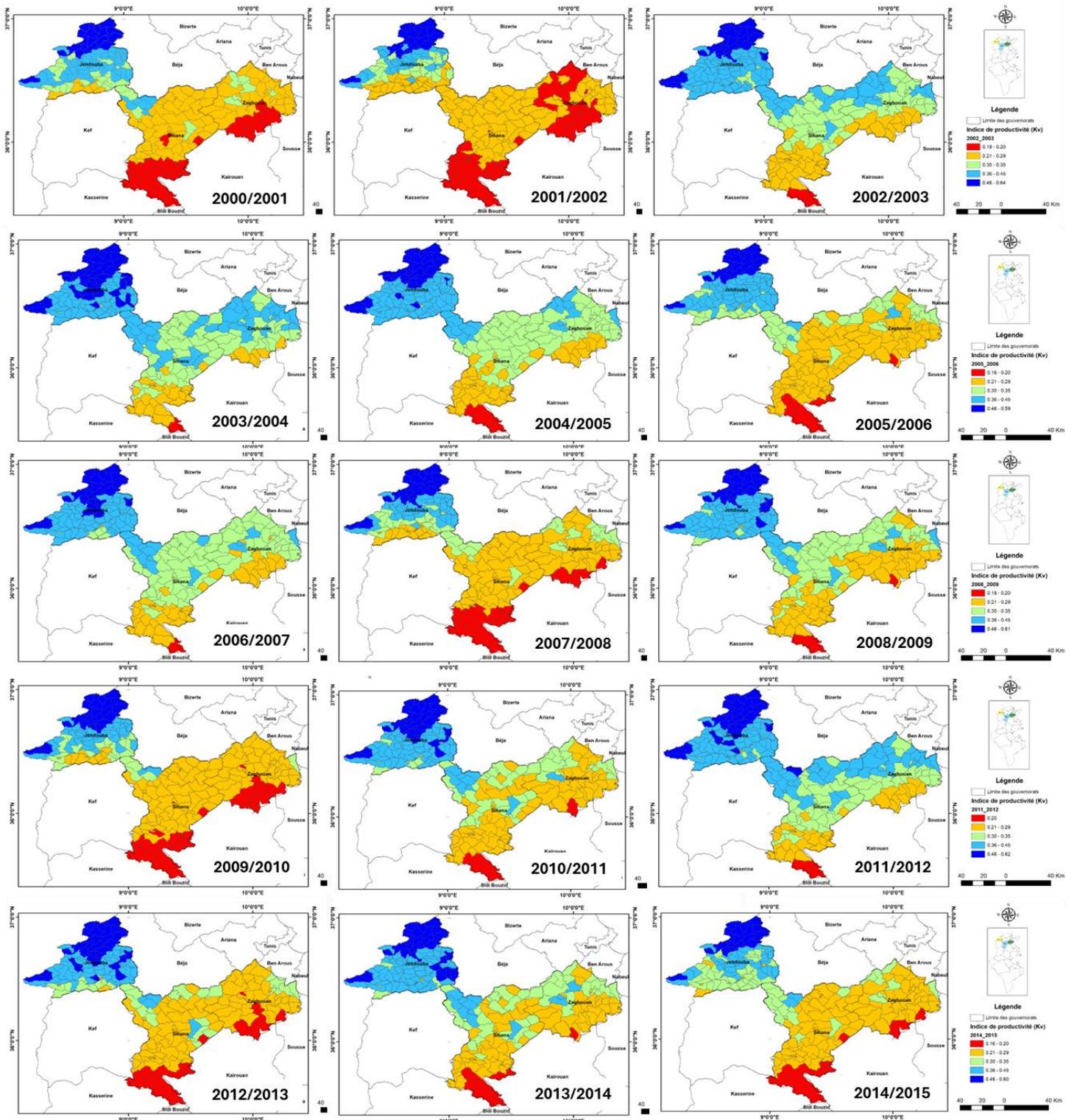


Au total 65% des stations ont connu au moins une année avec une sécheresse extrême et 28% avec une sécheresse sévère (sans de sécheresse extrême).

IV.3 Indice de productivité

Les cartes des indices de productivité pour les 3 gouvernorats sont en Figure 10. La variabilité interannuelle est bien visible. Pour la variabilité spatiale, étant donné que la classe climatique varie d'un gouvernorat à l'autre, les valeurs de la carte ne sont pas directement comparables. Au nord de la zone d'étude, le rayonnement solaire et l'énergie est un facteur limitant pour l'évapotranspiration réelle. Au sud de la zone c'est un régime limité par la présence d'eau (water limited). Il n'y a que les cartes de l'indice normalisé qui pourraient être utilisées à but comparatif.

Les médianes peuvent constituer des références pour évaluer une année fixée, dans un cadre comparatif spatial. A titre d'exemple, les médianes de l'indice de productivité de l'évapotranspiration sont données par imada pour Zaghouan (Figure 11). La figure 12 donne le diagramme box-plot (boite à moustahes) pour chaque année pour le gouvernorat de Zaghouan. Ces diagrammes sont obtenus en classant les valeurs des indices observés aux imadas, pour une année donnée. Ils visualisent les percentiles 25%, 50% et 75% de chaque année, ce qui permet d'identifier la situation (favorable ou déficitaire) de l'année par rapport aux autres années (variabilité interannuelle). En rouge sont présentées les années de sécheresse identifiées dans le JORT. On voit que la distribution de l'indice est plutôt vers les faibles valeurs durant ces années-là.



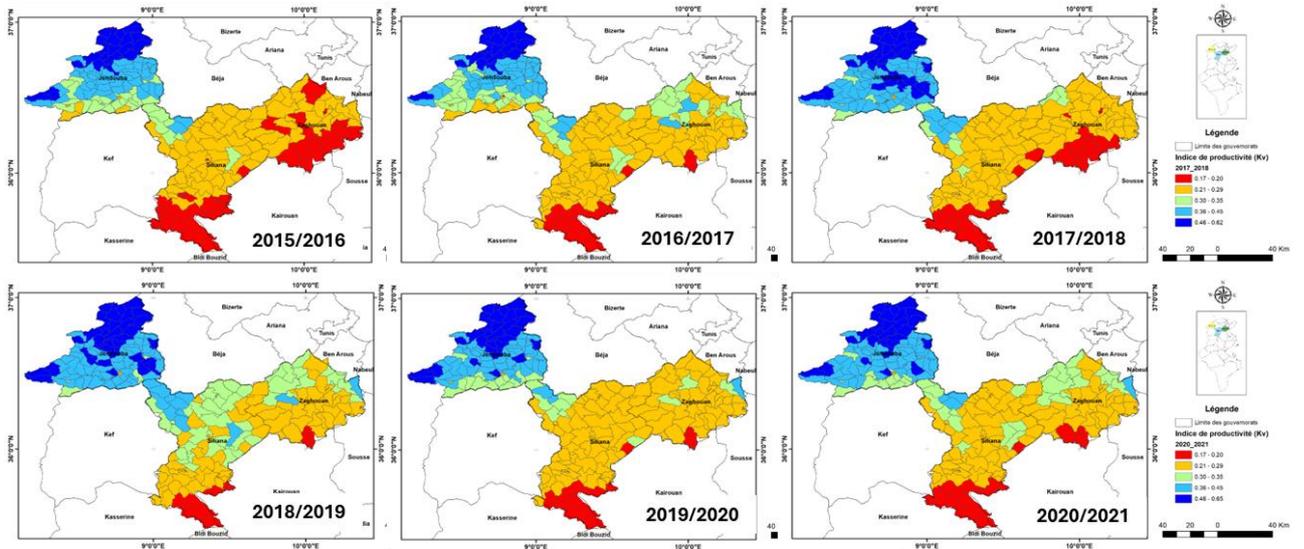


Figure 10. Cartes des indices de productivité pour les 3 gouvernorats (Siliana, Jendouba et Zaghouan)

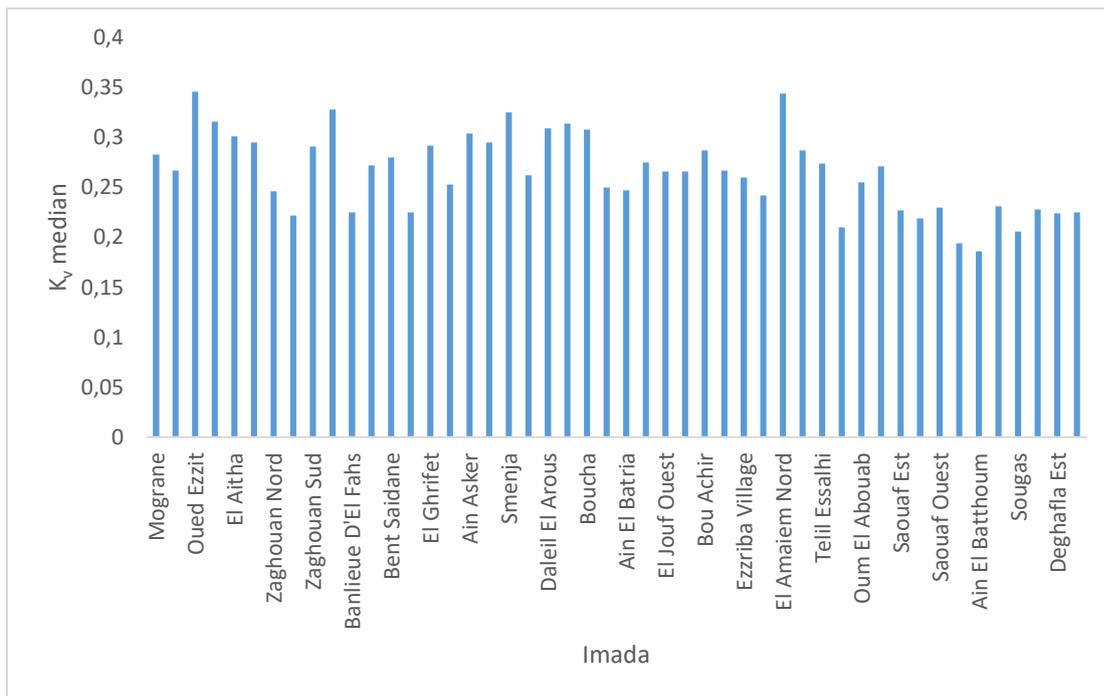


Figure 11. Médianes pour les Imada du gouvernorat de Zaghouan

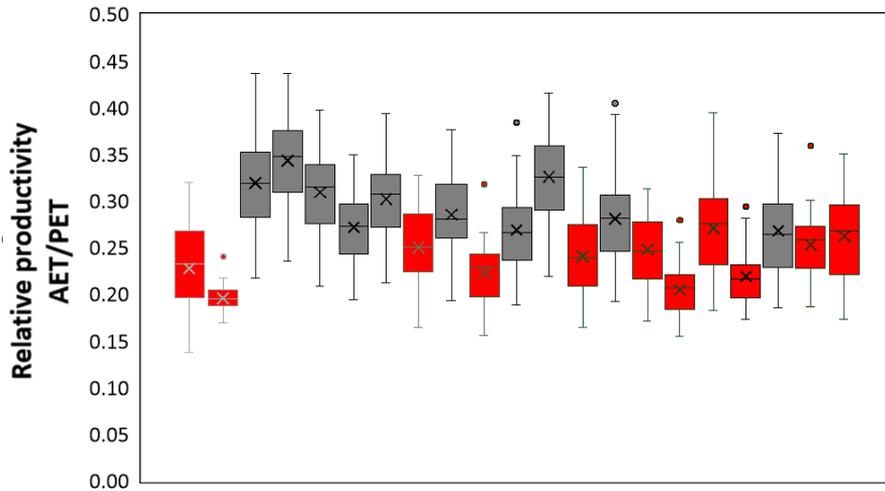


Figure 12. Variabilité interannuelle des indices à travers les box-plot par année (Zaghouan) ; en rouge les années JORT, années sont présentées dans l'ordre à partir de 2000

Par la suite, nous avons élaboré un classement des années en considérant leurs courbes de répartition. Pour établir une courbe de répartition, on classe les valeurs, par ordre croissant. Une courbe de répartition a été en plus élaborée pour les centiles 25% (faible niveau de l'indice), 50% (niveau moyen de l'indice) et 75% (haut niveau de l'indice). Le positionnement de la courbe de répartition de chaque année par rapport aux courbes de référence relatives aux centiles 25%, 50% et 75% est interprété pour attribuer à l'année un état.

D'abord, on identifie les années dont la courbe se situe dans le 2^{ème} quart inférieur (entre la courbe du centile 25% et la courbe du centile 50%) (Equation 1).

$$\text{Courbe réf 25\%} < \text{courbe de l'année} \leq \text{Courbe réf 50 \%} \quad \text{Eq (1)}$$

Il s'agit de 5 années : 2012-2013 ; 2007-2008 ; 2014-2015 ; 2019-2020 ; 2020-2021, qui sont effectivement répertoriées dans le JORT.

Puis on identifie les années dont les courbes se situent dans le premier quart inférieur (Equation 2)

$$\text{Courbe de l'année} \leq \text{Courbe réf 25\%} \quad \text{Eq (2)}$$

Ce sont six autres années (2000-2001 ; 2001-2002 ; 2015-2016 ; 2009-2010 ; 2017-2018) et qui sont aussi répertoriées dans le JORT.



Les années dont les courbes vérifient la condition (Equation 3) sont aussi distinguées.

Courbe de l'année > Courbe réf 50 % **Eq (3)**

Ce sont toutes des années non présentes dans un JORT, c'est-à-dire qui n'ont pas subi de sinistre. Les 5 années les plus défavorables selon les fonctions de répartition sont : 2000-2001 ; 2001-2002 ; 2015-2016 ; 2017-2018 ; 2009-2010. L'analyse des données JORT (voir Figure 13) a classé ces mêmes années comme les 5 années les plus défavorables.

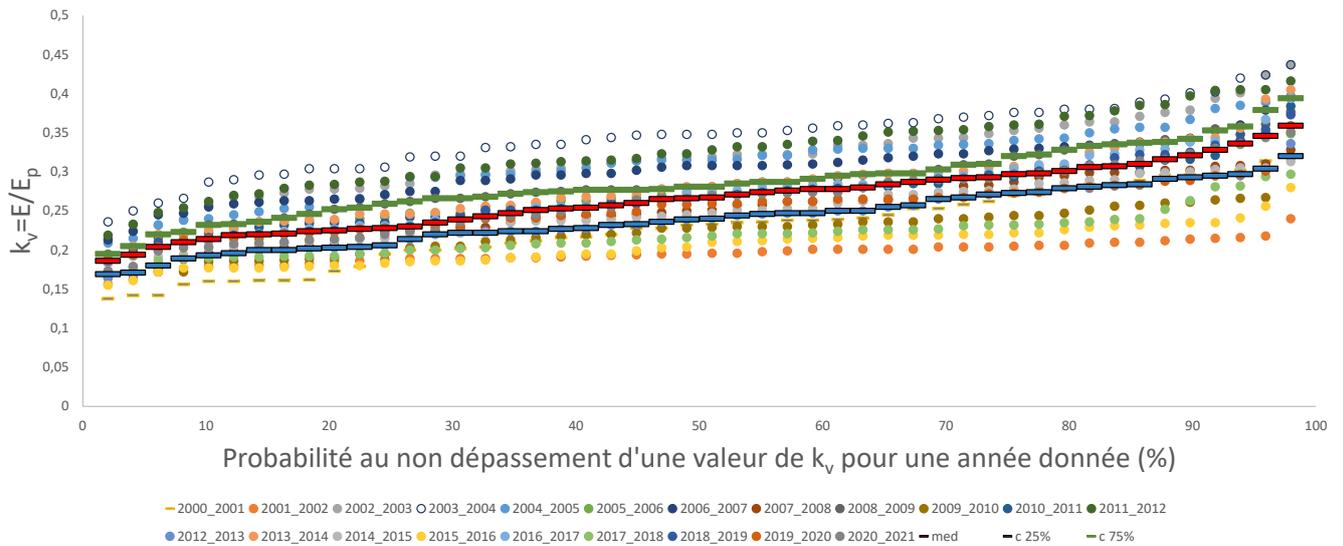


Figure 13. Fonction de répartition annuelle de l'indice de productivité de l'évapotranspiration comparativement aux courbes de référence 25%, 50% et 75%

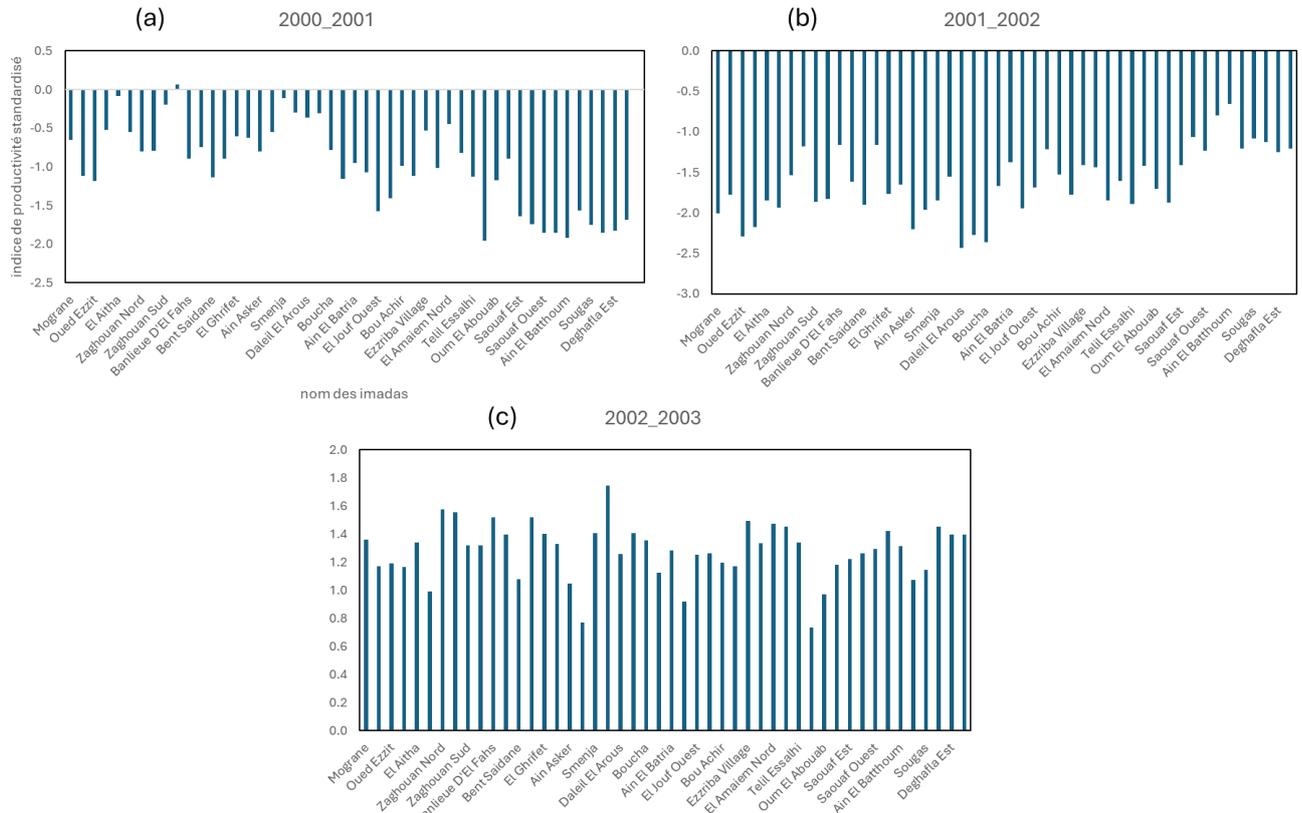


Figure 14. Valeurs standardisées de l'indice de productivité de l'évapotranspiration pour trois années

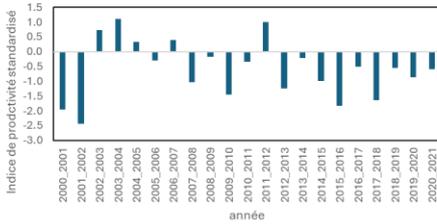
La standardisation de l'indice de productivité de l'évaporation est une étape qui permet de visualiser les résultats et de comparer les années entre elles, ainsi que de les classer. La Figure 14 présente les valeurs standardisées par imada pour les trois années critiques 2000-2001, 2001-2002 et 2002-2003. Pour les deux premières tous les indices sont négatifs. Pour la dernière tous les indices sont négatifs.

En suivant ce qui se passe par imada, on montre la série temporelle des valeurs standardisées par Imada (Figure 15). Cela permet d'identifier les années déficitaires par Imada et mesurer l'importance du déficit. La délégation de Zaghrouan est entrée en déficit depuis 2012-2013.

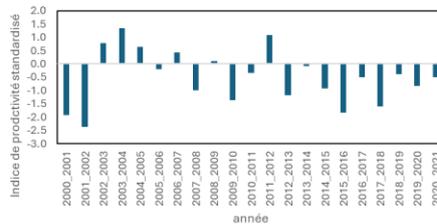


AssurCereals
Assurance d'Échecs de Rendement pour l'Arbre à Céréales
de la production céréalière en Tunisie

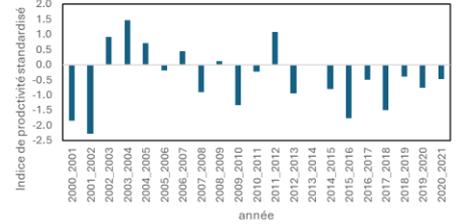
Mograne



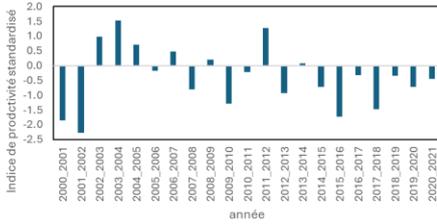
Bir Hlima



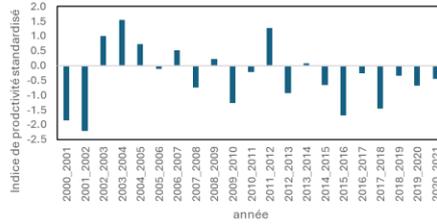
Oued_Ezzit|ZAGHOUAN



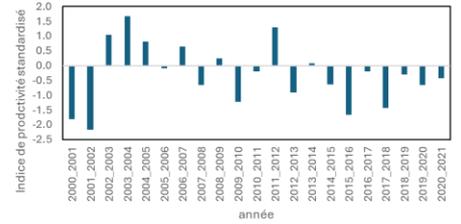
Oued_Erremel|ZAGHOUAN



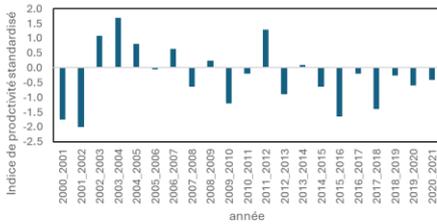
EL_Aitha|ZAGHOUAN



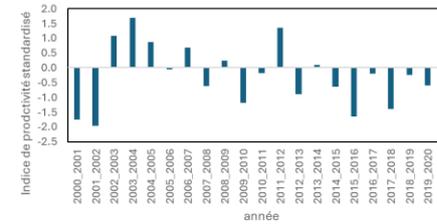
Jimlaj|ZAGHOUAN



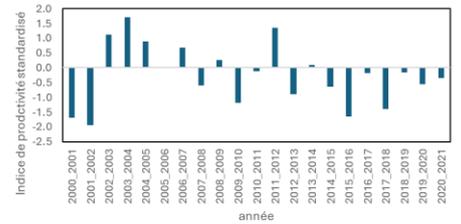
Zaghouan Nord



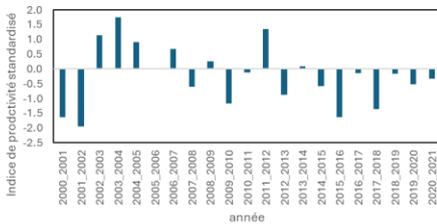
Zaghouan Ville



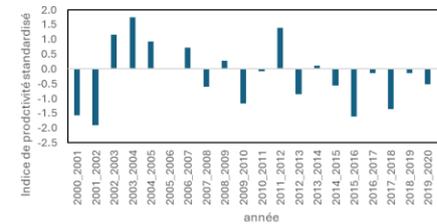
Zaghouan Sud



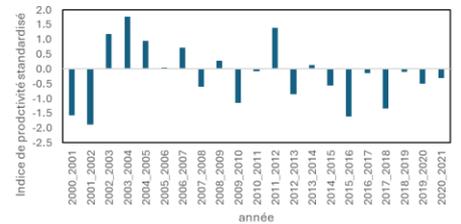
El Fahs



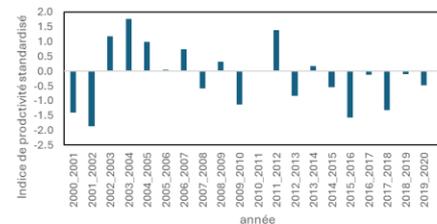
Banlieue D'El Fahs



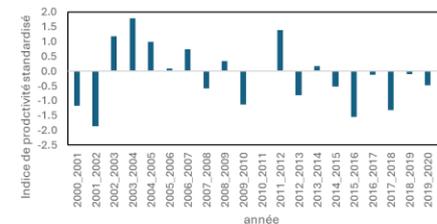
Oued El Khadhra



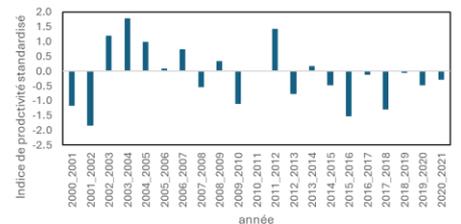
Bent_Saidane|EL_FAHS



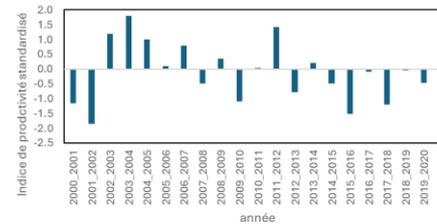
Jougar|EL_FAHS



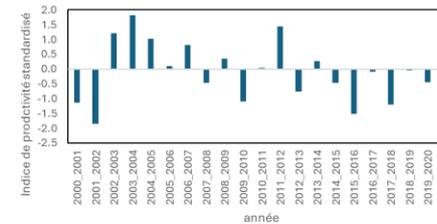
EL_Ghrifet|EL_FAHS



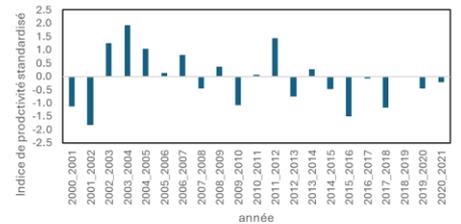
Jbel_Oust|BIR_MCHERGUA



Ain_Asker|BIR_MCHERGUA



Ain_Essafsaf|BIR_MCHERGUA



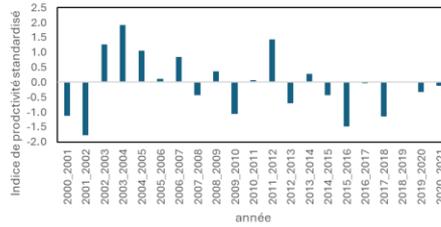


PAQ-PromESSE

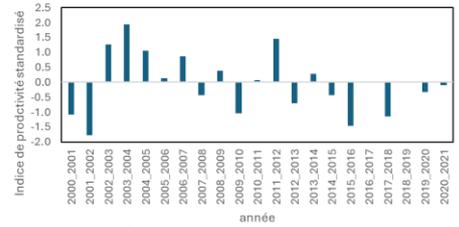
Smenja|BIR_MCHERGUA



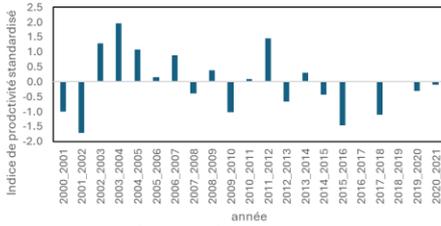
Bir_M'chergua_Gare|BIR_MCHERGUA



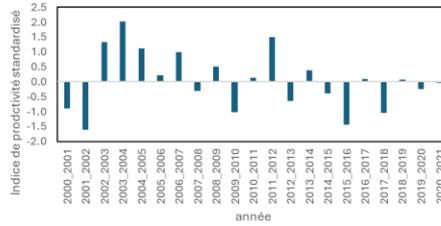
Daleil_EL_Arous|BIR_MCHERGUA



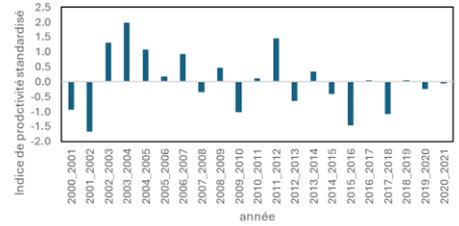
Bir_M'chergua|BIR_MCHERGUA



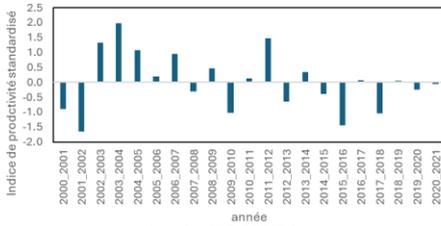
EL_Jouf_Ouest|EZ-ZERIBA



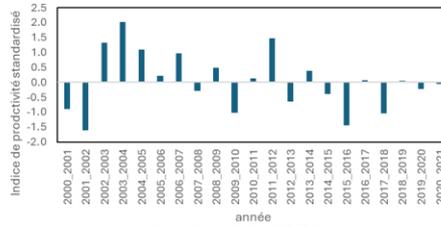
Ezzriba_Hammam_Sud|EZ-ZERIBA



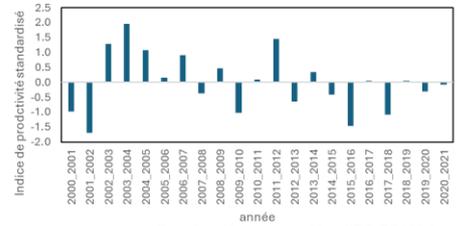
Ain_EL_Batria|EZ-ZERIBA



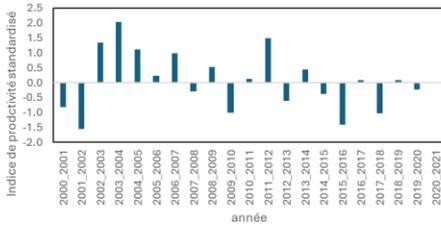
EL_Jouf_Est|EZ-ZERIBA



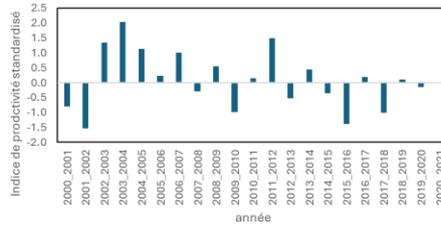
Boucha|BIR_MCHERGUA



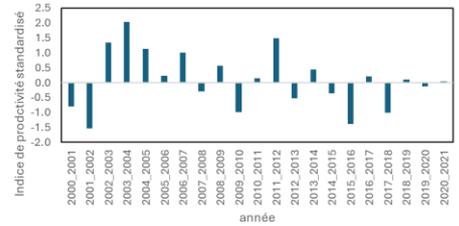
Jeradou|EZ-ZERIBA



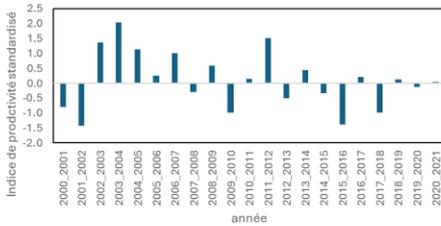
Bou_Achir|EZ-ZERIBA



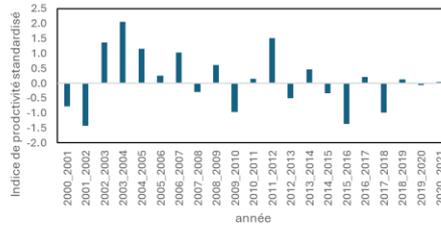
Ezzriba_Hammam_Nord|EZ-ZERIBA



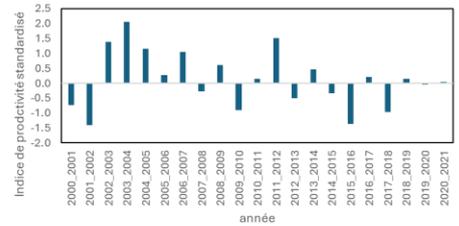
Ezzriba_Village|EZ-ZERIBA



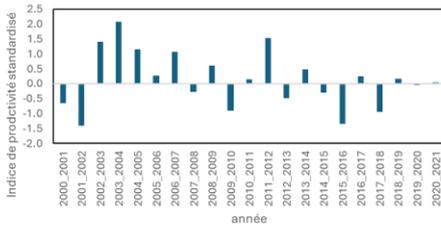
EL_Amaiem_Sud|EL_FAHS



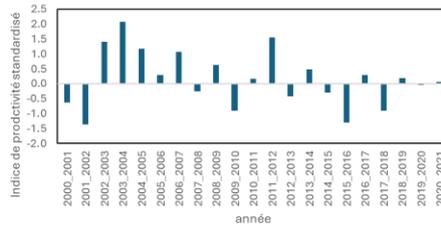
EL_Amaiem_Nord|EL_FAHS



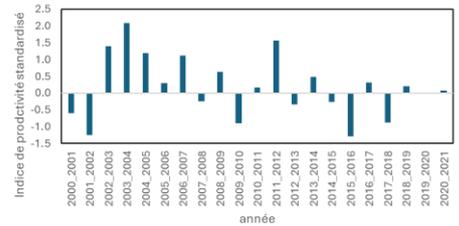
Bir_Magra|EL_FAHS



Tetil_Essathi|EL_FAHS



Ouled_Ezouabi|EL_FAHS



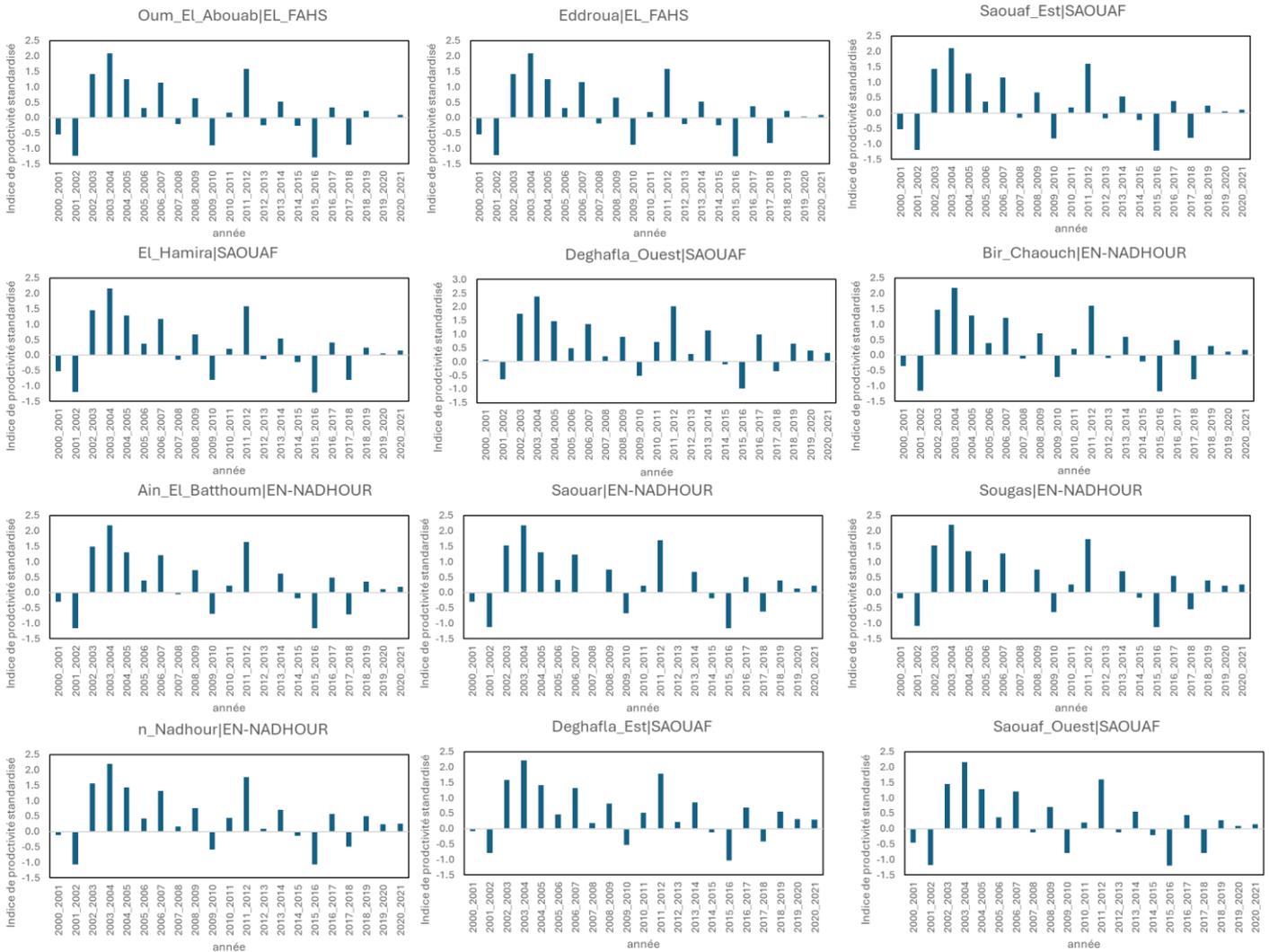


Figure 15. Séries temporelles des indices de productivité de l'évapotranspiration standardisés par imada (Zaghouan)

IV.4 Résultats de l'enquête

L'enquête a commencé le 29 janvier 2024 et a duré 4 mois (Agroservices, 2024). Le tableau 3 donne le nombre d'enquêtes par délégation et gouvernorat. Ces délégations ont été choisies à la suite de la première étape de stratification. La majorité des enquêtés sont des exploitants privés utilisant cette activité comme exclusive ou principale.



Tableau 2. Nombre d'enquêtes réalisées et leur répartition (Agroservices)

Gouvernorat	Délégation	Nbre d'enquête	Total Enquêtes
Jendouba	Bousalem	30	180
	Oued mliz	30	
	Balta Bouaen	30	
	Jendouba Nord	45	
	Jendouba	45	
Siliana	Bargou	35	70
	Bouarada	35	
Zaghouan	Zaghouan	35	140
	Le fahs	70	
	Bir M'Chergua	35	
Total			390

L'enquête met en évidence les superficies emblavées de blé dur, de blé tendre et d'orge dans les gouvernorats de Jendouba, Zaghouan et Siliana (Tableau 4). Les résultats montrent que les superficies cultivées pour toutes les céréales ont augmenté entre 1995 et 2023 dans les trois gouvernorats étudiés.

Tableau 3. Evaluation des superficies emblavées moyennes par type de céréales (en HA)

Gouvernorat	1995-2004			2005-2014			2015-2023		
	Blé dur	Blé tendre	Orge	Blé dur	Blé tendre	Orge	Blé dur	Blé tendre	Orge
Jendouba	6,6	0,1	0,6	15,1	0,7	1,2	21,9	0,6	1,2
Zaghouan	7,7	3,1	2,5	12,9	2,3	8,0	18,3	0,8	16,4
Siliana	13,2	3,4	1,4	27,7	2,4	3,6	36,6	1,7	6,9
Total	8,2	1,8	1,5	16,5	1,6	4,1	23,2	0,8	7,7

Les rendements moyens déclarés en année appréciée comme bonne- moyenne- mauvaise sont indiqués en Figure 16 par gouvernorat. Ils se détériorent nettement en années moyennes et années très déficitaires, pour les trois gouvernorats que ce soit pour l'orge ou le blé dur.

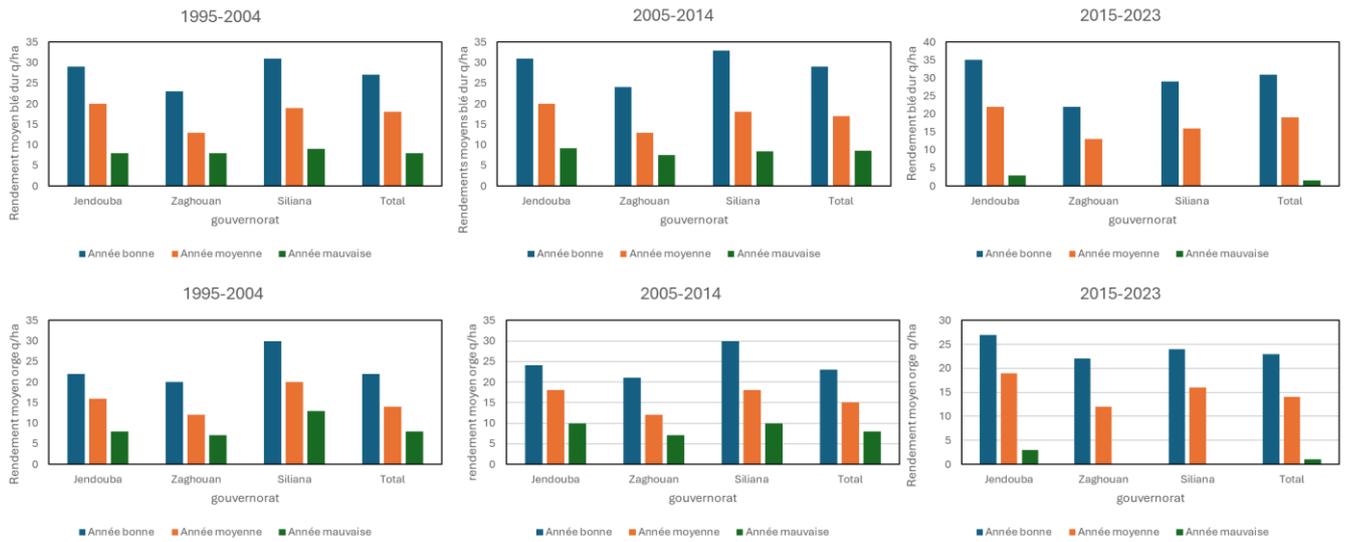
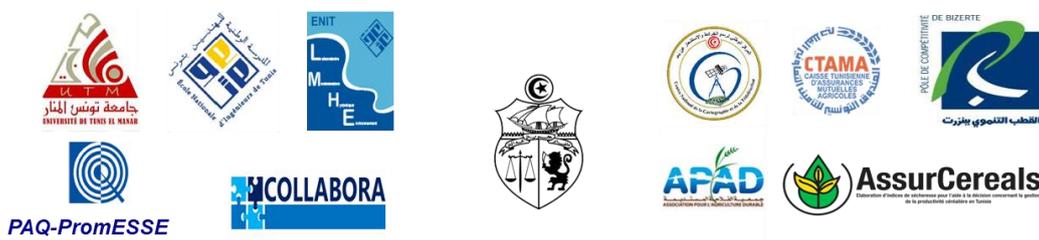


Figure 16. Variabilité des rendements selon le type d'année et le gouvernorat

Le recours aux polices d'assurance pour couvrir les risques a été utilisé par 13,8 % des agriculteurs durant la sous période 2015-2023 alors qu'il ne représentait que 1,6 % durant la période 1995-2004. La proportion des agriculteurs ayant déclaré avoir eu recours à la souscription au FIDAC a atteint 5,6% (Tableau 5). Pour 4,4% l'assurance FIDAC était en parallèle avec une assurance grêle et incendie. 50% des céréaliculteurs enquêtés utilisent le Web pour s'informer sur le niveau de sécheresse à travers des sites tunisiens et étrangers. 40% des agriculteurs interviewés sont disposés à s'insérer dans un système d'annonce de sécheresse numérisé par le Web. 30% d'entre eux sont disposés à cotiser pour adhérer à un tel système.

Tableau 4. Proportion des agriculteurs ayant souscrit au moins une fois à un système d'assurance

	Assurance grêle et incendie		FIDAC		Assurance grêle, incendie & FIDAC	
	Effectif	%	Effectif	%	Effectif	%
Jendouba	29	16,1%	3	1,7%	12	6,7%
Zaghouan	5	3,6%	1	0,7%	3	2,1%
Siliana	3	4,3%	1	1,4%	2	2,9%
Total	37	9,5%	5	1,3%	17	4,4%



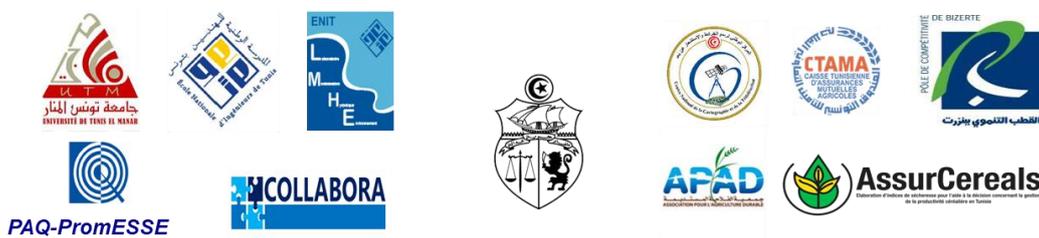
En réponse aux questions sur le degré de satisfaction sur les moyens de couverture des risques, il ressort que la majorité des exploitants interrogés est moyennement satisfaite des services de couverture des risques et plutôt insatisfaite du service de conseil et assistance agricole (Tableau 6).

Tableau 5. Degrés de satisfaction par rapport aux services de couverture des risques

	Très satisfait		Satisfait		Moyennement satisfait		Insatisfait		Très insatisfait	
	Effectif	%	Effectif	%	Effectif	%	Effectif	%	Effectif	%
Diversité des options de couverture	1	2,3%	15	34,1%	13	29,5%	15	34,1%	0	0,0%
Montant de couverture	1	2,3%	9	20,9%	15	34,9%	17	39,5%	1	2,3%
Délai de remboursement	1	2,3%	8	18,6%	17	39,5%	16	37,2%	1	2,3%
Valeur de la prime d'assurance	1	2,4%	8	19,0%	12	28,6%	21	50,0%	0	0,0%
Conseil/assistance	1	2,4%	17	40,5%	6	14,3%	17	40,5%	1	2,4%

V. Discussion et Conclusions

Dans ce recueil, nous avons mis en valeur le potentiel de l'utilisation de la publication, dans le journal officiel de la Tunisie des décrets de sécheresse. Il s'agit d'une information importante pouvant servir de référence de terrain pour différentes études. Dans le présent document, nous n'avons utilisé que l'information (existence / non existence de sinistre). Nous avons présenté les séries spatio-temporelles de deux indices utilisés pour le suivi de la sécheresse. Le premier indice (SPI-3) est utilisé pour l'alerte à la sécheresse agricole. Il est standardisé, normalisé et comparable entre différents sites. Il a aussi l'avantage d'être cartographiable. Ce sont les principaux avantages du SPI-3 mentionnés dans WMO (2012). Nous avons estimé le SPI-3 en utilisant l'information aux postes pluviométriques du réseau national d'observations, qui a une couverture spatiale acceptable. L'estimation du SPI-3 nécessite des séries d'au moins 30 ans. La présence de lacunes a été le principal frein à l'utilisation d'un nombre plus grand de stations, ce qui aurait certainement amélioré la précision de l'interpolation spatiale. Pour pallier le fait que SPI-3 est un indice basé uniquement sur la pluviométrie, nous avons analysé comme deuxième indice, l'indice de productivité de l'évapotranspiration. L'évapotranspiration n'étant pas mesurée dans un réseau spécifique, nous avons utilisé les observations satellitaires MODIS. L'analyse des cartes d'indice par des outils statistiques classiques a permis de retrouver les 11 années sèches déclarées pour le gouvernorat de Zaghouan, ainsi que leur classement par ordre



de gravité. D'autre part, nous avons standardisé cet indice. Ceci a permis de retrouver par imada les années de sinistres (illustration fournie pour le gouvernorat de Zaghouan, mais disponible pour les deux autres également). Le projet a évalué les SPI-3 pour tous les mois de l'année pour le bassin versant de la Medjerda, ce qui devrait permettre d'identifier dans l'avenir le trimestre de SPI-3 le plus responsable des sinistres observés.

VI. Références

Abid, N., Bargaoui, Z & Mannaerts, M, C (2018). Remote sensing estimation of the water stress coefficient and comparison with drought evidence, *International Journal of Remote Sensing*, DOI: 10.1080/01431161.2018.1430917

Abid, N; Ben Jaafar, A; Kebaili Bargaoui, Z. ; Mannaerts, C (2024). Assessment of long-term MOD16 and LSA SAF actual evapotranspiration using Budyko curve. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 34 (2024) 101166.

Abid, N and Bargaoui, Z (2022). Quantile-quantile Correction of Satellite-based Relative Productivity in Northern Tunisia. *Publications of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences Geophysical Data Bases, Processing and Instrumentation* vol. 443 (E-13), 2022, pp. 29–34. DOI: 10.25171/InstGeoph_PAS_Publs-2022-039. *International Symposium on Drought and Climate Change*, 24–25 November 2022

Agroservices, rapport de la mission, 2024. Mission de réalisation d'une enquête agricole auprès des exploitants céréaliers dans les gouvernorats de Jendouba, Zaghouan et Siliana, 17p.

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper No 56*, UN-FAO, Rome

Eagleson, P., 1994. The evolution of modern hydrology. *Advances in water resources*. 17 (1994), 3-18

Hu, G., Jia, L., Menenti, M., 2015. Comparison of mod16 and LSA-SAF MSG evapotranspiration products over Europe for 2011. *Rem. Sens. Environ.* 156, 510–526. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.10.017>.

Kebaili Bargaoui, Z.; Jemai, S. *SPI-3 Analysis of Medjerda River Basin and Gamma Model Limits in Semi-Arid and Arid Contexts. Atmosphere* **2022**, *13*, 2021. <https://doi.org/10.3390/atmos13122021>

Mu, Q., Heinsch, F.A., Zhao, M., Running, S.W., 2007. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sens. Environ.* 111, 519–536, 2007.

WMO 2012 Standardized Precipitation Index User Guide. WMO report n°1090.