



Variabilité bioclimatique de l'olivieraie du Centre-Est Tunisien, cas de Sfax, dans un contexte de changement climatique

Mohamed Feki^{1*} et Olfa Elloumi²

¹ Université de Sfax, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Laboratoire SYFACTE, route de l'aéroport km 4.5, Sfax, Tunisie

² Université de Sfax, Institut de l'Olivier (IO), LR16IO01, BP 1087, Sfax 3000, Tunisie

* Auteur de correspondance : Mohamed Feki, m_feki@hotmail.com

Reçu 22 octobre 2023 ; Accepté 20 décembre 2023

Résumé

L'oléiculture est une des plus vieilles cultures en Tunisie et occupe une place de choix tant aux plans écologique et agricole qu'aux plans socio-économique. Toutefois, cette culture, conduite principalement en mode pluvial, est menacée par le réchauffement climatique qui entraîne un avancement de ces stades phénologiques et parfois une modification de la qualité des huiles produites. Dans cette étude, la variabilité temporelle des températures dans la région de Sfax, première producteur et exportateur d'huile d'olive du pays ont été analysées avec une approche multi-scalaire. De même, les impacts de ces variations sur le comportement de l'olivier ont été analysés. Il se trouve que l'évolution temporelle des températures a montré un réchauffement général depuis le milieu des années quatre-vingt pour les températures annuelles, et les débuts des années quatre-vingt et quatre-vingt-dix pour celles mensuelles. Les répercussions de ce réchauffement sur l'olivier pendant sa période végétative (entre mars et début novembre) ont été étudiées et ont souligné une hausse des degrés jours depuis le milieu des années quatre-vingt. Enfin, L'analyse de la fréquence d'apparition des types de circulation atmosphérique et de leurs manifestations en termes de "situation de douceur" sur la région, de décembre à février, a permis d'expliquer la variabilité de la date de débourrement de l'olivier et la précocité du cycle observée depuis 2014.

Mots-clés : Olivier, réchauffement climatique, débourrement, circulation atmosphérique

Abstract

Olive growing is one of the oldest crops in Tunisia and takes a place of choice both in ecological and agricultural plans and in socio-economic plans. However, this crop, mainly conducted in dry farming, is threatened by the global warming which leads to an advancement of these phenological stages and sometimes a modification of the quality of the olive oils. In this paper, the temporal variability of temperatures in the Sfax region, the first producer and exporter of olive oil in the country, was analysed with a multi-scalar approach. Firstly, the temporal evolution of temperatures showed a general warming since the mid-1980s for annual temperatures, and the early 1980s and 1990s for monthly temperatures. Secondly, the effects of this warming on the olive tree during its vegetative period (between March and the beginning of November) were studied and highlighted an increase in degree days since the mid-1980s. Finally, the analysis of the frequency of occurrence of atmospheric circulation types and their manifestations in terms of "mildness situation" over the region, from December to February, allowed to explain the variability of the olive tree budburst date and the precocity observed since 2014.

Keywords: Olive tree, global warming, budburst, atmospheric circulation

1. Introduction

Au sud de la méditerranée, la Tunisie est le pays le plus réputé pour la culture de l'olivier et l'exportation de l'huile d'olive, après l'Union européenne. L'oléiculture y'est l'une des plus vieilles cultures, avec plus que 100 millions d'oliviers couvrant une superficie de 2million d'hectare (DGPA, 2022). Le secteur oléicole occupe une place importante sur tous les plans agricole, écologique et socio-économique. En effet, ce secteur représente la principale activité pour 60 % des exploitants agricoles. Les différents maillons de la filière oléicole (production, transport, trituration, stockage, commercialisation, etc.) génèrent des emplois directs ou indirects estimés à plus d'un million de personnes et 34 millions de jours de travail par an, soit 20 % de l'employabilité dans le secteur de l'agriculture (Karray et Kanoun, 2013 ; Gharbi et al., 2014 ; OLIVÆ ; 2017).

La forêt oléicole tunisienne occupe un tiers environ des superficies cultivées dans le pays. Elle est conduite principalement en pluvial (94 %) et sous différents bioclimats, allant de l'humide à l'aride. L'effectif des oliviers est largement distribué sur tout le territoire avec 30% au Nord, 45% au Centre et 25% dans le Sud (DGPA, 2022). Les oliviers sont plantés le plus souvent en monoculture et parfois en intercalaire avec d'autres arbres fruitiers. Cependant, la production oléicole tunisienne est très variable d'une année à l'autre, en raison du phénomène d'alternance et des conditions climatiques extrêmement aléatoires (sécheresse et aridité) notamment dans le Centre et le Sud de la Tunisie (Ben Rouina, 2007 ; Gharbi et al., 2014 ; Olivae, 2017).

La région Méditerranéenne se trouve confrontée au défi de changement climatique. En effet, des hausses de températures ont été enregistrées durant la dernière décennie ainsi que les projections futures alertent des situations plus pessimistes (IPCC, 2021 ; Fraga et al., 2021). La Tunisie est considérée comme un hot spot selon les études relatives au changement climatique (Benmoussa et al., 2020 ; Fernandez et al., 2022). Ceci s'est traduit par un manque du froid hivernal, facteur clé pour la production fruitière (Elloumi et al., 2022a, 2022b).

La région du centre Tunisien se trouve caractérisée par les conditions hivernales les plus douces à travers le monde ce qui peut entraver la viabilité des vergers arboricoles (Elloumi et al., 2013 ; Benmoussa et al., 2017a, 2017b, Ghrab et al., 2016). La région de Sfax (Centre-Est de la Tunisie), premier producteur d'olive du pays avec 20% des superficies cultivées (98% en mode pluvial) et 10% des pieds d'oliviers, est le premier exportateur d'huile (DGPA, 2015). Cette région se caractérise par un bioclimat subaride marqué par un déficit hydrique permanent et une grande variabilité des pluies (moyenne de 200 mm). Les ancêtres y ont pu s'adapter et y planter les oliviers à la fin du 19^{ème} siècle selon la technique de "dry farming". Cette technique consiste à planter les oliviers (variété Chemlali) à faible densité de 17 pieds par ha (24*24 m) pour profiter au maximum des eaux des pluies et en assurant un labour continu pour contrôler les mauvaises herbes et éliminer les pellicules de battance qui se forment à la suite des pluies. Ceci facilite l'infiltration des eaux des pluies et profiter de l'humidité de l'air en cas de sécheresse etc. Tout ce savoir-faire se trouve, ainsi, menacer puisqu'avec le réchauffement contemporain, les arbres subissent plus tôt, d'un peu plus de chaleur ce qui entraîne un avancement de leurs cycles phénologiques (Estrella et al., 2007 ; IPCC, 2013 et 2021 ; Augspurger, 2009 ; Morin et Chuine, 2014 ; Bigler et Bugmann, 2018 ; Liu et al., 2018 ; Planchon et al., 2019). En conséquence, plusieurs études ont montré l'impact de la hausse des températures hivernales sur le comportement phénologique des oliviers et des arbres fruitières, marqué par un avancement ou un retard des stades phénologiques, ce qui perturbent la production agricole en termes de quantité et de qualité et impacte la performance des oliviers et des arbres fruitiers en zone aride (Abichou et Msellem, 2015 ; Ben Mimoun, 2008 ; Ben Dhiab et al., 2017 ; Benmoussa et al., 2017a, 2017b et 2018 ; Ben Rouina et al, 2002 ; Ben Rouina, 2007 ; Elloumi et al., 2013 et 2020 ; Ghrab et al., 2014a, 2014b et 2016). Des "épisodes de chaleurs précoces" en hiver et au printemps en pleine période de floraison de l'olivier compromettent la production (Abichou et Msellem, 2015 ; Ben Dhiab, 2016 ; Elloumi et al., 2020 ; Ranasinghe et al., 2021).

La variabilité climatique est préoccupante pour la viabilité des vergers et la sécurité alimentaire. Dans ce contexte et afin de comprendre les tendances du climat et leur impact sur le secteur agricole, une investigation a été conduite pour analyser des séries de données climatiques et phénologiques. Cette étude se focalise sur une région potentielle pour la culture de l'olivier à savoir celle de Sfax au Centre Est de la Tunisie. L'objectif est de i) caractériser la variabilité des températures à long terme et en conséquence le réchauffement climatique, ii) évaluer l'impact de ces variations sur l'oléiculture à travers l'analyse de la phénologie de la principale variété d'olivier Chemlali largement cultivée à travers le pays.

2. Matériel et méthodes

2.1. Cadre géographique

La région de Sfax, ou les basses steppes méridionales est marquée par un relief monotone avec une plaine basse et peu accidentée. Ainsi la topographie montre une nette zonation de la mer vers l'intérieur, où trois domaines se visualisent avec une large plaine, un bas plateau et un domaine de collines. Ce dernier, qui constitue le point de départ des principaux cours d'eau, présente de faibles altitudes qui dépassent rarement 250m notamment à l'Ouest (Dhraâ Lahirech, 269m ; Djebel Chebka, 255m). La majeure partie de la zone d'étude se caractérise par des plaines larges aux altitudes inférieures à 150m, dont une bande littorale d'environ 15 km de largeur où l'altitude moyenne est de 20m. L'ensemble s'incline régulièrement de l'Ouest à l'Est vers la mer méditerranéenne.

Le bioclimat est subaride caractérisé par un déficit hydrique (Précipitation – Evapotranspiration potentielle ETP) permanent d'environ -1600 mm (Boussnina, 1997 ; Hénia, 1993, 2008 ; Hlaoui, 2006 ; MEH, 2013). Les températures moyennes montrent une alternance de trois saisons thermiques : froide, chaude et intermédiaire (Dahech, 2012a, 2012b, 2013 ; Dahech et Ghribi, 2017 ; Euch, 2021). L'hiver qui s'étale de décembre à février soit trois mois successifs est la saison froide avec une température moyenne de 12.3°C où janvier est le mois le plus froid (11.5°C). Puis, une longue saison chaude y compris l'été et qui s'étale sur six mois, de mai à octobre, avec une température moyenne de 24.9°C dont août est le mois le plus chaud de l'année (27.4°C). Enfin, des saisons intermédiaires courtes où les températures moyennes atteignent 18°C (novembre pour l'automne et mars-avril pour le printemps).

Les précipitations annuelles de 234mm en moyenne (1950-2020) cachent en réalité une variabilité interannuelle importante puisque l'écart entre l'année la plus sèche (1961) et l'année la plus humide (1969) pourra atteindre 7 fois. La saison des pluies est concentrée sur l'automne (43%), suivie par l'hiver et le printemps, respectivement de 29% et 25%. Le maximum de pluies est enregistré en octobre (47mm) et le minimum en juillet (1mm). Les sources de pluies sont les flux humides du Nord-Est (80%) (Hénia, 2008 ; ElMelki, 2013). Mais les irrégularités intra annuelles, saisonnières, mensuelles et journalières, sont aussi fortes importantes. Le diagramme Ombro-thermique réalisé selon la formule $P = 2t$, montre une sécheresse permanente (aridité intense) toute l'année sauf en octobre (Figure 1).

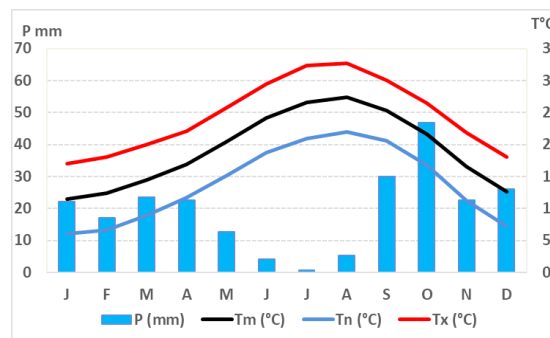


Figure 1. Diagramme Ombro-thermique de la station de Sfax pendant la période 1950-2020.

Les précipitations annuelles ne montrent aucune tendance du fait de la très forte variabilité interannuelle, spécificité de pluviométrie dans toute la Tunisie (Figure 2a). Également pour les pluies mensuelles sauf celles d'octobre, mois le plus humide de l'année avec 20% du total pluviométrique annuelle. Les précipitations présentent une rupture en 1986 selon le test de Pettitt, avec une tendance à la baisse (Figure 2b) de 45mm entre la période pré-rupture (68mm) et celle post-rupture (24mm), suite à une diminution remarquable des événements extrêmes dépassant 100mm.

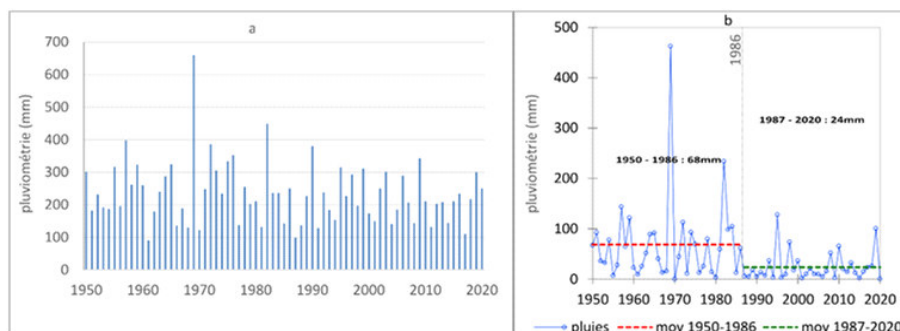


Figure 2. Variabilité des précipitations totales annuelles et celles du mois d'octobre à Sfax de 1950 à 2020.

2.2. Méthodologie

2.2.1. Base de données

Les données de la station de Sfax (alias Sfax-El-Maou) ont été téléchargées sur le site NOAA et ont été analysées. Cette station synoptique localisée dans l'aérodrome à 6 km du centre-ville, fournit des données de bonne qualité (Dahech, 2010, 2013). Il s'agit des températures journalières minimales et maximales

enregistrées entre janvier 1950 et décembre 2020. Ces données ont permis de calculer les températures minimales, maximales et moyennes mensuelles pour étudier l'évolution thermique sur une période suffisamment longue (70 ans), et de qualifier et quantifier le réchauffement climatique dans les Basses Steppes Méridionales. Les données journalières (Tmax et Tmin) manquantes sont rares et représentent environ 0.2% de la base de données et elles ont été remplacées par des moyennes des températures (enregistrées sur une longue période) de la même date.

2.2.2. Somme degrés-jours (SDJ)

Plusieurs techniques statistiques ont servi pour appréhender le réchauffement climatique et son impact sur la phénologie de l'olivier via l'indice bioclimatique "somme degrés-jours" de Winkler (SDJ ; Winkler et al., 1974). En effet, le test de Pettitt, aux seuils de confiance de 90, 95 et 99%, a été utilisé pour la détection d'une rupture thermique dans la série statistique et pour la recherche d'éventuelle tendance significative au réchauffement. Ce test non paramétrique basé sur le rang, permet de déterminer si la corrélation entre le temps et la variable d'étude est significative ou pas (Pettitt, 1979 ; Hirsch et Slack, 1984). Il a été appliqué aux températures moyennes annuelles et mensuelles (Tn, Tx et Tm). Par la suite, l'indice SDJ a été calculé pour étudier l'influence du climat sur l'olivier de Sfax. Le degré jour est «unité utilisée pour caractériser l'effet des températures au cours du temps sur le développement et la croissance d'une culture. Le degré jour représente, pendant une journée, l'influence, sur le développement d'une culture, d'un degré de température au-dessus de son seuil de développement» (<http://www.grignon.inra.fr/economie-publique/MIRAJE/gloss.htm>). Il est plus pertinent que les températures brutes, car il est en relation avec les différents stades phénologiques de la végétation (Bonnefoy et al., 2010). Pour l'olivier, le cumul degré-jour correspond à la somme des températures moyennes journalières à partir de la base de 7.2°C (Elloumi et al., 2020), effectuée entre le 1^{er} mars (date moyenne du débourrement) et 8 novembre (début de la récolte) :

$$SDJ = \sum T_j - 7.2 \text{ (avec } T_j > 7.2)$$

2.2.3. Classification de Hess-Brezowsky

Les conditions thermiques hivernales qui précèdent le réveil végétatif sont cruciales pour l'olivier (Elloumi et al., 2020). Elles sont liées à une dynamique atmosphérique d'échelle synoptique. La fréquence des types de circulation atmosphérique selon la classification de Hess-Brezowsky permet de cerner la variabilité interannuelle de la date de débourrement de l'olivier.

L'analyse de situations synoptiques responsables du débourrement précoce de l'olivier est basée sur les types de circulation atmosphérique réalisés par Hess et Brezowsky (Großwetterlagen ou en abrégé GWL ; Cantat et al., 2019 ; Planchon et al., 2019 ; Quenol, 2014). Cette classification, largement utilisée pour mettre en relief la circulation atmosphérique et sa variabilité sur l'Océan Atlantique Nord et l'Europe, peut être utilisée pour étudier la variabilité du climat sur le Maghreb y compris la Tunisie. Elle s'appuie sur le champ de pression au niveau de la mer et vers 5 000 m d'altitude (géopotential à 500 hPa) au-dessus de l'Océan Atlantique Nord et de l'Europe (Cantat et al., 2019 ; Planchon et al., 2019). Ce champ de pression commande en grande partie le type de circulation atmosphérique en Tunisie (ElMelki, 2013). Le catalogue quotidien des types de circulation de Hess-Brezowsky archivé et mis à jour par le Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) jusqu'en 2009 (Werner et Gerstengarbe, 2010), puis, mis à jour et publié depuis 2003 par le Deutscher Wetterdienst, identifie 29 types de circulations regroupés en cinq classes (Gerstengarbe et Verner, 2005 ; GWL) (Tableau 1). La classification de Hess et Brezowsky et le catalogue quotidien sont largement exploités pour identifier les circulations atmosphériques gélives et leurs impacts sur les vignobles européennes (Quénol, 2014 ; Planchon et Endlicher 2014 ; Planchon et al., 2019, Cantat et al., 2019). L'accent sera mis sur l'hiver qui représente une saison critique pour le cycle de développement de l'olivier.

Tableau 1. Types de circulations de la classification de Hess-Brezowsky
(Planchon et al., 2019)

Grand Type (GWT) et types (GWL)	Code
Circulations d'Ouest	
Circulation d'ouest, anticyclonique	WA
Circulation d'ouest, cyclonique	WZ
Circulation d'ouest méridionale	WS
Circulation d'ouest "formant un angle"	WW
Circulations de Sud	

Circulation de sud-ouest, anticyclonique	SWA
Circulation de sud-ouest, cyclonique	SWZ
Circulation de sud, anticyclonique	SA
Circulation de sud, cyclonique	SZ
Dépression sur les îles Britanniques	TB
Talweg sur l'Europe occidentale	TRW
Circulation de sud-est, anticyclonique	SEA
Circulation de sud-est, cyclonique	SEZ
Circulations de Nord-Ouest et de Nord	
Circulation de nord-ouest, anticyclonique	NWA
Circulation de nord-ouest, cyclonique	NWZ
Circulation de nord, anticyclonique	NA
Circulation de nord, cyclonique	NZ
Anticyclone sur l'Islande, anticyclonique	HNA
Anticyclone sur l'Islande, cyclonique	HNZ
Anticyclone sur les îles Britanniques	HB
Talweg sur l'Europe centrale	TRM
Circulations de Nord-Est et d'Est	
Circulation de nord-est, anticyclonique	NEA
Circulation de nord-est, cyclonique	NEZ
Anticyclone sur la Fennoscandie, anticyclonique	HFA
Anticyclone sur la Fennoscandie, cyclonique	HFZ
Anticyclone sur mer de Norvège –Fennoscandie, anticyclonique	HNFA
Anticyclone sur mer de Norvège –Fennoscandie, cyclonique	HNFZ
Centre d'action sur l'Europe Centrale	
Anticyclone sur l'Europe centrale	HM
Dorsale anticyclonique sur l'Europe moyenne	BM
Dépression sur l'Europe centrale	TM
Indéfini	U

3. Résultats

3.1. Hausse des températures et réchauffement climatique

Les températures moyennes annuelles (Tm) enregistrées depuis 1950 dans les basses steppes méridionales, montrent une nette tendance au réchauffement depuis le milieu des années 80. Le test statistique de Pettitt, seuil de confiance de 99%, indique une rupture climatique en 1986 (Figure 3). Ainsi une augmentation des Tm de 1,3°C se présente entre les périodes pré-rupture et post-rupture, en passant respectivement de 18.6°C à 19.9°C.

De même, les températures moyennes maximales (Tx) confirment également la hausse des températures et par suite le réchauffement pour la même date de rupture climatique (Figure 3). Ainsi suite à la rupture observée en 1986, une hausse de 1.1°C a été comptabilisé entre les périodes pré-rupture (24°C) et post-rupture (25.1°C).

Ce réchauffement global ressenti en se basant sur les Tm et Tx et avec une rupture climatique significative en 1986 se trouve bien installé un peu plus tôt en se référant aux températures moyennes minimales (Tn) (Figure 3). En effet, l'analyse des données révèle une rupture climatique en 1984 pour les Tn en enregistrant la hausse la plus importante de 1,5°C. Ainsi, Tn a passé de 13.1°C entre 1950 et 1984 à 14.6°C entre 1985 et 2020. Cette tendance marquée les températures minimales aura des impacts sur le développement des oliviers et des arbres fruitiers.

L'observation des températures mensuelles (T_n , T_x et T_m) depuis 1950 dans la région de Sfax confirme ce réchauffement, puisque le test de Pettit signale une rupture (seuil de confiance de 99%) dans tous les mois sauf en février et mars (T_x). Ainsi il se trouve qu'une hausse des températures s'est déroulée en deux phases correspondant à la décennie 1980 et celle 1990 (Tableau 2). Elle est plus importante pour les températures minimales (T_n) et moyennes (T_m) que pour les maximales (T_x). En effet, les augmentations ont été de 0.9°C à 2.8°C pour les T_n et T_m et de 1.1°C à 1.8°C pour T_x .

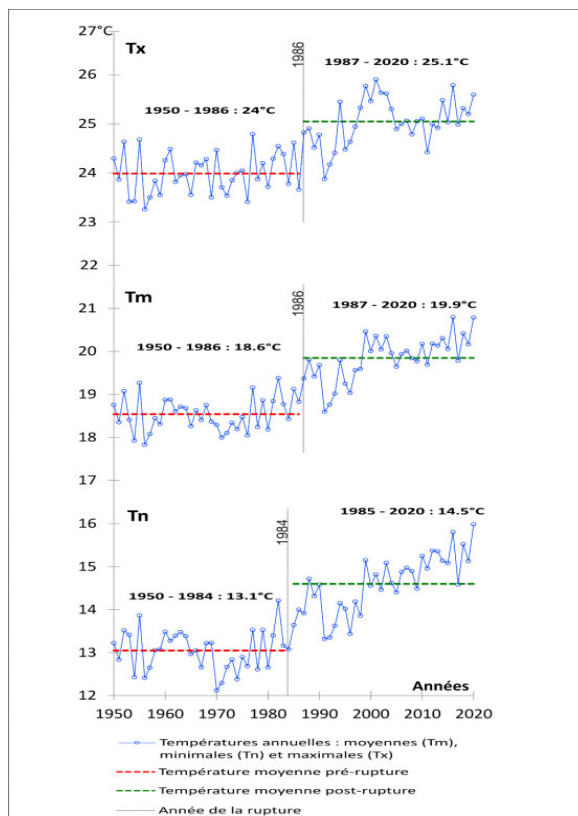


Figure 3. Evolution des températures annuelles dans la région de Sfax entre 1950 et 2020 et année de rupture selon le test de Pettitt.

Du point de vue chronologique, la tendance au réchauffement a commencé dès le début des années 1980 pour l'automne et la fin de l'été (août), alors qu'elle s'est déroulée à partir de 1992 pour les autres saisons (Tableau 2). Cette investigation révèle que les mois de septembre et octobre ont connu le réchauffement le plus important où ils ont enregistré une hausse de température supérieure ou égale à 2°C comparativement aux autres mois où elle était entre 1.1°C et 1.9°C. Les températures maximales ont montré également une tendance à la hausse à partir des années 1980 aussi bien pour l'automne et l'été (sauf juin), et à partir de 1992 pour les autres mois sauf février et mars (pas de date de rupture). Cette élévation des températures maximales est moins importante en comparaison aux températures moyennes et elle était de 1.1°C à 1.8°C. Toutefois, le réchauffement est très net pour toutes les températures minimales mensuelles. Au début, il a concerné la fin de l'hiver à savoir février 1974, puis la période août-janvier à partir des années 1981 et enfin le printemps et l'été (sauf le mois d'août) dès 1992. Ce réchauffement, qui était faible en hiver (de 0.9°C à 1.2°C), s'accroît et devient fort ailleurs voire même très fort, notamment au milieu et à la fin de chaque saison où les minimas ont enregistré une augmentation de plus de 2°C.

Tableau 2. Ruptures statistiques des températures moyennes (Tm), minimales (Tn) et maximales (Tx) mensuelles entre 1950 et 2020 dans la région de Sfax (en rouge les hausses les plus fortes et en bleu les plus faible ; * = absence de rupture).

Mois	Tm				Tn		Tx	
	rupture	hausse	rupture	hausse	rupture	hausse	rupture	hausse
J	1995	1.1	1987	0.9	1993	1.1	1993	1.1
F	*	*	1974	0.9	*	*	*	*
M	1998	1.2	1998	1.5	*	*	*	*
A	1997	1.9	1997	2.1	1997	1.6	1997	1.6
M	1992	1.7	1992	2.0	1992	1.3	1992	1.3
J	1992	1.6	1992	1.9	1992	1.3	1992	1.3
J	1996	1.9	1996	2.8	1981	1.1	1981	1.1
A	1985	1.8	1985	2.3	1984	1.1	1984	1.1
S	1986	2.5	1988	1.6	1986	1.3	1986	1.3
O	1985	2.0	1985	2.1	1985	1.8	1985	1.8
N	1982	1.5	1981	1.7	1982	1.3	1982	1.3
D	1993	1.1	1983	1.2	1991	1.3	1991	1.3

Ainsi, le réchauffement climatique se manifeste de manière très claire dans la région de Sfax et par conséquent dans la Tunisie notamment pour les températures minimales, confirmant les précédents résultats (Dahech, 2013). Ce réchauffement bien ressenti et confirmé à travers l'analyse des séries de données est certainement une contrainte pour le développement de l'olivier et des arbres fruitiers qui caractérise le paysage agricole de la région d'étude. Il est bien connu que la phénologie et le développement de l'olivier est en relation avec le régime thermique de la zone de culture. En effet, la première phase du réchauffement (décennie 1980) représente la fin du cycle annuel de l'olivier ; il s'agit de la période août-novembre qui coïncide avec le grossissement des fruits (août) et leur maturation et la récolte (automne). En revanche, le réchauffement de la deuxième phase (décennie 1990) concerne le début du cycle végétatif. Il s'agit de la période d'avril-juillet qui correspond bien aux quatre stades phénologiques à savoir fin débourrement, floraison, nouaison et durcissement des noyaux.

3.2 Impact du réchauffement climatique sur l'olivier

3.2.1. Impact du réchauffement sur l'activité végétative de l'olivier : la somme degré-jour (SDJ)

Le cumul degré jour (Dj) calcule l'accumulation de chaleur pendant une période donnée et permet d'estimer la croissance d'une plante. Il s'agit d'une approximation linéaire du développement des différentes phénophases (débourrement, floraison, véraison et maturité). La somme degré-jour est largement utilisée en agro-climatologie pour étudier l'impact du climat sur les cultures. Le test de Pettitt appliqué aux cumuls degrés-jours entre 1950 et 2020 montre une rupture en 1984, signalant une hausse des cumuls moyens de 3570 Dj (1950-1984) à 3952 Dj (1985-2020) soit une hausse de 382 Dj entre les périodes pré-rupture et post-rupture, et ce suite à la hausse des températures moyennes, notamment celles minimales qui présentent la même date de rupture 1984 (Figure 4).

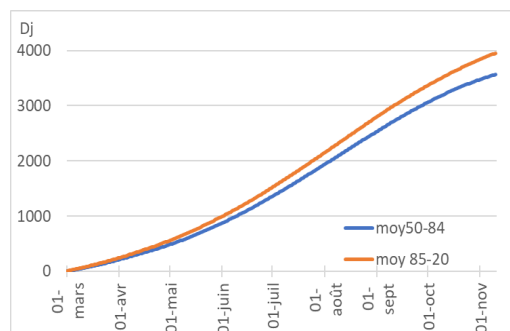


Figure 4. Evolution du cumul des degrés-jours (DJ) avant et après la rupture dans la région de Sfax (moy = moyenne).

La hausse de l'indice SDJ a des conséquences sur la phénologie de l'olivier. Ainsi, les écarts entre les deux profils de l'indice SDJ deviennent de plus en plus importants à partir du mois d'août (Figure 4). Ceci traduit bien l'impact de réchauffement (Tn, Tx, et Tm) observé depuis la décennie 1980 pour la période août-novembre, c'est-à-dire, la deuxième moitié du cycle biologique de l'olivier qui correspond aux phénophases: grossissement des fruits, véraison, maturation et récolte.

Le réchauffement climatique se répercute sur l'indice SDJ avec une évolution vers des valeurs plus élevées à partir de 1984 d'après le test de Pettitt (Figure 5). L'apport en chaleur pendant cette période est confirmée par trois cents oléiculteurs de la région d'Agareb (20 km à l'ouest de la ville de Sfax) lors d'une enquête réalisée en juin 2020 et qui s'est intéressée à leur perception aux changements climatiques. Ils étaient tous unanimes que la maturité se déroule désormais sous des conditions plus chaudes, notamment aux mois d'octobre et de novembre, et que la récolte s'effectue maintenant dès fin décembre pour avoir un bon rendement et une huile d'olive de bonne qualité.

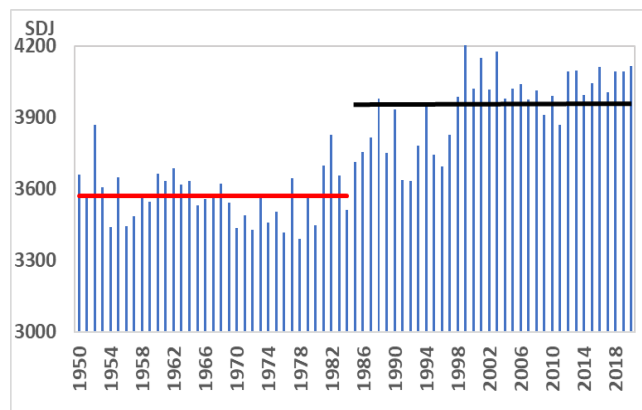


Figure 5. Variabilité temporelle de l'indice Somme Degrés Jour (SDJ) dans la région de Sfax (trait rouge = moyenne 50-84 ; trait noir = moyenne 85-20).

3.2.2. Impact du réchauffement sur la variabilité de la date débourrement de l'olivier

Le suivi de la phénologie de l'olivier a révélé que la date de débourrement est fortement affectée par les conditions locales et elle a montré une forte variabilité d'une année à l'autre pour la période considérée de 2005 à 2015. Le débourrement de la principale variété d'olivier Chemlali de la région de Sfax est en moyenne observé le 13 mars, mais on note la grande variabilité interannuelle. Des occurrences des dates de débourrement plus précoces (Figure 6) ont été enregistrées notamment au cours des sept dernières années où des hivers très doux ont sévi. Les dates de débourrement les plus précoces ont eu lieu en 2014 et 2017, respectivement les 19 et 20 février, et la plus tardive en 2015, le 19 avril. En 2021, le débourrement a eu le 3 février, soit une date précoce record et un avancement de 38 jours par rapport à la date moyenne de débourrement (13 mars). La courte série des relevées phénologiques collectée à l'Institut de l'Olivier ne permet pas de détecter une tendance à la précocité de la date de débourrement de l'olivier malgré la perception générale des différents intervenants du secteur. Ainsi, d'après l'enquête réalisée dans la région d'Agareb, il se trouve que 80% des oléiculteurs parlent d'un avancement de 10 jours du début de débourrement de l'olivier.

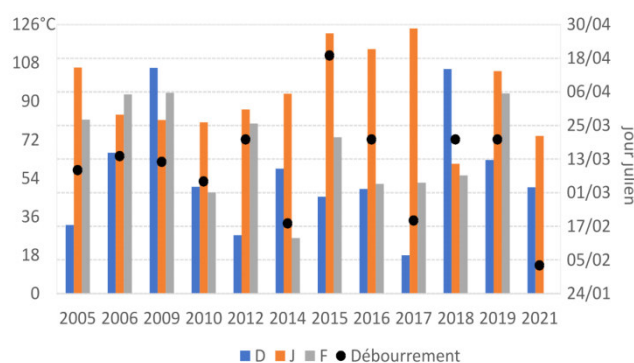


Figure 6. Variabilité annuelle de la date de débourrement de l'olivier dans la région de Sfax entre 2005 et 2021 en fonction de la somme des températures des mois de Décembre (D), Janvier (J) et Février (F) $\leq$ à 7.2°C.

Il a été annoncé que l'avancement de la date de débourrement est expliqué par des hivers doux comme conséquence du réchauffement climatique. Ainsi, la hausse des températures en hiver se traduit pour l'olivier par une baisse du refroidissement hivernal, une faible accumulation du froid et un débourrement précoce. L'analyse des séries de données climatiques de la région de Sfax a révélé que la somme du froid hivernal (températures minimales journalières inférieures à 7.2°C du 1^{er} décembre au 28 février entre 1950 et 2021) confirme des conditions de plus en plus douces avec une baisse du refroidissement hivernal (Figure 7). Le test de Pettitt indique une rupture en 1984 pour la variabilité interannuelle de la somme des températures minimales inférieures à 7.2°C, comme il a été observé pour l'indice SDJ. Cette somme est passée en moyenne de 287°C à 236°C entre 1950-1984 et 1985-2021 (Figure 7a), soit une baisse de 51°C. A l'échelle mensuelle, la baisse du froid concerne uniquement le mois de décembre dont le test de Pettitt signale une rupture en 1983, avec une diminution du froid hivernal de 27°C (Figure 7b). Cette variabilité interannuelle de la somme des températures minimales inférieures à 7.2°C aura des impacts sur le comportement de l'olivier qui sera obligé de retarder la période de repos végétatif et de l'écourter si la douceur hivernale se poursuit jusqu'à février, et se traduit d'après les oléiculteurs par un avancement de la date de débourrement et de la floraison.

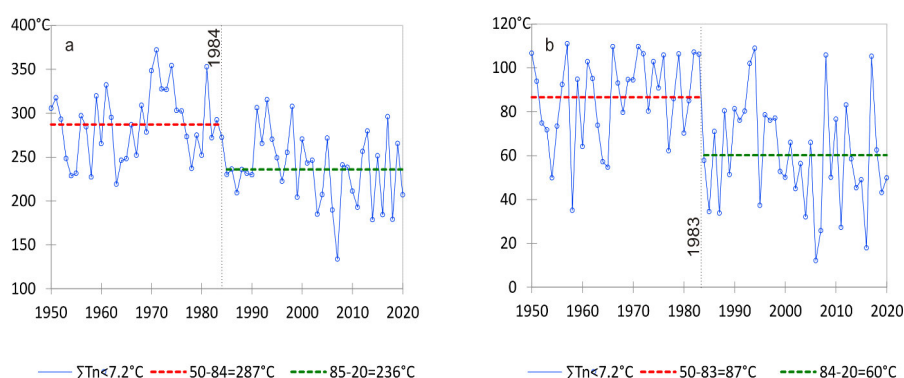


Figure 7. Variabilité interannuelle de la somme des températures minimales inférieures à 7.2°C (en degré-jour) de décembre à février (a) et en décembre (b) sur la période 1950-2020.

La variabilité interannuelle des températures minimales hivernales et celle des accumulations de froid entraînent une variation dans la date de débournement de l'olivier. Ceci est confirmé par une corrélation significative (0.68) entre la somme de froid hivernal et les dates de débournements et les dates de débourrement (jour julien) durant la période 2005-2021. Inversement, la somme de douceur hivernale (températures minimales journalières supérieures ou égales à 7.2°C du 1^{er} décembre au 28 et/ou 29 février) montre une corrélation significative (-0.60) avec les dites dates. Cela signifie que plus l'hiver est froid plus le débournement est retardé, et vice versa. La tendance à la baisse du froid observée en décembre d'après le test de Pettitt (Figure 7), perturbe le repos végétatif de l'olivier car les faibles accumulations de froid en hiver aboutissent à un débournement précoce de l'olivier. D'ailleurs, la corrélation deux à deux entre la somme du froid mensuelle et la date de débournement n'est significative qu'avec le mois de février (0.67, 2005-2021). Elle met l'accent sur l'importance du froid pendant ce mois pour déterminer la date de débournement, et que la diminution du froid conduit à un débournement précoce.

3.3. Rôle de la circulation atmosphérique sur la précocité de débournement de l'olivier

La précocité de débournement de l'olivier observée depuis 2014 est sans doute liée à la circulation atmosphérique dont certaines configurations apportent plus de douceur et oblige l'olivier à débourner plus tôt que d'habitude.

3.3.1. Types de circulations générant la douceur hivernale

Différents types de circulations en Hiver ont été observés sur la Tunisie pendant la période 1980-2010 (Tableau 3A). Sans surprise, 60% des flux synoptiques en Tunisie sont générés par les circulations d'Ouest et celles de Nord et de Nord-ouest (35.1% et 24.4%, respectivement), alors que 31% de ces flux sont commandés par les Centres d'action sur l'Europe centrale et les circulations du Sud (18% et 14.7%, respectivement). En revanche, les circulations de Nord-Est et de Nord représentent moins de 9% et celles indéfinies sont négligeables. Cette hiérarchie s'observe à l'échelle des mois, avec une suprématie pour les circulations d'Ouest qui représentent plus d'un tiers des circulations et celles de Nord-Ouest et de Nord dont la proportion atteint 20%.

La douceur hivernale, représentée par les jours ayant une température minimale supérieure ou égale à 7.2°C, est générée par tous les types de circulations (Tableau 3B), avec une distribution des classes de circulation plus sélective et moins conforme aux stéréotypes attendus pour expliquer cette douceur. En fait, quatre types de circulations accaparent plus de 92% des flux doux, avec une nette prédominance des flux d'Ouest qui détient plus d'un tiers de toutes les configurations, puis du nord-ouest à nord (21.1%), des centres d'action sur l'Europe centrale et ceux originaires du sud (17.7% et 16.9%, respectivement). En revanche, les flux continentaux du Nord-Est et Est représentent moins de 8%. Cette hiérarchie s'observe en décembre et février et change légèrement en janvier où les circulations de sud occupe la 2^{ème} place derrière celles de l'ouest, suivies par les centres d'action de l'Europe centrale et enfin les circulations de nord-ouest à nord (tableau 3B). Cela reflète le fait qu'en Tunisie, les advections "de chaleurs" en hiver à tous les niveaux d'altitude et générant de la douceur, concernent toutes les classes de circulations, avec une préférence pour les flux en provenance essentiellement de l'Ouest et secondairement, soit du Nord-Ouest à Nord, soit du Sud ou de l'Europe centrale.

Tableau 3. Fréquence des classes de circulation atmosphérique (GWT) hivernale [A] et celles avec douceur à Sfax [B] d'après la classification de Hess et Brezowsky (1981-2010, d'après données Deutscher Wetterdienst)

GWT (Grosswettertypen)	[A] Classes de circulation				[B] Classes de circulation avec douceur			
	DJF (%)	D (%)	J (%)	F (%)	DJF (%)	D (%)	J (%)	F (%)
Circulations d'Ouest	35.1	36	37.3	31.6	36.1	37.5	37.2	33.2
Circulations de Sud	14.7	13.6	17.6	12.8	16.9	14.3	22.9	15.2
Circulations de Nord-Ouest et de Nord	24.4	24.5	20.2	29.1	21.1	22.9	16	23.4
Circulations de Nord-Est et d'Est	7.1	5.1	8	8.2	7.7	6.8	6.9	9.8
Centre d'action sur l'Europe centrale	18	19.9	16.2	17.8	17.7	17.9	16.8	18.3
Indéterminées	0.7	0.9	0.7	0.5	0.5	0.7	0.3	0.3%
Total	100	100	100	100	100	100	100	100

3.3.2 Analyse de l'ensemble des types de circulation atmosphérique (GWL)

Le Tableau 4 met l'accent sur les GWL générant des situations de la douceur en hiver. Deux types de GWL, appartenant à deux configurations différentes et présentant des situations synoptiques opposées, s'individualisent. Il s'agit du type WZ (circulation ouest cyclonique : de 16.3% à 21.9%, selon les mois) et BM (dorsale anticyclonique sur l'Europe moyenne : de 9.2% à 10.8%, selon les mois). A cela s'ajoute en janvier le type WA (circulation ouest anticyclonique: 11%) et secondairement HM (Anticyclone sur l'Europe centrale: 7.7%).

Tableau 4. Circulation atmosphérique (GWL en %) et situation de douceur à Sfax (1981-2010), d'après la classification de Hess et Brezowsky (sources de données Deutscher Wetterdienst)

Code	Descriptif du type de circulation	Hiver	Décembre	Janvier	Février
WA	Circulation d'ouest anticyclonique	6.2%	5.9%	9.9%	3.1%
WS	Circulation d'ouest cyclonique	5.5%	5.1%	4.1%	7.2%
WW	Circulation d'ouest méridionale	5.1%	4.6%	6.9%	4.1%
WZ	Circulation d'ouest « formant un angle »	19.4%	21.9%	16.3%	18.8%
Circulations d'Ouest		36.2%	37.5%	37.2%	33.2%
SEA	Circulation de sud-est, anticyclonique	2.4%	0.7%	4.4%	2.8%
SEZ	Circulation de sud-est, cyclonique	0.8%	0.7%	1.4%	0.3%
SWA	Circulation de sud-ouest, anticyclonique	4.6%	4.0%	6.6%	3.6%
SWZ	Circulation de sud-ouest, cyclonique	3.5%	5.3%	2.2%	2.3%
SZ	Circulation de sud, cyclonique	0.3%	0.4%	0.6%	0%
TB	Dépression sur les îles Britanniques	0.5%	0.0%	0.3%	1.5%
TRW	Talweg sur l'Europe occidentale	2.6%	2.4%	2.5%	3.1%
SA	Circulation de sud, anticyclonique	2.2%	0.7%	5%	1.5%
Circulations de Sud		16.9%	14.2%	23%	15.1%
HB	Anticyclone sur les îles Britanniques	2.6%	3.7%	1.1%	2.6%
HNA	Anticyclone sur l'Islande, anticyclonique	2%	1.6%	1.7%	2.8%
NZ	Circulation de nord, cyclonique	1.8%	1.8%	1.7%	2.1%
NA	Circulation de nord, anticyclonique	0.6%	0.5%	0.8%	0.5%

HNZ	Anticyclone sur l'Islande, cyclonique	0.9%	0.4%	0.6%	2.1%
NWA	Circulation de nord-ouest, anticyclonique	1.4%	1.6%	0.8%	1.5%
NWZ	Circulation de nord-ouest, cyclonique	6.8%	6.8%	6.1%	7.5%
TRM	Talweg sur l'Europe centrale	5.5%	7.1%	4.1%	4.6%
Circulations de Nord-Ouest et de Nord		21.6%	23.5%	16.9%	23.7%
HFA	Anticyclone sur la Fennoscandie, anticyclonique	3.2%	2.6%	1.7%	5.7%
HFZ	Anticyclone sur la Fennoscandie, cyclonique	1.2%	0.0%	2.5%	1.5%
HNFA	Anticyclone sur mer de Norvège– Fennoscandie, anticyclonique	0.8%	0.9%	0.3%	1.0%
HNFZ	Anticyclone sur mer de Norvège – Fennoscandie, cyclonique	1.1%	0.7%	1.4%	1.3%
NEA	Circulation de nord-est, anticyclonique	0.5%	1.3%	0.0%	0.0%
NEZ	Circulation de nord-est, cyclonique	0.3%	0.5%	0.3%	0.0%
Circulations de Nord-Est et d'Est		7.1%	6.0%	6.2%	9.5%
BM	Dorsale anticyclonique sur l'Europe moyenne	10.0%	9.0%	9.4%	10.8%
HM	Anticyclone sur l'Europe centrale	7.7%	8.8%	7.2%	6.7%
TM	Dépression sur l'Europe centrale	0.4%	0.2%	0.3%	0.8%
Centre d'action sur l'Europe centrale		17.7%	17.9%	16.8%	18.3%
Ü	Indéfinies	0.5%	0.7%	0.3%	0.3%

D'après la Figure 8, la douceur hivernale est liée majoritairement à des situations synoptiques anticycloniques en altitude (500 hpa) qui règnent sur le Maghreb (Figure 8). Ayant des positions plus septentrionales que d'habitude (entre 35°N et 40°N au lieu de 30°N), les GWL WZ, WA et HM sont marquées au sol par la présence d'une vaste zone de haute pression surmontée en altitude par une crête (WZ) ou une dorsale (WA) qui englobe le Maghreb, la méditerranée occidentale et une grande partie de l'Europe occidentale. En revanche, BM montre en surface que la Tunisie est soumise à une zone de basse pression dont le centre est localisé sur la méditerranée occidentale, le nord du Maroc et de l'Algérie coiffée en altitude par une puissante crête anticyclonique (également pour HM) focalisée sur le Sud de la Lybie et de l'Algérie pour atteindre la Méditerranée occidentale et le Sud de l'Europe. De telles positions géographiques pour les centres d'action, entraînant des conditions anticycloniques avec advection en altitude d'air « chaud » du Sahara (flux de Sud et/ou du Sud-Ouest) qui fait régner un type de temps doux notamment la nuit où les températures minimales ne descendent pas en dessous de 9°C.

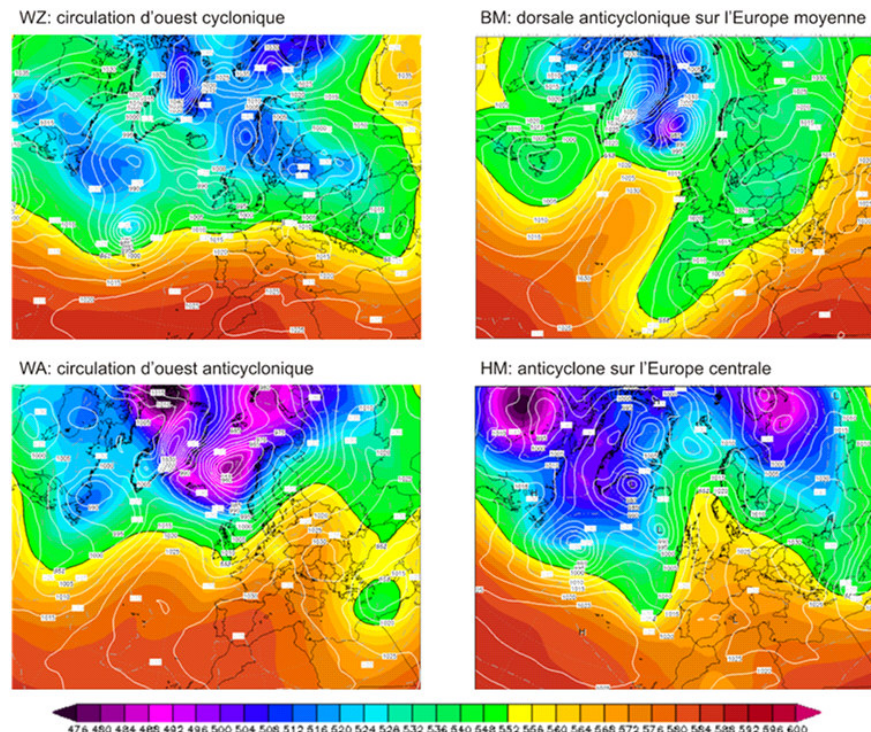


Figure 8. Configurations synoptiques correspondant aux situations de douceur en hiver (1981-2010), d'après la classification de Hess et Brezowsky (<https://www.wetterzentrale.de/de/reanalysis.php?map=1&model=avn&var=1>)

3.3.3. Analyse d'années aux dates de débourrement extrême

L'analyse de données phénologiques révèle quatre années exceptionnelles avec des années à débourrement précoce à savoir 2014, 2017 et 2021 et une année à débourrement tardif (2015) (Tableau 5). Il ressort ainsi une douceur qui a fortement marqué le début et la fin de l'hiver des années 2014 et 2017, avec des anomalies positives notamment pour les températures minimales en décembre et en février. Ceci explique le débourrement de l'olivier le 18 et le 20 février respectivement pour 2014 et 2017. L'année 2021 s'est révélée aussi exceptionnelle, car la douceur a régné durant tout l'hiver et les températures minimales et maximales ont largement dépassé la moyenne, notamment du 20/01/2021 au 13/02/2021 où les températures minimales et maximales étaient supérieures respectivement à 7.2°C et 21°C. Ceci résulte en un débourrement très précoce qui a eu lieu le 3 février. En revanche, la fraîcheur a bien marqué le milieu (janvier) et la fin (février) de l'hiver 2015 et le début du printemps (anomalies négatives des Tn et Tx non représentées). En conséquence, le débourrement de l'olivier était tardif avec plus d'un mois de retard (19 avril).

Tableau 5. Anomalies des températures minimales et maximale entre novembre et février pendant les années exceptionnelles (date de débourrement) dans la région de Sfax (période de référence 1981-2010)

Années	°C	D	J	F
2014	Tn	1	0.9	1.4
	Tx	-0.1	1.3	1.3
2015	Tn	1.3	-0.2	-0.1
	Tx	0.6	0.8	-1.5
2017	Tn	3	-1.2	1.8
	Tx	0.9	-1.2	1
2021	Tn	1.9	1.6	2.6
	Tx	1	2.9	2.7

L'analyse de la fréquence d'apparition des types de circulation atmosphérique et de leurs manifestations en termes de douceur, de décembre à février, permet d'expliquer la précocité très marquée en années exceptionnelles telles que 2014, 2017 et 2021, ainsi que le retard très marqué en 2015 (Figure 9). En effet, les trois années précoces présentent presque le même nombre de jours doux (48, 43 et 42 respectivement), en raison de la prédominance en 2014 et 2021 de la fréquence des circulations de sud (61% et environ 40%, respectivement), et en 2017, de la fréquence des circulations de centre d'action sur l'Europe Central (environ 50%).

La répartition mensuelle du nombre de jour doux permet dégager quelques différences entre les années :

- 2014 et 2017 qui présentent la même date de débourrement (19 février), la douceur a fortement caractérisé le début (décembre 21 et 28 jours, respectivement) et la fin de l'hiver (février, 14 et 12 jours, respectivement) (28 et 14 jours, respectivement), tandis que janvier était plus frais en 2017 qu'en 2014 (3 et 13 jours doux, respectivement) ;
- 2021 est une année exceptionnelle puisque la douceur a concerné décembre et janvier (21 et 17 jours, respectivement), notamment entre 15 janvier et 18 février où des conditions printanières ont régné et des records de températures minimales ou maximales ont été enregistrés (14.6°C et 27.6°C, respectivement). Une "hyper-douceur" qui s'est traduite par un débourrement très précoce de l'olivier (4 février).
- L'année tardive 2015 a été, en revanche, marquée uniquement par 23 jours de douceurs, avec 12 jours en décembre, 8 en janvier et 3 en février. Ce dernier, particulièrement frais, a été suivi par un début de printemps frais (anomalies négatives de Tn et Tx en mars non représentées). Les configurations synoptiques responsables des circulations d'Ouest, de Sud et du Nord-Ouest à Nord, présentent en altitude des anticyclones ayant des positions géographiques plus méridionales, ce qui a permis aux flux nordiques de descendre un peu plus vers le Sud et de ramener de la fraîcheur en Tunisie.

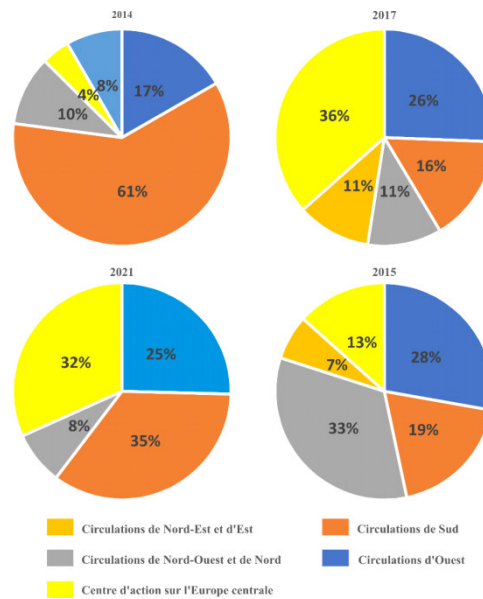


Figure 9. Fréquence des types de circulation atmosphérique (classification de Hess-Brezowsky) durant quelques années exceptionnelles

4. Discussion

L'analyse des séries de données climatiques confirme que le réchauffement climatique est un phénomène incontestable dans la région de Sfax. Les températures annuelles (minimales, maximales et moyennes) ont augmenté de plus de 1°C depuis le milieu des années 1980. Celles mensuelles montrent que le réchauffement varie selon les mois à partir des années 1980 et/ou 1990, avec une hausse plus importante pour les minimas (T_n) que les maximas et les moyennes (T_x et T_m). Le réchauffement accentue l'aridité, spécificité du climat de la région (Comme tout le Centre et Sud de la Tunisie). Cette investigation supporte des études antérieures qui rapportent que le bassin méditerranéen et plus précisément le Nord de l'Afrique sont fortement affectés par des hausses des températures (Fernandez et al., 2023 ; Benmoussa et al., 2020). Cette variabilité bioclimatique a entraîné des conditions thermiques diverses qui ont impacté le développement de la principale culture méditerranéenne à savoir l'olivier. Certaines conditions extrêmes se sont manifestées et qui ont été en faveur d'un avancement ou retard du cycle de développement végétatif de l'olivier qui se déroule maintenant dans des conditions plus contraignantes de hausse des températures et de grandes variabilités des pluies. Ainsi cette hausse des températures s'est répercutée sur la phénologie de l'olivier à savoir le développement foliaire, la floraison, la fructification et la maturation des fruits. Ainsi, les degrés jours ont augmenté de plus de 380 Dj dans la région de Sfax entre les périodes moyennes observées avant et après la rupture climatique. Ils reflètent donc un changement du climat oléicole du centre tunisien marqué par une tardivité pour la saison des cueillettes afin d'obtenir une huile de bonne qualité et un bon rendement, ainsi qu'une certaine précocité saisonnière du développement de certains stades phénologiques (développement foliaire, floraison et fructification). Ceci est en accord avec les travaux antérieurs qui ont montré que le réchauffement climatique contemporain constitue déjà un élément perturbateur dans les écosystèmes en avançant les stades phénologiques des plantes (Menzel et Fabian, 1999 ; Jones et Davis, 2000 ; Chmielewski et Rötzer, 2002 ; Duchêne et Schneider 2005 ; Chmielewski, 2007 ; Augustin et Erasmî, 2008 ; Madelin et al., 2008; Quénoî, 2014).

L'olivier est réputé pour sa rusticité contre l'aridité, notamment la variété « Chemlali Sfax », mais sa période de repos hivernal est perturbée car le réchauffement climatique en hiver observé depuis 1984 se traduit par une baisse de l'accumulation du froid hivernal. De ce fait, ses besoins en accumulation du froid sont partiellement satisfaits en raison de la douceur qui commence à régner pendant l'hiver, notamment en décembre qui enregistre une baisse significative du froid. Plusieurs recherches ont révélé que les températures de l'hiver sont très importantes pour déterminer les stades phénologiques de nombreuses espèces d'arbres fruitiers (Menzel et al., 2006, Benmoussa et al., 2017a; El Yaacoubi et al., 2019 ; Elloumi et al., 2020). La mise en place de la douceur au début et à la fin de l'hiver (décembre et février, respectivement), suite à puissante crête anticyclonique en altitude localisée au sud de l'Algérie et de la Lybie, entraîne un débourrement précoce comme en témoigne les années 2014, 2017 et 2021, qui peut être suivi par une floraison précoce si le début du

printemps est particulièrement très doux. Récemment, Elloumi et al. (2020) rapportent que l'avancement de la date de débourrement est expliqué par des hivers doux comme conséquence du réchauffement climatique. Ainsi la hausse des températures en hiver se traduit pour l'olivier par une baisse du refroidissement hivernal, une faible accumulation du froid et un débourrement précoce.

5. Conclusion

Ce travail est le résultat de la première collaboration entre l'Institut de l'Olivier et le département de géographie de la Faculté des Lettres et des Sciences humaines (Université de Sfax). Il a permis de mettre en évidence le réchauffement climatique dans la région de Sfax et son impact sur l'oléiculture. La chronologie des dates de ruptures identifiées par le test de Pettitt notamment pour les températures minimales auxquelles est sensible l'olivier, montre que le réchauffement a concerné au début, la période août-février (fin années 1970 et début années 1980), puis celle mars-juillet (les années 1990). Les répercussions de ce réchauffement sur l'olivier se traduisent par une hausse des degrés jours (382Dj) entre les périodes moyennes observées avant et après la rupture climatique (1984), et par une avancée des phénophases, notamment le débourrement et la floraison.

L'étude des types de circulation atmosphérique (GWL) définis par Hess et Brezowsky (1952), a permis de dresser une typologie des configurations synoptiques responsables de la douceur hivernale. La part importante des situations de douceur est liée aux circulations d'Ouest (WZ) et centre d'action sur l'Europe centrale (BM) dominant l'Europe et qui se traduit sur le Maghreb par l'installation en altitude d'une crête anticyclonique (frontières algéro-lybiennes) qui ramène des masses d'air « chaud » provenant du Sahara (Sud) pour imposer la douceur. Les relevées phénologiques de l'Institut de l'Olivier confirment ces situations de douceurs, devenues de plus en plus importantes depuis 2014 (dates précoces de débourrement). Les recherches actuelles sur la modélisation de prédiction des dates de débourrement et de floraison à partir des données climatiques vont permettre de déterminer les périodes déterminantes pour ces deux phénophases. Des études, combinant étroitement la variabilité climatique (la dynamique atmosphérique) et la phénologie de l'olivier ainsi qu'autres arbres fruitiers, sont envisagées pour mettre l'accent sur les problèmes de saisonnalité de façon plus approfondie, notamment les glissements des saisons en lien avec le changement climatique actuel.

Remerciements

Cette recherche a été soutenue financièrement par le Ministère Tunisien de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique (Laboratoire SYFACTE et Laboratoire de Ressources Génétiques de l'Olivier: Caractérisation, Valorisation et Protection Phytosanitaire) et le Ministère de l'Agriculture, des Ressources Hydrauliques et de la Pêche. Les auteurs remercient Mr. Mohamed GHRAB pour la lecture minutieuse du manuscrit avant sa soumission.

Références

- Abichou, M., Msellem, M., 2015. The effects of climate change on the olive tree phenology. *Journal of Global Biosciences*. 4 (6), 2513–2517.
- Augsburger C. K., 2009. Spring 2007 warmth and frost: phenology, damage and refoliation in a temperate deciduous forest. *Funct. Ecol.*, 23, 1031-1039. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2009.01587>.
- Ben Dhiab A., Ben Mimoun M., Oteros, J., Garcia-Mozo H., Dominguez-Vilches E., Galan C., Abichou M., Msellem M., 2016. Modelling olive-crop forecasting in Tunisia. *Theoretical and Applied Climatology*, 128, 541–549.
- Ben Mimoun M., 2008. *Impact of climate change on fruit production: case of Tunisia*. In: Khan K.M., Centritto M., Mahmood T., (Eds.), *Impact of Climate Change on Fruit Production, Carbon and Water Exchange in Plants Under Changing Climatic Conditions*. Arid Agriculture University Rawalpindi Press, Islamabad, pp. 91–101.
- Ben Rouina B, Trigui A., Boukhris M., (2002). Effect of climate and the soil conditions on crops performance of the Chemali de Sfax "olive tree". *Acta Horticulturae*, 586 :285–289. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.586.55>
- Ben Rouina, B., 2007 : *Etude des relations sol-eau- plante et de l'effet du stress hydrique sur la croissance de la fructification de l'olivier (Olea europea L.)*. Thèse de doctorat en science biologique, faculté des sciences de Sfax, 229p.
- Ben Rouina Y., Zouari Mohamed., Zouari N., Ben Rouina B., Bouaziz M., 2021. *Elevated Temperature Affects Biochemical Responses and Oil Quality in Olive Trees (Olea europaea L., cv Chetoui)*. In book: *Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions* (2nd Edition) (pp.991-995). 10.1007/978-3-030-51210-1_154

- Benmoussa H., Ben Mimoun M., Ghrab M., Luedeling E., 2018. Climate change threatens central Tunisian nut orchards. *International Journal of Biometeorology*, 62, 2245–2255.
- Benmoussa H., Ghrab M., Ben Mimoun M., Luedeling E., 2017a. Chilling and heat requirements for local and foreign almond (*Prunus dulcis* Mill.) cultivars in a warm Mediterranean location based on 30 years of phenology records. *Agricultural and Forest Meteorology*, 239, 34–46.
- Benmoussa H., Luedeling E., Ghrab M., Ben Yahmed J., Ben Mimoun M., 2017b. Performance of pistachio (*Pistacia vera* L.) in warming Mediterranean orchards. *Environmental and Experimental Botany*, 140, 76–85.
- Benmoussa H., Luedeling E., Ghrab M., Ben Mimoun M., 2020. Severe winter chill decline impacts Tunisian fruit and nut orchards. *Climatic Change*, 162, 1249–1267. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02774-7>
- Bigler C., Bugmann H., 2018. Climate induced shifts in leaf unfolding and frost risk of European trees and shrubs. *Scientific Reports* 8(9865), 10 p. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27893-1>
- Bonnefoy C., Quenol H., Planchon O., Barbeau G., 2010. Températures et indices bioclimatiques dans le vignoble du Val de Loire dans un contexte de changement climatique. *EchoGéo* [En ligne], numéro 14|2010, <https://doi.org/10.4000/echogeo.12146>
- BOUSNINA A., 1997 : *Le climat de Sfax*. Laboratoire de climatologie, Faculté des Sciences Humaines et Sociales Tunis, Ed Altair. 80p.
- Cantat O., Planchon O., Quénel H., Savouret E., Bois B., Beauvais F., et Brunel-Muguet S., 2019 : « Gelées tardives et viticulture en basse et moyenne vallée de la Loire (France) : Approche géoclimatique d'un aléa météorologique majeur pour la vigne », *Climatologie* [En ligne], mis à jour le : 14/04/2020, URL : <http://odel.irevues.inist.fr/climatologie/index.php?id=1413>, <https://doi.org/10.4267/climatologie.1413>
- Dahech S., 2012. Evolution de la répartition spatiale des températures de l'air et de surface dans l'agglomération de Sfax (1975-2010) et impact sur la consommation d'énergie durant la saison chaude. *Climatologie*, numéro spécial 'Climats et changement climatique dans les villes', 11-33.
- Dahech S., 2013. Le réchauffement contemporain en Tunisie : rôle de l'urbanisation et de la circulation atmosphérique. Journées de climatologie, Epernay 14-16 mars 2013, Commission Climat et Société du CNFG, 69-88. <https://www.researchgate.net/publication/309908455>
- Dahech S., Beltrando G., 2012. Observed temperature evolution in the city of Sfax (Middle Eastern Tunisia) for the period 1950-2007. *Climat change*, 114 :689-706, doi 10.1007/s10584-012-0420-x.
- Dahech S., Ghribi M., 2017. Réchauffement climatique en ville et ses répercussions énergétiques. *Méditerranée*, 128, 29-38. <https://doi.org/10.4000/mediterranee.8548>
- DGPA, 2022. Statistique de la Direction Générale de la Production Agricole, Tunisie.
- El Melki T., 2014. *Climatologie dynamique de la Tunisie*. Publication de l'Université de la Mannouba, 438p.
- Elloumi O., Benmoussa H., Ben Amar F., Ayadi M., Abichou M., Ben Mimoun M., Ghrab M., 2022a. Olive growing in arid area: further challenges from climate change. 10.56027/JOASD.spiss222022
- Elloumi O., Regaig I., Benmoussa H., Abichou M., Ben Amar F., Ben Mimoun M., Ghrab M., 2022b. Adaptabilité de la phénologie florale de l'olivier dans différents environnements du centre et du sud tunisien. *Journal of Arid Arboriculture and Olive Growing*, 1-2, 31-43.
- Elloumi O., Ghrab M., Chatti A., Chaari A., Ben Mimoun M., 2020. Phenological performance of olive tree in a warm production area of central Tunisia. *Scientia Horticulturae*. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108759>
- Elloumi O., Ghrab M., Kessentini H., Ben Mimoun M., 2013. Chilling accumulation effects on performance of pistachio trees cv. Mateur in dry and warm area climate. *Scientia Horticulturae*, 159, 80–87. DOI: 10.1016/j.scienta.2013.05.004
- Estrella N., Sparks T. H., Menzel A., 2007. Trends and temperature response in the phenology of crops in Germany. *Global Change Biology*, 13, 1737-1747. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01374.x>
- Euchi H., 2021. Pollution atmosphérique, type de temps et admission pour maladie respiratoire à Sfax (Tunisie). Thèse de Doctorat, Université de Sfax, FLSH, 308p.
- Ferchichi A., 1996. Etude climatique en Tunisie présaharienne. *Méditerranée*, 3, 46-53. https://newmedit.iamb.it/share/img_new_medit_articoli/792_46ferchichi.pdf
- Fernández C. E., Mojahid H., Fadón E., Rodrigo J., Ruiz D., Egea J., Ben Mimoun M., Oama K., El Yaacoubi A., Ghrab M., Benmoussa H., Borgini N., Elloumi O., Luedeling E., 2022. Climate change impacts on winter chill in Mediterranean temperate fruit orchards. *Regional Environmental Change*. 23. 10.1007/s10113-022-02006-x.
- Fraga H., Moriondo M., Leolini L., Santos JA., 2021. Mediterranean Olive Orchards under Climate Change: A Review of Future Impacts and Adaptation Strategies. *Agronomy*, 11(1):56.

<https://doi.org/10.3390/agronomy11010056>

Gharbi I., Issaoui M., & Hammami M., 2014. La filière huile d'olive en Tunisie. OCL, 21(2), D202 <https://www.ocljournal.org/articles/ocl/pdf/2014/02/ocl130021.pdf>

Gerstengarbe F. W., Werner P. C., 2005: *Katalog der Großwetterlagen Europas (1881-2004) nach Paul Hess und Helmut Brezowsky*. PIK Report, 100, 153 p. <https://www.pik-potsdam.de/research/publications/pikreports/.files/pr100.pdf>

Ghrab M., Ben Mimoun M., Masmoudi M., Ben Mechlia N., 2014a. The behaviour of peach cultivars under warm climatic conditions in the Mediterranean area. *International Journal of Environmental Studies*. 71. 10.1080/00207233.2013.862945.

Ghrab M., Ben Mimoun M., Masmoudi M., Ben Mechlia N., 2014b. Chilling trends in a warm production area and their impact on flowering and fruiting of peach trees. *Scientia Horticulturae*. 178. 87–94. 10.1016/j.scienta.2014.08.008.

Ghrab M., Ben Mimoun M., Masmoudi M.M., Ben Mechlia N., 2016. Climate change and vulnerability of the pistachio and almond crops in the Mediterranean arid areas. *Options Méditerranéennes*. 119, 247-251.

Ghrab M., Elloumi O., Benmoussa H., Trabelsi L., Borgini N., Ben Mimoun M., 2022. Climate change and viability of fruit tree orchards in arid area. *Journal Of Oasis Agriculture and Sustainable Development*. 4. 1-5. 10.56027/JOASD.spiss012022

Hénia L., 1993. *Climat et bilans de l'eau en Tunisie. Essai de régionalisation climatique par les bilans hydriques*. Publication de l'Université de Tunis I, 391p.

Hénia L., 2008. *Atlas de l'eau en Tunisie*. Publication de l'Université de Tunis I, 73p.

Hirsch R., Slack J., 1984. Non-Parametric Trend Test for Seasonal Data with Serial Dependence. *Water Resources Research*. 20. 727-732. 10.1029/WR020i006p00727.

Hlaoui Z., 2006. Bilans hydriques agro-climatiques de l'olivier en Tunisie ; *RTG* n° 37 (pp 43-74)

IPCC, 2013. *Summary for Policymakers*. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor S. K., Allen J., Boschung A. Nauels Y., Xia V., Bex and P. M., Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>

IPCC, 2021: *Summary for Policymakers*. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

Karray, B., & Kanoun, F., 2013. Forces, faiblesses, opportunités et menaces de la filière oléicole en Tunisie. *New medit: Mediterranean journal of economics, agriculture and environment= Revue méditerranéenne d'économie, agriculture et environnement*, 12(4), 35-45.

Liu Q., Piao S., Janssens I.A., Fu Y., Peng S., Lian X., Ciais P., Myneni R.B., Peñuelas J., Wang T., 2018. Extension of the growing season increases vegetation exposure to frost. *Nature Communications*, 9(426), 8 p. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02690-y>.

Menzel A., Sparks T.H.B., et al., 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Glob. Change Biol.* 12 (10), 1969–1976. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01193.x>

Ministère de l'Équipement et de l'Habitat, 2013. *Atlas du gouvernorat de Sfax*. 105. http://www.mehat.gov.tn/fileadmin/user_upload/Amenagement_Territoire/AtlasSfaxFr.pdf

Morin X., Chuine I., 2014. Will tree species experience increased frost damage due to climate change because of changes in leaf phenology? *Canadian Journal of Forest Research*, 44, 1555-1565. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-0282>

OLIVÆ, 2017. Journal officiel du Conseil oléicole international. <http://www.onagri.nat.tn/uploads/filieres/huile-olive/Journal-officiel-du-conseil-oleicole-international.pdf>

Pettitt A.N., 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics* 28, n°2, p. 126. DOI: 10.2307/2346729

Planchon O., Cantat O., Bois B., 2019. Variabilité climatique printanière et phénologie végétale en Auxois : exemple d'Alise-Sainte-Reine (Côte-d'Or). *Revue Scientifique Bourgogne-Franche-Comté Nature*, 29-2019, 349-364. Publisher URL http://www.bourgogne-nature.fr/fr/actualites/changement-climatique-humanite-et-biodiversite_6_A747.html

Planchon O., Endlicher W., 2014. *Dynamique spatio-temporelle du climat de l'Europe centrale : analyse et impacts dans les régions viticoles*. In : Quénol, H. (sous la direction de) *Changement climatique et terroirs viticoles*. Editions Lavoisier Tec&Doc, Chap. 4, 115-146.

Quénol H., 2014. *Changement climatique et terroirs viticoles*. Ed. Lavoisier, coll. Tech. & Doc, 444 p.

Ranasinghe R. , Ruane AC , Vautard R. , Arnell N. , Coppola E. , Cruz FA, Dessai S., Saiful Islam AKM, Rahimi M. , Carrascal DR, Sillmann J. , Sylla MB Tebaldi C., Wang W. et Zaaboul R. (2021., Informations sur le changement climatique pour l'impact régional et pour l'évaluation des risques. Dans: *Changement climatique 2021: les bases des sciences physiques*. Contribution du Groupe de travail 1 au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. La Presse de l'Université de Cambridge, Cambridge, pages 1767 à 1926.

Seguin B., 2010. *Coup de chaud sur l'agriculture*. Ed. Delachaux et Niestlé, 205 p.

Werner P. C., Gerstengarbe F.-W., 2010. Katalog der Großwetterlagen Europas (1881-2009) nach Paul Hess und Helmut Brezowsky. PIK Report 119, 146 p. <https://www.pik-potsdam.de/research/publications/pikreports/.files/pr119.pdf>

Werner P. C., Gerstengarbe F. W., 2011. Spatial-temporal changes of meteorological parameters in selected circulation patterns. PIK Report 123, 19 p. <https://www.pik-potsdam.de/research/publications/pikreports/.files/pr123.pdf>

Winkler A.J., Cook J.A., Kliever W.M. et Lider L.A., 1974. *General viticulture*, Berkeley, University of California, 710 p. DOI : 10.1097/00010694-197512000-00012.

Citation: Feki, M et Elloumi, O. 2023. Variabilité bioclimatique de l'olivieraie du Centre-Est Tunisien, cas de Sfax, dans un contexte de changement climatique. <i>J.A.A.O.G</i> 2(2): 1-17
--