



COMMUNAUTE FRANÇAISE DE BELGIQUE

UNIVERSITE DE LIÈGE, GEMBOUX AGRO-BIO TECH

Effets de la fertilisation NP et de l'irrigation à des périodes critiques sur le rendement et la qualité des fruits du figuier de Barbarie (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.)

Mohamed ARBA

Dissertation originale présentée en vue de l'obtention du grade de
Docteur en sciences agronomiques et ingénierie biologique

Promoteurs: Prof. Marianne Sindic
Prof. Redouane Choukr-Allah

Encadrant: Prof. André Falisse

2017

Copyright. Aux termes de la loi belge du 30 juin 1994, sur le droit d'auteur et les droits voisins, seul l'auteur a le droit de reproduire partiellement ou complètement cet ouvrage de quelque façon et forme que ce soit ou d'en autoriser la reproduction partielle ou complète de quelque manière et sous quelque forme que ce soit. Toute photocopie ou reproduction sous autre forme est donc faite en violation de la dite loi et des modifications ultérieures.

Mohamed ARBA 2017. Effets de la fertilisation NP et de l'irrigation à des périodes critiques sur le rendement et la qualité des fruits du figuier de Barbarie (*Opuntia ficus-indica* L. (Mill)). Thèse de doctorat. Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech, 132 p., 23 tableaux, 21 figures.

RESUME

Selon la classification révisée récemment, les cactus appartiennent à la famille des Opuntiaceae Desv. (Synon. Cactaceae Juss.), dont le genre-type *Opuntia* Mill. est économiquement le plus important car il comprend un ensemble de variétés qui participent à la plupart des systèmes agricoles des régions arides et semi-arides. Récemment, dans le Maghreb, la culture de plusieurs espèces et variétés s'est développée à des fins de production fruitière commercialisable, c'est-à-dire répondant à des critères de qualité de plus en plus sévères et exigeant des technologies culturales précises.

La partie expérimentale de notre étude s'est déroulée pendant deux années dans le Sud du Maroc, région d'Agadir, sur trois variétés représentatives. Les essais ont été réalisés à la ferme expérimentale de l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Complexe Horticole d'Agadir (30°36' Nord, 9°36' Est; altitude: 32 m). Le site est caractérisé par des températures moyennes mensuelles qui varient de 8°C en janvier à 31°C en juillet, la température journalière maximale pouvant atteindre 45°C en juillet-août. La pluviométrie annuelle varie de 100 à 200 mm. La durée moyenne d'ensoleillement est de 8 heures par jour. Un premier objectif de notre étude a été de préciser les réponses quantitatives (rendement en fruits) et qualitatives à des apports modérés d'eau d'irrigation. Un deuxième objectif consistait à évaluer les effets d'apports limités de fertilisation minérale azotée et phosphatée, ces deux éléments majeurs étant les plus susceptibles de se trouver déficitaires dans le contexte pédoclimatique propre à la région. Un troisième objectif a été de préciser la phénologie des trois variétés - surtout les phases de développement floral et fruitier - afin de mettre en évidence d'éventuels impacts des interventions culturales sur la phénologie et de mieux situer les moments de ces interventions en les reliant de manière plus objective à la physiologie du développement.

Dans l'étude sur l'irrigation, les variétés utilisées ont été les inermes 'Aissa' et 'Moussa' d'*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. et l'épineuse 'Achefri' d'*O. megacantha* Salm Dyck. En première année, caractérisée par un printemps pluvieux, les traitements d'irrigation ont été: (T1) 0 mm, (T2) 30 mm à la floraison et 30 mm au grossissement des fruits et (T3) 30 mm seulement au grossissement des fruits; les irrigations ont été appliquées entre la mi-avril et la mi-juin. Les irrigations T2 et T3 ont eu un effet négatif sur le rendement en fruits des variétés inermes 'Aissa' et 'Moussa' (-2,8 kg/plant) et T2 a eu un effet positif hautement significatif ($p < 0,01$) sur la variété épineuse 'Achefri' (+ 2,7 kg/plant ou +18%). La qualité des fruits n'a pas été affectée par l'irrigation. En deuxième année, caractérisée par un printemps sec, les traitements d'irrigation ont été: (T1) 0 mm, (T2) 60 mm à la floraison et 60 mm au grossissement des fruits et (T3) 60 mm seulement au

grossissement des fruits; les irrigations ont été apportées entre février et mai. Toutes les variétés ont répondu positivement à l'irrigation, les augmentations de rendement très significatives ($p < 0,01$) ont varié entre 30% pour 'Moussa' avec T2 et 63 % pour 'Achefri' avec T3 par rapport au témoin non irrigué. Toutes les irrigations ont augmenté le nombre et la taille des fruits et ont provoqué une légère diminution de la teneur en sucres totaux et de l'acidité titrable. Les irrigations n'ont eu aucun effet significatif sur les autres paramètres physiques, chimiques et organoleptiques participant à la définition de la qualité.

L'essai sur la fertilisation minérale azotée-phosphorique sur le cultivar 'Moussa', mettait en comparaison cinq traitements: 0N-0P; 0N-80P; 40N-40P; 60N-0P et 60N-80P (en kg N ha⁻¹- kg P₂O₅ ha⁻¹). En première année, l'application de N et/ou de P n'a eu aucun effet sur le rendement en fruits. En deuxième année, les apports de 60 unités de N ou de 80 unités de P₂O₅ ont augmenté ($p < 0,01$) le rendement de *resp.* 3,0 et 6,1 kg par plante (+ 18% et + 36%), par rapport au témoin. L'apport simultané des deux éléments N et P (60N-80P₂O₅) a conduit à une augmentation très significative ($p < 0,01$) de 14,9 kg/plante (+ 90%) mettant en évidence une interaction positive très significative ($p < 0,01$) entre ces deux éléments. Les apports de N et de P ont eu des effets positifs sur le nombre de fruits et leurs poids moyens mais ils n'ont pas modifié le contenu de la pulpe, la teneur en jus, l'épaisseur de l'écorce, la matière sèche du jus, le pH, l'acidité titrable, les sucres totaux, ni le °Brix.

L'étude portant sur la phénologie et le développement a été effectuée simultanément dans un essai spécifique reprenant les trois variétés et dans chacun des essais d'irrigation et de fertilisation. Elle a d'une part permis de préciser la variabilité du déroulement des phénologies comme résultant des conditions de milieu (climat), de la génétique, des techniques culturales (fumure et irrigation), et de certaines de leurs interactions. Notre attention s'est portée prioritairement sur les effets des techniques culturales maîtrisables. En première année, les essais ont montré que l'émission de bourgeons est plus élevée ($p < 0,05$) chez la variété épineuse que chez les inermes (plus de 6 bourgeons émis/cladode contre moins de 4,5 chez les variétés inermes). En 2^{ème} année, l'irrigation a augmenté ($p < 0,05$) l'émission de bourgeons chez les trois variétés (plus de 7 bourgeons émis/cladode pour chacun des traitements T2 et T3 *vs* pas plus que 5 pour T1). L'irrigation a aussi allongé la durée de la phase de floraison de ces variétés. La fertilisation a montré des effets allant dans le même sens. Cependant, ni l'irrigation, ni la fertilisation minérale n'ont modifié significativement la durée de la réalisation du stade maturité du fruit, ne permettant pas ainsi d'allonger la saison de récolte.

Mots clés: Maroc, *Opuntia ficus-indica*, figuier de Barbarie, phénologie, floraison, fructification, émission des bourgeons, fertilisation, irrigation, rendement en fruits, qualité des fruits

ABSTRACT

According to recently revised classification, the cacti belong to the family of Opuntiaceae Desv. (Synon. Cactaceae Juss.), of which *Opuntia* Mill. genus is the most economically important as it includes a set of varieties that are involved in many agricultural systems in arid and semi-arid regions. Recently, in the Maghreb countries, the cultivation of a large number of species and varieties has been developed for marketable fruit production purposes, responding increasingly to severe quality standards and demanding specific cultivation technologies.

Experiments were carried out for two years in southern Morocco, Agadir area, on three representative varieties. The trials were set up at the experimental station of the Hassan II Institute of Agronomy and Veterinary Medicine, Horticultural Complex of Agadir (30°36' N, 9°36' east; altitude: 32 m). The site of experiment is characterized by mean monthly temperatures ranging from approximately 8 °C in January to 31 °C in July, with maximum daily temperature reaching 45 °C in June-August and an annual rainfall varying from 100 to 200 mm. A first objective of our study was to specify quantitative responses (fruit yield) and qualitative responses to moderate irrigation water inputs. A second objective was to evaluate the effects of limited inputs of nitrogen and phosphorus mineral fertilization, these two major elements being the most likely to be deficient in the pedoclimatic context specific to the region. A third objective was to specify the phenology of the three varieties. Particularly, the phases of floral and fruit development in order to evaluate the impact of the cultural interventions on phenology and better situating the moments of these interventions by linking them more objectively to crop physiology of development.

In the irrigation study, the studied varieties were the spineless 'Aissa' and 'Moussa' of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill., and the thorny 'Achefri' of *O. megacantha* Salm Dyck. In the first year, characterized by a wet spring, irrigation treatments were: (T1) 0 mm, (T2) 30 mm at flowering and 30 mm at fruit growth and (T3) 30 mm only at fruit growth; irrigations were applied between mid-April and mid-June. T2 and T3 irrigations had a negative effect on the fruit yield of 'Aissa' and 'Moussa' varieties (-2.8 kg/plant) and T2 had a highly significant positive effect ($p < 0.01$) on the spiny variety 'Achefri' (+2.7 kg/plant or +18%). Fruit quality was not affected by irrigation. In the second year, characterized by dry spring, irrigation treatments were: (T1) 0 mm, (T2) 60 mm at flowering and 60 mm at fruit growth and (T3) 60 mm only at fruit growth; irrigation was carried out between February and May. All varieties responded positively to irrigation. The increase in fruit yield is very significant ($p < 0.01$) and varied between 30% for 'Moussa' with T2 to 63% for 'Achefri' with T3 in comparison with non irrigated control. All irrigations increased the number and size of the fruit and caused a slight decrease in total sugar content and titratable acidity. Irrigation had no significant effect on the other physical, chemical and organoleptic parameters measured in our experiment.

In the nitrogen-phosphoric mineral fertilization trial on the cultivar 'Moussa', we compared five treatments: 0N-0P; 0N-80P; 40N-40P; 60N-0P; and 60N-80P (kg N ha⁻¹-kg P₂O₅ ha⁻¹). In the first year, application of N and / or P had no effect on fruit yield. In the second year, supplying 60 units of N or 80 units of P₂O₅ increased significantly (p <0.01) the yield by 3.0 and 6.1 kg per plant (+18% and +36%), compared to control. The simultaneous application of both N and P elements (60N-80P₂O₅) led to a highly significant (p <0.01) increase of 14.9 kg/plant (+90%) demonstrating significant positive interaction (p <0.01) between these two elements. Application of N and P had positive effects on the fruit number and weight but did not affect the pulp content, juice content, bark thickness, dry matter juice, pH, titratable acidity, total sugars, neither °Brix.

The phenology and development study was carried out simultaneously within the trials involving all three varieties and in both irrigation and fertilization experimentations. In one hand, it was possible to specify the variability of the phenology resulting from environmental conditions (climate), genetics, cultivation techniques (fertilization and irrigation), and some of their interactions. Our attention has focused on the effects of specific cultivation techniques. In the first year, trials have shown that the buds emission was higher (p <0.05) in the thorny variety than in the spineless ones (more than 6 emitted buds/cladode against less than 4.5 in the spineless varieties). In the second year, irrigation increased significantly (p <0.05) bud emission in all three varieties (more than 7 buds emitted / cladode for each treatment T2 and T3 *vs* no more than 5 for T1). Irrigation also extended the duration of the flowering phase of these varieties. The fertilization induced has a positive effects ranging in the same direction as irrigation. However, neither irrigation nor mineral fertilization significantly altered the length of time for fruit ripening; therefore, harvest season was not extended.

Key words: Morocco, *Opuntia ficus-indica*, prickly pear, phenology, flowering, fruiting, buds emission, fertilization, irrigation, fruit yield, fruit quality

DEDICACES

C'est avec plaisir que je dédie ce travail à :

Mon défunt père, que Dieu ait son âme en sa sainte miséricorde,
qui m'a toujours aimé et supporté dans toutes mes activités ;

Ma mère, que Dieu la garde pour nous, la bougie de la maison et la
lumière de la famille;

Ma femme Fatima Moh qui m'a beaucoup aidé et supporté dans ce
travail;

Mes enfants qui m'ont aidé par leur patience durant mes absences et
mes périodes de pointe;

Ma famille et mes amis partout au Maroc et à l'étranger.

REMERCIEMENTS

J'exprime ma gratitude et mes remerciements à mes promoteurs Prof. Mme SINDIC Marianne et Prof. Redouane CHOUKR-ALLAH, ainsi qu'à mon superviseur encadrant Prof. André FALISSE et mon ex promoteur Prof. Roger PAUL, pour leur encadrement et leur accompagnement tout au long de ce travail, leurs conseils avisés et leurs orientations dans les différentes phases de la thèse. Ce travail n'aurait pas pu aboutir sans leur aide si précieuse.

Mes remerciements vont également à mon comité de thèse et l'ensemble des membres de jury Prof. M.-L. FAUCONNIER, Prof. P. du JARDIN, Prof. H. MAGEIN, Prof. G. MERGEAI et Prof. S. MASSART pour leur intérêt à ce travail, le temps qu'ils ont consacré à sa révision et pour leurs orientations dans les différentes phases de réalisation de la thèse. Je tiens également à les remercier infiniment pour leurs remarques et suggestions pour l'amélioration de ce document en vue de la soutenance.

Je tiens également à remercier infiniment nos professeurs Lahcen Kenny, Mohamed El Otmani et My Chérif Harrouni pour leur support moral, scientifique et financier, à travers l'Agrotech Souss Massa Draa qui a financé le système d'irrigation et les achats de matériels, le projet "Healthy food for life" pour la bourse au laboratoire Qualité et sécurité des produits agro-alimentaires (QSPA) à Gembloux Agro-Bio Tech et le laboratoire des analyses eau, sol, végétal du Complexe Horticole d'Agadir (CHA) dans lequel j'ai réalisé les analyses du sol et du végétal.

Mes remerciements vont également à notre Prof. El Fadel qui m'a beaucoup aidé dans les calculs des doses d'irrigation et le pilotage des irrigations, notre Prof. El Kherrak pour la discussion et l'élaboration des protocoles expérimentaux et Mademoiselle Marjorie Servais, technicienne au laboratoire QSPA, qui m'a beaucoup aidé et accompagné dans les analyses chimiques des fruits au laboratoire et dans les rouages administratifs à Gembloux.

J'exprime ma gratitude à la coopération belge pour son support financier et à tous les collègues du CHA qui m'ont apporté leur aide et leur soutien.

Veillez m'excuser si j'ai oublié de citer votre nom, mes remerciements vont à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

TABLE DES MATIÈRES

RESUME.....	(i)
ABSTRACT	(iii)
Dédicaces.....	(v)
Remerciements	(vi)
Liste des publications.....	(x)
Liste des abréviations.....	(xi)
Liste des tableaux.....	(xiii)
Liste des figures	(xv)
Introduction générale	1
Chapitre 1. Contexte scientifique et objectifs de l'étude.....	11
1. Contexte scientifique	12
2.Objectifs de l'étude.....	15
Chapitre 2. Revue bibliographique.....	18
1.Biologie et phénologie de la plante.....	19
2.Effets de l'irrigation sur le rendement et sur la qualité des fruits.....	32
3.Effets de la fertilisation sur le rendement et sur la qualité des fruits.....	33
Chapitre 3. Matériels et méthodes.....	38
Chapitre 4. Biology, flowering and fruiting of the cactus <i>Opuntia</i> spp. : A review and some observations on three varieties in Morocco.	42
1. Introduction.....	43
2. The biology of flowering and fruiting in cactus pear.....	44
Physiology of the plant.....	44
Biology of flowering.....	45
Pollination and fruiting.....	46
The fruit development period (FDP).....	47
3. The phenology of flowering and fruiting of three varieties in Morocco.....	47
Material and methods.....	48
Results and discussion.....	48
Vegetative and floral bud emission.....	48
The phases of flowering and fruiting.....	52
The FDP (fruit development period).....	53
4. Conclusions.....	54

Chapitre 5. Effects of irrigation at critical stages on the phenology of flowering and fruiting of the cactus <i>Opuntia</i> spp.....	57
1. Introduction.....	59
2. Material and methods.....	62
3. Results and discussion.....	64
In the first year of the study.....	64
In the second year of the study.....	66
4. Conclusions.....	70
Chapitre 6. Impact of irrigation at critical crop stages on fruit yield and quality of the cactus <i>Opuntia</i> spp.....	73
1. Introduction.....	74
2. Materials and methods.....	76
3. Results and discussion.....	77
Effects of irrigation treatments on fruit yield and physical features in the first year experiments.....	77
Effects of irrigation treatments on fruit yield and fruit quality in the second year experiments.....	79
Effects of irrigation treatments on the fruit quality in the 1 st year and 2 nd year of experimentation.....	83
4. Conclusions.....	83
Chapitre 7. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on fruit yield and quality of cactus pear <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Mill.....	86
1. Introduction.....	88
2. Materials and results.....	91
The site of trials and plant material used in the study.....	91
The experimental design.....	91
Physicochemical analyses of the fruits.....	92
The phenology of flowering and fruiting of the plants.....	93
Statistical analyses.....	93
3. Results and discussion.....	94
Fruit yield and quality.....	94
Effects of fertilization on the phenology of flowering and fruiting of the plants.....	98
4. Conclusion.....	103
Chapitre 8. Discussion générale.....	107
Chapitre 9. Conclusions et perspectives.....	125

LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Cette thèse est basée sur les publications scientifiques présentées ci-dessous. Elle est divisée en différents chapitres et les chapitres 4 à 7 de ce document reprennent les articles scientifiques et doivent être lus dans un ordre chronologique pour traduire la cohérence du travail. Les chapitres relatifs aux articles sont structurés de la façon suivante: résumé, introduction, matériel et méthodes, résultats et discussions, conclusions, références.

Article 1

Arba, M., Falisse, A., Choukr-Allah, R. and Sindic, M. 2017. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on fruit yield and quality of cactus pear *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. Article publié à la revue internationale Fruits, vol 72(4) (Juillet-Aout 2017), p. 212-220. <https://doi.org/10.17660/th2017/72.4.3>.

Article 2

Arba, M., Falisse, A., Choukr-Allah, R. and Sindic, M. 2017. Biology, flowering and fruiting of the cactus *Opuntia* spp.: A review and some observations on three varieties in Morocco. Article accepté pour publication à la revue internationale Brazilian Archives of Biology and Technology, vol. 60, p. 1-11. 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4324-2017160568>.

Article 3

Arba, M., Falisse, A., Choukr-Allah, R. and Sindic, M. 2018. Effects of irrigation at critical stages on the phenology of flowering and fruiting of the cactus *Opuntia* spp. Article accepté pour publication à la revue internationale Brazilian Journal of Biology, vol. 78(4).

Article 4

Arba, M., Falisse, A., Choukr-Allah, R. and Sindic, M. 2017. Impact of irrigation at critical crop stages on fruit yield and quality of the cactus *Opuntia* spp. Article en révision à la revue internationale Agrocienca.

Communication orale 1

Arba M, Paul R, Choukr-Allah R, Falisse A et Sindic M 2013. Effect of NP fertilizing on fruit yield and fruit quality of cactus pear. Communication orale présentée au 8^{ème} congrès international sur le cactus et la cochenille à carmin qui s'est tenu à Palerme en Sicile, Italy, du 28 au 31 octobre 2013.

Communication orale 2

Arba M, Choukr-Allah R, Falisse A, Paul R and Sindic M 2013. Effet de l'irrigation à des périodes critiques sur la production et la qualité des fruits du cactus opuntia. Communication orale présentée au symposium international sur l'agriculture biologique

méditerranéenne et les signes distinctifs de qualité qui s'est tenu à Agadir du 2 au 4 Décembre 2013.

Poster 1

Arba M, Choukr-Allah R, Paul R, Falisse A and Sindic M 2013. Phenology of flowering and fruiting of different varieties of cactus pear and Effect of Irrigation on spineless and thorny varieties (cv). Poster présenté au 8^{ème} congrès international sur le cactus et la cochenille à carmin qui s'est tenu à Palerme en Sicile, Italy, du 28 au 31 Octobre 2013.

Poster 2

Arba M, Falisse A, Choukr-Allah R, Paul R and Sindic M 2013. Phenology of flowering and fruiting of cactus pear and effect of NP fertilizing. Poster présenté au 8^{ème} congrès international sur le cactus et la cochenille à carmin qui s'est tenu à Palerme en Sicile, Italie, du 28 au 31 Octobre 2013.

LISTE DES ABREVIATIONS

Anon.: Anonymus

ANOVA: Multivariate analysis of variance

AOAC: Association of Analytical Communities

CAM: Crassulacean acid metabolism

cv: Cultivar

DH: Dirham marocain; Moroccan dirham in English

DM: Dry matter

ETR: Evapotranspiration réelle

ETO: Evapotranspiration potentielle

FAO: Food and agriculture organization of the United States

FDP: Fruit development period

GIE: Groupement d'intérêt économique

INDH: Initiative Nationale pour le Développement Humain

IRR: Irrigation

Kc: Coefficient cultural ou cultural coefficient en anglais

Lsd: Least significant difference

PDF: Période de développement des fruits

PMV: Plan Maroc Vert

SST: Solides solubles totaux

°Brix: Degré Brix

RAINCUM: Cumulative rainfall

synon.: Synonymus

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 4: Biology, flowering and fruiting of the cactus *Opuntia* spp.: A review and some observations on three varieties in Morocco.

Table 1: Observations realized during the two years of observations on the phenology of flowering and fruiting of 'Achefri', 'Aissa' and 'Moussa' in the Agadir area.

Table 2: Duration of the phenologic phases of flowering and fruiting of 'Achefri', 'Aissa' and 'Moussa' during the first year of observations (2011) in the Agadir area.

Table 3: Duration of the phenologic phases of flowering and fruiting of 'Achefri', 'Aissa' and 'Moussa' during the second year of observations (2012) in the Agadir area.

Chapitre 5: Effects of irrigation at critical stages on the phenology of flowering and fruiting of the cactus *Opuntia* spp.

Table 1: Durations and start and end dates of the phases of flowering and fruit maturation of the varieties 'Achefri', 'Aissa' and 'Moussa' under the treatments of irrigation T1, T2 and T3, year 2011.

Table 2: The emission of vegetative and floral buds at the three varieties 'Achefri', 'Aissa' and 'Moussa' and under the three treatments of irrigation T1, T2 and T3 in 2011 (irrigations coincided with rains in march-May).

Table 3: Durations and start and end dates of the development phases for the varieties 'Achefri', 'Aissa' and 'Moussa' under T1, T2 and T3 treatments of irrigation, year 2012.

Table 4: Maturation dynamics in 2012 season, for the varieties 'Achefri', 'Aissa' and 'Moussa': (N) Total numbers of fruits per 10 cladodes; (A) proportions (in %) of ripe fruits before July 17th; (B) between July 17th and August 15th; (C) after August 15th.

Table 5: The emission of vegetative and floral buds and of shoots at the three varieties 'Achefri', 'Aissa' and 'Moussa' under the three treatments of irrigation T1, T2 and T3 in 2012

Chapitre 6: Impact of irrigation at critical crop stages on fruit yield and quality of the cactus *Opuntia* spp.

Table 1. Fruit yields of cvs. 'Achefri', 'Aissa' and 'Moussa' under T1, T2 and T3 irrigations in the first year experiments (2011).

Table 2. Fruit weight (a) and sizes (b) of cvs. 'Achefri', 'Aissa' and 'Moussa' under T1, T2 and T3 irrigations in the first year experiments.

Table 3. Effect of irrigation treatments on the number of fruits produced per plant and by 10 cladodes in 2011.

Table 4. Effect of irrigation dose on the fruit yield of the three varieties of cactus pear ('Achefri', 'Aïssa' and 'Moussa') in 2012.

Table 5. Effect of the irrigation treatments on fruit and pulp weights of the three cactus pear cultivars ('Achefri', 'Aïssa' and 'Moussa') in 2012.

Table 6. Effect of irrigation treatment on the number of fruits produced per plant and by 10 cladodes in 2012.

Table 7. Effects of the irrigation treatments on fruit organoleptic characteristics of the three cactus pear cultivars ('Achefri', 'Aïssa' and 'Moussa') for 2011 and 2012.

Chapitre 7: Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on fruit yield and quality of cactus pear *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.

Table 1. Effect of five N-P dressing treatments (T1-T5) on cactus pear (cv. Moussa) fruit yields (kg plant⁻¹) over two years in Agadir area, Morocco.

Table 2. Effect of five N-P dressing treatments (T1-T5) on cactus pear (cv. Moussa) fruit size in 2011 in Agadir area, Morocco.

Table 3. Effect of five N-P dressing treatments (T1-T5) on cactus pear (cv. Moussa) fruit size in 2012 in Agadir area, Morocco.

Table 4. Effect of five N-P dressing treatments (T1-T5) on cactus pear (cv. Moussa) fruit yield components in 2012 in Agadir area, Morocco.

Table 5. Effect of five N-P dressing treatments (T1-T5) on cactus pear (cv. Moussa) fruit organoleptic properties in 2011 and 2012 (Agadir area).

Table 6. Starting and ending dates of the growth phases of cactus pear (cv. Moussa) and their duration (in days) in 2011 (Agadir area).

Chapitre 8: Discussion générale

Tableau 1. Approches sur l'efficacité physiologique et sur l'efficacité économique des apports de fertilisants NP (sur base des résultats de 2012).

Tableau 2. Emission des bourgeons végétatifs et floraux en mars-avril 2017 chez les plantes qui ont reçu les traitements de fertilisation T1, T2, T3, T4 et T5 durant les années 2011 et 2012

LISTE DES FIGURES

Introduction générale

Figure 1: Produits de valorisation du cactus *Opuntia* au Maroc (a) gamme de produits de valorisation (confiture, jeunes cladodes en conserve, fleurs séchées, savons, crèmes dermiques, etc.); (b) huile des graines ; (c) poudre de nopal; (d) carmin (colorant naturel).

Chapitre 2: Revue bibliographique

Figure 1: Morceau de cladode d'*Opuntia* avec cuticule épaisse qui couvre le cladode et aréoles (nœuds axillaires) portant des feuilles réduites en épines et des glochides.

Figure 2: Emission des fleurs et des fruits sur la partie supérieure des cladodes d'un an (a, b et c) et des pousses sur les cladodes de deux ans et plus (c et d). Fleurs solitaires de grande taille et fruits à ovaire infère et qui se situent en dessous des fleurs (a et b).

Figure 3: Chevauchement et recouvrement des phases végétatives et reproductrices chez le cactus *Opuntia*: (a) et (b) recouvrement des phases émission des bourgeons et des pousses, floraison et grossissement des fruits; (c) et (d) recouvrement des phases développement des bourgeons floraux, développement et grossissement des fruits et maturation des fruits.

Figure 4: Bourgeon floral (a) et végétatif (b) du cactus *Opuntia*. Ils se distinguent par leur forme qui est sphérique chez le bourgeon floral et aplatie chez le végétatif.

Figure 5: (a et b) Coupe longitudinale d'une fleur des *Opuntias* qui montre la structure de la fleur et les pièces florales et (c et d) intervention des abeilles dans la pollinisation des *Opuntias*.

Figure 6: Fleurs en fanaison à la fin de la journée, après douze à vingt quatre heures d'ouverture.

Figure 7: Fruits du cactus *Opuntia* à maturité: forme ovale (a, b et c), protégé avec une écorce épaisse contenant des épines fines (glochides) sur des aréoles (c), fruit contenant une pulpe juteuse qui contient des graines (d).

Figure 8: Variétés de fruits du figuier de Barbarie *Opuntia ficus-indica* avec différentes couleurs: (a et b) variété 'Moussa' (écorce vert jaunâtre et pulpe jaune orangé) ; (c et d) variété 'El Akria' (écorce vert rougeâtre et pulpe rouge pourpre) ; (e et f) variété 'El Bayda' (écorce verdâtre et pulpe vert blanchâtre).

Chapitre 3: Matériel et méthodes

Figure 1: Système d'irrigation en goutte à goutte installé dans la parcelle des essais.

Chapitre 4: Biology, flowering and fruiting of the cactus *Opuntia* spp.: A review and some observations on three varieties in Morocco

Figure 1: Phenologic phases of flowering and fruiting of 'Achefri', 'Aissa' and 'Moussa' during the two years of observations in the Agadir area.

Figure 2: Climatic data of the experimental area during the two years of observations: (A): Rainfall; (B): Average temperature; and (C): Monthly sum of global radiation.

Chapitre 5: Effects of irrigation at critical stages on the phenology of flowering and fruiting of the cactus *Opuntia* spp.

Figure 1: Varieties used in the study: the spineless varieties 'Aissa' (a) and 'Moussa' (b) and the thorny one 'Achefri' (c): pictures were taken during the ripening phase in July 2011 and show differences in spines and cladode colour (green for the spineless cultivars and glaucous for the thorny cultivar).

Figure 2: Climatic conditions of the area of experiments (rainfall and average temperature) during the two years of study

Chapitre 6: Impact of irrigation at critical crop stages on fruit yield and quality of the cactus *Opuntia* spp.

Figure 1. Varieties used in the study: the spineless 'Aissa' and 'Moussa' varieties and the thorny 'Achefri' variety: pictures were taken during the ripening phase in July 2011 and show differences in spines and cladode colour (green for the spineless cultivars and glaucous for the thorny cultivar).

Figure 2. Hydric values on the basis of $K_c = 0.7$ and taking into account rainfall and irrigation. Agadir area, 2010–2011 season. (RAIN CUMU = cumulative rainfall; CUMRAIN+IRR = cumulative rainfall + irrigation).

Figure 3. Hydric values on the basis of $K_c = 0.7$ and taking in account rainfall and irrigation. Agadir area, 2011–2012 season. (RAIN CUMU = cumulative rainfall; CUMRAIN + IRR = cumulative rainfall + irrigation).

Chapitre 7: Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on fruit yield and quality of cactus pear *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.

Figure 1. Phenology of cactus pear cv. Moussa in 2012 for treatments T1 (not fertilized) and T5 (60N-80P) in Agadir area, Morocco. Data values are the cumulative numbers of organs per 10 cladodes for each treatment.

Figure 2. Flowering (a) and fruit ripening (b) phases of cactus pear cv. Moussa for the 5 fertilization treatments in 2012.

Figure 3. Dynamics of cactus pear cv. Moussa fruit ripening according to fertilizations (T1 to T5) in 2012. Values are expressed in number of mature fruits per 10 cladodes and per day.

Figure 4. Phenology of shoot emission in cactus pear cv. Moussa according to N-P dressings for 2011 (a) and 2012 (b). Values are the numbers of formed shoots per 10 cladodes.



INTRODUCTION GENERALE



Sous le terme cactus, on regroupe toutes les espèces de cactus, y compris celles qui sont utilisées à titre ornemental, qui sont des plantes xérophytes originaires des régions arides et semi-arides d'Amérique centrale et du sud. Un grand nombre d'espèces sont spontanées dans les plateaux du Mexique dont certaines ont été cultivées par les Aztèques sous le nom de "nopal" (Abdel-Hameed et al., 2014; USDA, 2014; Beyene et Haile, 2015). Des centaines d'espèces d'opuntia sont distribuées hors de leurs régions d'origine du fait de l'intense circulation des humains autour du monde (Kumschick et al., 2012). Elles sont cultivées dans les régions marginales arides et semi-arides du monde (Liguori et al., 2013; Varela-Gamez et al., 2014). Les opuntias sont largement distribués dans les continents américains (Beyene et Haile, 2015) et dans les régions tempérées et tropicales de plusieurs parties du monde comme en Afrique, en Australie et dans le bassin méditerranéen (El Kharrassi et al., 2016a) exprimant une capacité d'adaptation écologique élevée. Ils sont caractérisés par leur adaptation au climat des zones arides et semi-arides des régions tropicales et subtropicales du monde (El-Mostafa *et al.*, 2014; Bariagabre et al., 2016a et b) et un grand nombre d'espèces poussent à l'état sauvage dans les régions arides (moins de 250 mm par an) et semi-arides (250 à 450 mm par an) (Kalegowda et al., 2015). Les opuntias ont développé des adaptations de type phénologique comme la non synchronisation de la reproduction et éco-physiologique comme la transformation des feuilles en épines et le métabolisme CAM, qui leur permettent de se développer dans les zones où le stress hydrique fait obstacle à la croissance d'autres espèces végétales (Bariagabre et al., 2016a et b). La capacité de stocker de grandes quantités d'eau dans leurs tissus par le phénomène de succulence contribue à assurer la survie de ces plantes sous les conditions arides et semi-arides (Kalegowda et al., 2015).

Selon la systématique actuelle encore en cours de révision (Novoa et al., 2015), les cactus sont maintenant classés dans la nouvelle famille des Opuntiaceae Desv. (synon. Cactaceae Juss.) formée de 160 genres environ et ayant pour genre type *Opuntia* Mill. et composée de 1 500 à 2 000 espèces originaires d'Amérique centrale, du nord et du sud, dont un grand nombre du Mexique (Anon., 2006; Hunt et al., 2006; GRIN, 2007). Le nom commun cactus est utilisé pour désigner toutes les espèces de la nouvelle famille des Opuntiaceae et le nom de figuier de Barbarie est donné à de nombreuses espèces du genre *Opuntia* produisant des fruits comestibles (USDA, 2014). Les premiers botanistes européens ont nommé ce cactus à fruits comestibles *Ficus indica* à cause de leur

ressemblance avec la figue indienne ou figue de Barbarie (Anderson, 2001). Linné l'a publié sous le nom de *Cactus ficus indica* et par la suite Miller a combiné les noms mentionnés ci-dessus pour donner à cette espèce le nom d'*Opuntia ficus-indica* (Griffith, 2004). Donc, les figuiers de Barbarie sont actuellement classés comme appartenant à l'ordre des Caryophyllales; au sous ordre des Portulacinales; à la famille des Opuntiacées; et au genre *Opuntia* (GRIN, 2007).

Les opuntias sont connus bien avant l'arrivée des espagnols en Amérique. Ils ont été utilisés au début comme plantes ornementales en Espagne et leur consommation date de milliers d'années avant Jésus-Christ (Casas et Barbera, 2002). L'espèce inermes *O. ficus-indica*, actuellement connue en agriculture, est le résultat d'un long processus de sélection clonale (Kiesling et Metzger, 2017) et dont la domestication a commencé depuis des milliers d'années au Mexique (Bravo Hollis et Sanchez Mejorada, 1991; Reyes Agüero et al., 2005). Plusieurs taxons sont des ancêtres présumés d'*O. ficus-indica*, en particulier *O. megacantha* Salm-Dyck et *O. streptacantha* Lemaire (Kiesling et Metzger, 2017) et un grand nombre d'auteurs (Brutsch et Zimmerman, 1995; Kiesling, 1999; Griffiths, 1914) ont considéré *O. megacantha* comme une forme épineuse d'*O. ficus-indica*, ce qui a été aussi confirmé par les études moléculaires (Griffith, 2004). Cependant, d'autres auteurs ont indiqué que les deux espèces ont pour origine *O. streptacantha* (Scheinvar, 1995; Kiesling et Metzger, 2017).

La présence ou absence des épines et leur forme sont des caractères qui sont très variables chez les opuntias et la conversion des formes inermes en formes épineuses et vice versa est possible (Kiesling et Metzger, 2017). Plusieurs auteurs (Le Houérou, 1996; Kiesling, 1999; Zimmermann, 2011; Leuenberger et Arroyo Leuenberger, 2014) ont mentionné que des branches des formes inermes produisent des épines après un stress hydrique ou autre type de stress, d'autres auteurs (Berger, 1905; Chessa et Ochoa, communications personnelles) ont rapporté que le semis des graines de la forme inermes donne un petit pourcentage de plants avec des épines et vice versa. D'autre part, certains auteurs (Labra et al., 2003) ont indiqué que la présence d'épines n'est pas un caractère valable dans la taxonomie des opuntias car leur formation dépend des conditions de l'environnement.

Le nombre de chromosomes et le niveau de ploïdie sont des moyens utiles dans la taxonomie des plantes. Chez la famille des Opuntiacées (synon. Cactacées), le nombre de

chromosomes de base est de 11 et le nombre de chromosomes dans les cellules somatiques est souvent de 22 (Kiesling et Metzging, 2017). Dans la sous-famille des Opuntioïdées, 64% des taxons sont polyploïdes (Pinkava et al., 1985) et pour *Opuntia ficus-indica* et sa forme épineuse *O. megacantha*, Pinkava et al. (1973 et 1992) ont montré que $n = 44$ et que les deux formes peuvent être tetra-, exa- ou octoploïdes (le plus fréquent). Barbera et Inglese (1993) ont également indiqué que les plantes d'*O. ficus-indica* cultivées en Italie sont octoploïdes. Mais il existe une variation dans le nombre de chromosomes de cette espèce, selon sa provenance (Pinkava, 2002; Majure et al., 2012). Chez *O. streptacantha*, $n = 44$ (Pinkava et Parfitt, 1982) et $2n = 88$ (Palomino et Heras, 2001), chez *O. amyntia* et *O. megacantha*, $2n = 88$ et chez *O. polyacantha*, $2n = 44$ ou 66 (Kiesling et Metzging, 2017). La polyploïdie est favorisée par l'hybridation (Kiesling et Metzging, 2017) et plusieurs auteurs (Grant et Grant, 1982; Griffith, 2003) ont montré que dans le genre *Opuntia*, il y a une hybridation interspécifique et que l'hybridation en culture est commune dans ce genre (Kiesling et Metzging, 2017).

Du fait que les études morphologiques ont donné des hypothèses taxonomiques différentes, des perspectives sont attendues des études moléculaires (Kiesling et Metzging, 2017). Et bien qu'un grand nombre d'études ait porté sur la diversité génétique des cultivars (Bendhifi et al., 2013; El Finti et al., 2013; Ganopoulos et al., 2015), certains auteurs ont donné l'importance à la variabilité génétique d'*O. ficus-indica* (Kiesling et Metzging, 2017). Wang et al. (1999) et Boyle et Anderson (2002) ont montré qu'il n'y a pas de différence significative entre les cultivars fruitiers d'*O. ficus-indica* (y compris les inermes et les épineux) et Labra et al. (2003) ont indiqué qu'*O. ficus-indica* et *O. megacantha* ont un matériel génétique qui est très similaire et que la première espèce peut être une forme domestique de la deuxième espèce; la seule différence entre elles est la présence ou absence d'épines.

Griffith (2004) a trouvé au Mexique un clade (groupe d'organismes qui ont un même ancêtre) qui est formé d'*O. ficus-indica*, *O. streptacantha*, *O. tomentosa*, *O. leucotricha* et *O. hyptiacantha* dont l'analyse a montré que la domestication des opuntias a commencé au Mexique. Caruso et al. (2010) ont rapporté qu'*O. ficus-indica* est un groupe de clones qui sont issus de différentes espèces et qui sont sélectionnés pour des fins agronomiques. Alors que certains auteurs (Valadez Moctezuma et al., 2015) ont

indiqué que les espèces *O. ficus-indica*, *O. albicarpa* et *O. megacantha* apparaissent impossibles à séparer en différents clades, Samah et al. (2016) n'ont pas pu détecter de frontières claires entre ces espèces. De même, Astello Garcia et al. (2015) n'ont pas pu séparer entre clades de 5 espèces d'opuntias étudiées.

Ces études moléculaires indiquent qu'il y a une défaillance dans la taxonomie actuelle des opuntias et de l'*O. ficus-indica* en particulier et cela est dû à l'hybridation, à des réponses d'adaptation génétique, à la plasticité phénotypique ou à d'autres facteurs (Valadez Moctezuma et al., 2014).

Les cactus sont des plantes à tiges souvent succulentes, de couleur verte et caractérisées par le métabolisme CAM avec l'ouverture des stomates et l'entrée du CO₂ pendant la phase obscure (Anon., 2006; Liguori et al., 2013; Kalegowda et al., 2015). Les opuntias sont caractérisés par la présence de cladodes qui sont des tiges aplaties sous forme de branches jointives (Abdel-Hameed et al., 2014; USDA, 2014; Beyene et Haile, 2015). Le genre *Opuntia* est le plus important du point de vue économique et l'espèce *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill., le vrai figuier de Barbarie, est maintenant cultivée dans plus de 30 pays dans les deux hémisphères et dans tous les continents à l'exception de l'Antarctique (Pichler et al., 2012; FAO, 2013). Dans ces régions, elle est utilisée pour la consommation humaine en tant que fruit et légume, en alimentation du bétail durant les périodes de sécheresse et pour participer à la résolution des problèmes de l'érosion du sol (Pichler *et al.*, 2012 ; Silva et al., 2014; Valdez-Cepeda et al., 2014; Varela-Gamez et al., 2014). Grâce à une utilisation efficiente de l'eau, à un potentiel de production élevé en fruits et en biomasse (Silva et al., 2014), et à la multitude de produits utilisables dans les alimentations humaine et animale (Andiel, 2012; Novoa et al., 2015), le cactus opuntia joue un rôle important dans certains systèmes d'agriculture des régions arides et semi-arides (Chalak et al. 2014; Ramos et al., 2015). Chez le cactus, l'efficience dans la conversion de l'eau en matière sèche est de 4 à 5 fois plus grande que celle des plantes à C₄ comme le maïs (Kalegowda et al., 2015), et sa culture est récemment développée dans certains pays à cause de besoins en eau faibles et d'une productivité élevée. Il a été introduit dans le bassin méditerranéen en contribuant à la diversification des productions fruitières (Chalak et al., 2014).

La figure 1 présente les produits de valorisation du cactus opuntia qui sont fabriqués dans la région sud du Maroc par des coopératives, des associations professionnelles et

des petites sociétés privées. Ces produits sont vendus sur place au niveau des coopératives et sociétés privées et dans les foires et manifestations nationales et internationales. Certains produits, notamment les produits cosmétiques (huile des graines, crèmes dermiques) et pharmaceutiques (fleurs séchées, poudre de nopal) sont vendus à l'étranger sur commande dans les sites webs des organisations professionnelles et des sociétés. La plupart des organisations professionnelles ont bénéficié de supports financiers auprès de l'INDH (Initiative nationale pour le développement humain) et du PMV (Plan Maroc Vert).



(a) et (b) photos crédit du Magasine du tourisme et du développement durable au Maroc; (c) photo crédit du site web de sport santé; (d) photo crédit de Agrimaroc.

Figure 1: Produits de valorisation du cactus opuntia au Maroc (a) gamme de produits de valorisation (confiture, jeunes cladodes en conserve, fleurs séchées, savons, crèmes dermiques, etc.); (b) huile des graines; (c) poudre de nopal; (d) carmin (colorant naturel).

Dans les zones arides et semi-arides, le fruit du cactus a pris une importance croissante, tant aux niveaux économique que sociologique; il est parmi les rares productions qui peuvent être cultivées dans ces zones offrant de faibles possibilités de croissance et de développement à des espèces fruitières communes comme le pommier, l'oranger et le raisin (Beyene et Haile, 2015).

Des 300 espèces d'opuntia connues dans le monde, seules 10 à 12 espèces sont significativement cultivées pour la production de fruits comestibles, de jeunes cladodes en tant que légume et de cladodes adultes en tant que fourrage pour le bétail; à cela s'ajoute leur utilisation pour la production de carmin et d'autres produits économiquement importants. Les espèces les plus cultivées pour la production de fruits sont *O. ficus-indica*, *O. amyclae*, *O. xocnostle*, *O. megacantha* et *O. streptacantha*, la première espèce étant de loin dominante. Les espèces sauvages exploitées par cueillette comprennent *O. hyptiacantha*, *O. leucotricha* et *O. robusta* (Chenna Kesava et al., 2014).

Références

- Abdel-Hameed ES, Nagaty MA, Salman MS et Bazaid SA 2014. Phytochemicals, nutritional and antioxidant properties of two prickly pear cactus cultivars (*Opuntia ficus-indica* Mill.) growing in Taif, KSA. *Food Chemistry*, 160, 31–38.
- Anderson EF 2001. *The cactus Family*. Timber Press. Oregon, USA.
- Andiel A 2012. The role of cactus (*Opuntia ficus-indica*) in a changing environment in the semi-arid zone of Yemen: Cactus in Yemeni Desert: from marginal to competitive crop. Increasing food security and industrialization in Yemen, GAFÉIAS, p. 45-76.
- Anon. 2006. *Field botany at Williams College*. Ed. Williams College. USA
- Astello Garcia MG, Cervantes I, Nair V, Santos Diaz MDS, Reyes Aguero A, Gueraud F, Negre Salvayre A, Rossignol M, Cisneros Zevallos L et Barba de la Rosa AP 2015. Chemical composition and phenolic compounds profile of cladodes from *Opuntia* spp. cultivars with different domestication gradient. *Journal of Food Composition and Analysis*, 43, 119–130.
- Barbera G et Inglese P 1993. *La coltura del ficodindia*. Bologna, Italy, Edagricole. 189 p.
- Bariagabre SA, Asante IK, Gordon C et Ananng TY 2016a. Cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L.) a valuable crop for restoration of degraded soils in northern Ethiopia. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 6(8), 11-18.
- Bariagabre SA, Asante IK, Gordon C et Ananng TY 2016b. Cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L.): A future asset for sustainability of drylands in northern Ethiopia. *International Journal of Science, Environment and Technology*, 5(3), 846-860.
- Bendhifi M, Baraket G, Zourgui L, Souid S et Salhi Hannachi A 2013. Assessment of genetic diversity of Tunisian Barbary fig (*Opuntia ficus indica*) cultivars by RAPD markers and morphological traits. *Scientia Horticulturae*, 158, 1–7.
- Berger A 1905. *Opuntia ficus-indica* Mill. *Monatsschrift für Kakteenkunde*, 15, 153–154.
- Beyene HD et Haile RG 2015. Agro-industrial use of cactus, a review. *Food Science and Quality Management*, 39, 26-30.

- Boyle TH et Anderson EF 2002. Biodiversity and conservation. In: Nobel PS (ed.): *Cacti: Biology and uses*. University of California Press. p. 125–141.
- Bravo Hollis H et Sanchez Mejorada H 1991. *Las cactáceas de México*, vol. 3. National Autonomous University of Mexico. Mexico.
- Brutsch MO et Zimmermann HG 1995. Control and utilization of wild opuntias. In: Barbera G, Inglese P et Pimienta Barrios E (eds.). *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*. FAO Plant production and protection paper 132, FAO, Rome, p. 155–166.
- Caruso M, Curro S, Las Casas G, La Malfa S et Gentile A 2010. Microsatellite markers help to assess genetic diversity among *Opuntia ficus-indica* cultivated genotypes and their relation with related species. *Plant Systematic Evolution*, 290, 85–95.
- Casas A et Barbera G 2002. Mesoamerican domestication and diffusion. In: Nobel PS (ed.): *Cacti: Biology and uses*. University of California Press. p.143–162.
- Chalak L, Younes J, Roupheal S et Hamadeh B 2014. Morphological characterization of prickly pears (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) cultivated in Lebanon. *International Journal of Science and Research*, 3(6), 2541-2553.
- Chenna Kesava RS, Sucharitha KV, Venkata Ramana DK, Raveendra RM et Syamala B 2014. Medicated prickly pear (*Opuntia ficus-indica*)-the new emerging agricultural crop in arid and semi-arid regions of India. *International Journal of Applied Biology and Pharmaceutical Technology*, 5(4), 264-270.
- Chessa I 2017. Communication personnelle à Kiesling et Metzger (2017).
- El Finti A, Belayadi M, Boullani RE, Msanda F, Serghini MA et Mousadik AE 2013. Genetic structure of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) in Moroccan collection. *Asian Journal of Plant Science*, 12, 145–148.
- El Kharrassi Y, Mazri MA, Mabrouk A, Nasser B et El Mzouri E 2016a: Flowering and fruiting phenology, and physico-chemical characteristics of 2-year-old plants of six species of *Opuntia* from eight regions of Morocco. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 90(6), 682–688.
- EL-Mostafa K, EL Kharrassi Y, Badreddine A, andreo-letti P, Vamecq J, El Kebbaj MS, Latruffe N, Lizard G, Nasser B et cherkaoui-malki M 2014. Nopal cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a source of bioactive compounds for nutrition, health, and disease. *Molecules*, 19, 14879–14901.
- FAO 2013. *Agro-industrial utilization of cactus pear*. Rural Infrastructure and Agro Industrial Division. FAO, Rome.
- Ganopoulos I, Kalivas A, Kavroulakis N, Xanthopoulou A, Mastrogianni A, Koubouris G et Madesis P 2015. Genetic diversity of Barbary fig (*Opuntia ficus-indica*) collection in Greece with ISSR molecular markers. *Plant Gene*, 2, 29–33.
- Grant V et Grant KA 1982. Natural pentaploids in the *Opuntia linheimeri-phaeacantha* group in Texas. *Botanical Gazette*, 143, 117–120.
- Griffith MP 2003. Using molecular data to elucidate reticulate evolution in *Opuntia* (Cactaceae). *Madrono*, 50, 162–169.
- Griffith MP 2004. The origins of an important cactus crop, *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae): New molecular evidence. *American Journal of Botany*, 91(11), 1915-1921.

- Griffiths D 1914. Reversion in prickly pears. *Journal Heredity*, 5, 222–225.
- GRIN 2007. Opuntiaceae information from NPGS (National plant germplasm system) of GRIN (Germplasm resources information network). Taxonomic information on cultivated plants in the USA. National genetic resources program. United States Department of Agriculture, Agricultural research service. Maryland, USA.
- Hunt D, Taylor N et Charles G 2006. *The new cactus lexicon*. 2 vols. DH books, Milborne Port, England.
- Kalegowda P, Haware DJ, Rajarathnam S et Shashirekha MN 2015. Minerals of cactus (*Opuntia dillenii*): Cladode and fruit. *Current Science*, 109(12), 2295-2298.
- Kiesling R 1999. Origen, domesticacion y distribucion de *Opuntia ficus-indica*. *Journal of Professional Association for Cactus Development*, 3, 50–59.
- Kiesling R et Metzger D 2017. Origin and taxonomy of *Opuntia ficus-indica*. In: FAO & ICARDA (eds.): *Crop ecology, cultivation and uses of cactus pear*. Rome, Italy. p. 14-19.
- Kumschick S, Bacher S, Dawson W, Heikkilä J, Sendek A, Pluess T, Robinson TB et Kuhn I 2012. A conceptual framework for prioritization of invasive alien species for management according to their impact. *NeoBiota*, 15, 69-100.
- Labra M, Grassi F, Bardini M, Imazio S, Guiggi A, Citerio S, Banfi E et Sgorbati S 2003. Genetic relationships in *Opuntia* Mill. genus (Cactaceae) detected by molecular marker. *Plant Science*, 165, 1129–1136.
- Le Houérou HN 1996. The role of cacti (*Opuntia* spp.) in erosion control, land reclamation, rehabilitation and agricultural development in the Mediterranean Basin. *Journal of Arid Environments*, 33, 135–159.
- Leuenberger BE et Arroyo Leuenberger S 2014. Northern hemisphere *Opuntia* and *Cylindropuntia* species (Cactaceae) naturalized in Argentina – and the riddle of *Opuntia penicilligera*. *Succulent Plant Research*, 8, 95–112.
- Liguori G, Inglese G, Pernice F, Sortino G et Inglese P 2013. CO₂ uptake of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. whole trees and single cladodes, in relation to plant water status and cladode age. *Italian Journal of Agronomy*, 8(3), 14-20.
- Majure LC, Puente R et Pinkava DJ 2012. Miscellaneous chromosome numbers in Opuntieae DC. (Cactaceae) with a compilation of counts for the group. *Haseltonia*, 18, 67–78.
- Novoa A, Johannes J, Le Roux JJ, Robertson MP, Wilson JR et Richardson DM 2015. Introduced and invasive cactus species: A global review. *AoB Plants*, 7, 1-14.
- Ochoa M 2017. Communication personnelle à Kiesling et Metzger (2017).
- Palomino G et Heras HM 2001. Karyotypic studies in *Opuntia cochineria*, *O. hyptiacantha*, and *O. streptacantha* (Cactaceae). *Caryologia*, 54, 147–154.
- Pichler T, Young K et Alcantar N 2012. Eliminating turbidity in drinking water using the mucilage of a common cactus. *Water Science & Technology*, 12(2), 179-186.
- Pinkava DJ 2002. Chromosome numbers of the continental North American Opuntioideae (Cactaceae). *Succulent Plant Research*, 6, 78–98.

- Pinkava DJ, Baker MA, Parfitt BD, Mohlenbrock MW et Worthington RD 1985. Chromosome numbers in some cacti of North America V. *Systematic Botany*, 10, 471–483.
- Pinkava DJ, Parfitt BD, Baker MA et Worthington RD 1992. Chromosome numbers in some cacti of North America VI, with nomenclatural changes. *Madroño*, 39, 98–113.
- Pinkava DJ, McLeod MG, McGill LA et Brown RC 1973. Chromosome numbers in some cacti of Western North America II. *Brittonia*, 25, 2–9.
- Ramos JPF, Santos EM, Beltrãocruz GR, Pinho RMA, De Freitas PMD 2015. Effects of harvest management and manure levels on cactus pear productivity. *Revista Caatinga Mossoró*, 28(2), 135-142.
- Reyes Aguero JA, Aguirre JR et Hernandez HM 2005. Systematic notes and a detailed description of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. (Cactaceae). *Agrociencia*, 39, 395–408.
- Samah S, De Teodoro Pardo CV, Serrato Cruz MA et Valadez Moctezuma E 2016. Genetic diversity, genotype discrimination, and population structure of Mexican *Opuntia* sp., determined by SSR markers. *Plant Molecular Biology Reporter*, 34(1), 146-159.
- Scheinvar L 1995. Taxonomy of utilized *Opuntias*. In: Barbera, G, Inglese P & Pimienta Barrios E (eds): *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*. Plant Production and Protection Paper 132. FAO, Rome, Italy. p. 20–27.
- Silva TGF, Primo JTA, E Silva SMS, De Moura MSB, Dos Santos DC, Silva MC et Arauja JEM 2014. Water and nutrient use efficiency indicators of cactus pear clones in rainfed conditions in the Brazilian Semi-arid region. *Bragantia*, 73(2), 184-191.
- USDA 2014. Field guide for managing prickly pear in the Southwest. Forest service, Southwest region, 7p.
- Valadez Moctezuma E, Samah S et Luna Paez A 2015. Genetic diversity of *Opuntia* spp. varieties assessed by classical marker tools (RAPD and ISSR). *Plant Systematics and Evolution*, 301, 737–747.
- Valdez-Cepeda RD, Méndez-Gallegos SJ, Magallanes-Quintanar R, Ojeda-Barrios DL et Blanco-Macías F 2014. Fruit yield per cladode depends on its physical attributes in *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. variety ‘rojo pelón’. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 20(2), 131-146.
- Varela-Gómez Y, Caldera-Arellano AN, Jorge Zegbe A, Serna-Pérez A et Mena-Covarrubias J 2014. Irrigation in nopal influences the storage and packaging of tuna. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(8), 1377-1390.
- Wang X, Felker P, Burrow MD et Paterson AH 1999. Comparison of RAPD marker patterns to morphological and physiological data in the classification of *Opuntia* accessions. *Journal of Professional Association for Cactus Development*, 3, 3–15.
- Zimmermann HG 2011. History of invasive succulent plants in the region. *Abc Taxa*, 11, 13–19.



Chapitre 1

Contexte scientifique et objectifs de l'étude



I. CONTEXTE SCIENTIFIQUE

L'établissement de systèmes de production durable basés sur le cactus *opuntia*, ou le comprenant, peut contribuer à la sécurité alimentaire des populations dans les régions où l'agriculture est marginalisée (Nefzaoui *et al.*, 2014). Le cactus a été suggéré en tant que production alternative pour ces régions marginales (Jorge Zegbe *et al.*, 2014). Il est connu comme "pont de vie" dans certaines régions du fait que durant les périodes de sécheresse, il est la seule production pouvant être utilisée dans l'alimentation de l'Homme et du bétail (Beyene et Haile, 2015). Il peut être considéré comme une culture pérenne de haute valeur nutritionnelle, avec une intégration importante dans les processus de production et de diversification de l'agriculture et dans le développement de nouveaux produits agricoles typiques (Ramos *et al.*, 2015). Le cactus est rarement irrigué ou, en région méditerranéenne, irrigué autour de la floraison et du développement des fruits ou en période sèche d'été (Inglese, 2010). Cependant, son irrigation tend à devenir plus commune dans les régions à été chaud et sec où on pratique une culture intensive pour une production commerciale (Mexique, USA, Chili, Italie, Afrique du sud, Maroc, Tunisie, etc.) (Inglese, 2010).

Outre les questions de choix variétal et l'installation du verger (densités, arrangement spatial, améliorations foncières,...), la conduite technique de la culture comprend, entre autres l'irrigation et la fertilisation des plantes (Mena-Covarrubias, 2013; Méndez-Gallegos *et al.*, 2013; Varela-Gamez *et al.*, 2014) et des techniques culturales comme l'irrigation au goutte à goutte et la fertilisation sont appliquées sur des plantations commerciales de cactus (Chalak *et al.*, 2014; Beyene et Haile, 2015). Ces techniques culturales, notamment l'irrigation et la fertilisation, ont une influence sur le rendement et la qualité des fruits; elles sont nécessaires pour l'optimisation de la production et l'amélioration de la qualité (Varela-Gamez *et al.*, 2014; Beyene et Haile 2015). Plusieurs auteurs ont rapporté que la fertilisation minérale, notamment la fertilisation NP, a un effet positif sur le rendement en fruits et la qualité des fruits (Claassens et Wessels, 1997; Ochoa et Uhart, 2006; Inglese, 2010; Mimouni *et al.*, 2013; Jorge Zegbe *et al.*, 2014). Dans certains pays comme l'Italie, le Chili et l'Afrique du sud, la productivité et la qualité des fruits du cactus ont été significativement augmentées par l'irrigation des plantes, alors que les fruits qui sont produits sous un déficit hydrique sont de petit calibre (Varela-Gamez *et al.*, 2014). Les plantes à métabolisme de type CAM, notamment le cactus, peuvent utiliser l'eau de façon plus efficace que les plantes à

métabolisme de types C₃ et C₄: la génération de biomasse par unité de volume d'eau chez les plantes à CAM est en moyenne de 5 fois plus élevée que chez les plantes à C₄ et 10 fois plus grande que pour les plantes à C₃ (Bariagabre et al., 2016a et b).

La productivité agricole du sol est en corrélation avec sa fertilité organo-minérale. Cette fertilité agit en association avec les autres facteurs de développement de la plante, comme les disponibilités en eau, en lumière et en chaleur et participe à l'amélioration de la production et de la qualité des fruits (Silva et al., 2014). Le cactus opuntia semble répondre aux fertilisations minérales, notamment celles en N et en P (Felker et Bunch, 2009), l'absorption de ces nutriments par la plante dans le sol est élevée (Ramos et al., 2015). Un grand nombre d'études sont faites sur la fertilisation azotée entre autre à cause de son effet important sur la floraison et la fructification du cactus (Potgieter, 2007). L'influence de la fertilisation sur le rendement a été mise en évidence par Stewart et al. (2005) qui ont évalué 362 plantations de cactus et ont observé que 30 à 50% des rendements des productions de ces plantations sont attribuables aux fertilisants minéraux, notamment l'azote et le phosphore.

Au Maroc, et particulièrement dans la région sud, le cactus connaît actuellement un intérêt particulier à cause de sa résistance à la sécheresse et de son rôle socio-économique: production de fruits comestibles et de fourrage pour le bétail et valorisation de la plante en produits de haute valeur ajoutée pour les agriculteurs et les populations locales (produits agro-alimentaires, cosmétiques et pharmaceutiques). La culture du cactus opuntia présente un faible coût de production et constitue une source financière pour les agriculteurs et les populations rurales de la région. Il y a une extension des plantations dans les régions de production au Maroc, mais la plupart du temps avec des technologies insuffisantes pour que les plantes puissent exprimer la totalité de leur potentiel. C'est une espèce de grandes potentialités économiques, tout est valorisable dans la plante et rien ne se perd; on pourrait tirer profit d'une multitude de produits à partir des fruits, des graines, des fleurs et des cladodes.

Les avantages offerts par cette espèce, notamment sa résistance à la sécheresse, son adaptation à un climat aride où la pluviosité annuelle ne dépasse pas 100 à 200 mm et sa capacité de se développer et de fructifier dans ce type de climat, font du cactus une espèce de premier choix pour le développement d'expériences agricoles et écologiques dans le pays où une grande part du territoire est constituée de zones arides. Sa culture

nécessite moins d'investissement et son rendement à l'hectare peut être plus élevé que celui des autres cultures qui sont pratiquées dans ces régions, notamment les céréales. Pour développer ces économies régionales, en particulier celles des zones arides, le pays a besoin de définir des systèmes agricoles productifs n'exigeant pas de grandes quantités d'eau. Dans la région d'Ait Baamrane au sud du Maroc, le cactus a été introduit par les Espagnols vu l'aridité de la zone et sa proximité à l'océan atlantique. La pratique de la céréaliculture dans la région n'est plus rentable à cause de la rareté de la pluie et de son irrégularité dans le temps. Le cactus est devenu la principale culture de la région et le développement de sa filière par la valorisation de ses produits a montré son efficacité dans le développement socio-économique de la région. Comme dans les autres régions de production, la culture du cactus dans la région sud a fait naître une florissante agroindustrie et un marché potentiel de commercialisation des produits à l'échelle nationale et internationale. Des programmes de plantations et de développement de la filière cactus et de valorisation de ses produits, avec comme objectifs principaux le développement socio-économique de la région et la génération de revenus pour les agriculteurs et les populations locales, sont élaborés dans le cadre du Plan Maroc Vert. Des organisations professionnelles (coopératives et GIE (groupements d'intérêt économique)) sont opérationnelles dans la production et la commercialisation des produits du cactus dans la région.

Le cactus occupe des superficies importantes au Maroc. La majorité des plantations sont de type traditionnel en "bour" (pluviales) et ne reçoivent que peu d'entretien. Elles ne sont pas irriguées ni fertilisées, elles ont des difficultés à surmonter la période sèche et chaude d'été qui peut s'étendre de mars-avril jusqu'à octobre, notamment dans la région sud. Les plantes qui ne sont pas irriguées pendant cette longue période chaude et sans pluie, sont exposées à un stress hydrique intense. Les cladodes sont déshydratés et les plantes deviennent jaunâtres, avec même parfois des brûlures sur les cladodes dues à la chaleur et aux coups de soleil quelquefois associés au vent chaud de l'est ('chergui'). Cette période sèche et chaude coïncide avec le développement des fruits du cactus, ce qui, en absence d'irrigation et de fertilisation, entraîne des rendements faibles et des fruits de petit calibre et de médiocre qualité.

Actuellement, de nouvelles plantations de cactus sont établies dans la région méditerranéenne (Nerd et Mizrahi, 2010; Inglese, 2010; FAO, 2013), et en particulier au

Maroc où des plantations alignées avec une densité élevée ont été installées au cours des deux dernières décennies, dans le cadre du PMV (Plan Maroc Vert), en particulier dans la région sud. Des changements dans les techniques de production, comme la mise en œuvre de la fertilisation et celle de l'irrigation à des périodes critiques de la plante, notamment aux périodes de floraison et du grossissement des fruits, peuvent améliorer le rendement et la qualité des fruits.

II. OBJECTIFS DE L'ETUDE

Notre étude a eu deux objectifs principaux et un objectif complémentaire.

Le premier objectif a été d'étudier les effets de la fertilisation minérale azotée et phosphatée sur le rendement et sur la qualité des fruits du figuier de Barbarie (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.).

Nous nous sommes limités à l'étude de la fertilisation azoto-phosphatée et nous n'avons pas traité la fertilisation potassique du fait que les sols de la région sont pourvus en K disponible pour les plantes. Les analyses chimiques du sol de la parcelle des essais ont montré que la teneur en K assimilable par la plante variait de 0,347 à 0,694 ‰. Un grand nombre d'auteurs a montré que le cactus ne répond pas bien à la potasse, notamment Claassens et Wessels (1997), Karim et al. (1998), Ochoa et Uhart (2006) et Jorge Zegbe et al. (2014). De plus, il a été décidé de ne pas considérer comme prioritaires les éventuelles questions concernant la nutrition en éléments secondaires et en microéléments. En effet les analyses de sol effectuées pour déterminer les niveaux de richesse en les éléments (Ca, Mg, Cl, Fe, etc.) sous leurs formes assimilables ne mettaient en évidence aucun état de pauvreté. Ceci était justifié, d'autre part, par la constatation qu'aucun symptôme de carence typique à ces éléments (coloration jaunâtre des branches et chloroses sur les cladodes et faible croissance des tiges) (Anon., 2017) n'avait pas été observé au cours des années précédentes, ni sur les parties végétatives, ni sur les fruits. Les légères chloroses observées sur l'appareil végétatif pouvaient, à ce stade, être attribuées à un manque, à une sorte de « subcarence » en azote et/ou en phosphore, ce que confirmait l'analyse du sol.

Le deuxième objectif a été d'étudier les effets de l'irrigation à des périodes critiques de la plante, notamment les périodes de floraison et de grossissement des fruits, **sur la production et la qualité des fruits** de trois variétés de cactus. Notre étude n'avait pas

pour objectif de quantifier les besoins en eau du cactus, ni de faire un quelconque bilan hydrique de la culture. Elle se limite à étudier les effets de faibles apports d'eau à des périodes critiques, notamment les périodes de floraison et du grossissement des fruits, sur le rendement en fruits et sur la qualité de ces fruits.

A ces objectifs liés au rendement et à la qualité des fruits a été couplé **un troisième objectif** de nature plus physiologique. Il s'agissait **d'évaluer les effets éventuels de ces fertilisations et irrigations sur la physiologie de développement du cactus**, notamment la phénologie de sa floraison et de sa fructification, à travers le suivi des phases de développement c'est-à-dire par l'observation de dates de début de réalisation de stades tels que émission de bourgeons floraux, floraison, maturation des fruits. Ce suivi a été effectué dans les mêmes dispositifs expérimentaux que ceux mis en œuvre pour les deux objectifs principaux ainsi que dans un dispositif spécifique sur les variétés. Sur un plan très pratique, il s'agissait d'abord de constater d'éventuelles modifications des dates des premières et des dernières maturations de fruits, modifications qui présenteraient un intérêt dans l'allongement de la période de maturation/récolte ou dans son déplacement - soit en précocité ou en tardivité - ce qui permettrait entre autres des mises sur le marché à des dates "hors saison" où les prix sont plus élevés ou bien un étalement des périodes de pointe de travail pour la récolte. Il s'agissait aussi d'étudier les effets des fertilisations et des irrigations sur l'émission des bourgeons végétatifs et floraux et sur l'émission de nouvelles pousses, ou de nouveaux jeunes cladodes issus des bourgeons végétatifs, organes nécessaires pour la productivité des saisons ultérieures.

Références

- Anon. 2017. La fertilisation des cactus et autres plantes succulentes. Au Cactus Francophone. 8p.
- Bariagabre SA, Asante IK, Gordon C et Ananng TY 2016a. Cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L.) a valuable crop for restoration of degraded soils in northern Ethiopia. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 6(8), 11-18.
- Bariagabre SA, Asante IK, Gordon C et Ananng TY 2016b. Cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L): A future asset for sustainability of drylands in northern Ethiopia. *International Journal of Science, Environment and Technology*, 5(3), 846-860.
- Beyene HD et Haile RG 2015. Agro-industrial use of cactus, a review. *Food Science and Quality Management*, 39, 26-30.
- Chalak L, Younes J, Roupahel S et Hamadeh B 2014. Morphological characterization of prickly pears (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) cultivated in Lebanon. *International Journal of Science Research*, 3(6), 2541-2553.

- Claassens AS et Wessels AB 1997. The fertilizer requirements of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) under summer rainfall conditions in South Africa, *Acta Horticulturae*, 438, 83-96.
- FAO 2013. Agro-industrial utilization of cactus pear. Rural infrastructure and agro industrial division. FAO, Rome.
- Felker P et Bunch RA 2009. Mineral nutrition of cactus for forage fruits. *Acta Horticulturae*, 811, 389-394.
- Inglese P 2010. Cactus pear *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. for fruit production: An overview. FAO Cactusnet Newsletter special issue.
- Jorge Zegbe A, Sánchez-Toledano BI, Serna-Pérez A et Mena-Covarrubias J 2014. Economic analysis of the application of mineral fertilizers on the yield of prickly pear. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(3), 449-461.
- Karim MR, Felker P et Bingham RL 1998. Correlations between cactus pear (*Opuntia* spp.) cladode nutrient concentrations and fruit yield and quality, *Annals of Arid Zone*, 37, 159-171.
- Mena-Covarrubias J 2013. Tecnología de manejo integrado para los insectos plaga del nopal tunero en el Altiplano Mexicano. In: Gallegos-Vázquez C, Méndez-Gallegos SJ et Mondragón-Jacobo C (eds.): Producción sustentable de la tuna. Colegio de Postgraduados y Fundación Produce San Luis Potosí, A. C. San Luis Potosí, México. p. 125-161.
- Méndez-Gallegos SJ, Gallegos-Vázquez C et Mondragón-Jacobo C 2013. Manejo de huertos comerciales de nopal tunero. In: Gallegos-Vázquez C, Méndez-Gallegos SJ et Mondragón-Jacobo C (eds.): Producción sustentable de la tuna. Colegio de Postgraduados y Fundación Produce San Luis Potosí, A.C. San Luis Potosí, México. p. 97-114.
- Mimouni A, Ait Lhaj A et Ghazi M 2013. Mineral nutrition effect on cactus pear (*Opuntia ficu-sindica* spp.) growth and development, *Acta Horticulturae*, 995, 213-220.
- Nefzaoui A, Louhaichi M et Ben Salem H 2014. Cactus as a tool to mitigate drought and to combat desertification. *Journal of Arid Land Studies*, 13, 121-124.
- Nerd A et Mizrahi Y 2010. Reproductive biology of cactus fruit crops. *Horticultural Review*, 18, 321-346.
- Ochoa MJ et Uhart SA 2006. Nitrogen availability and fruit yield generation in cactus pear (*Opuntia ficus-indica*): III. Effects on fruit yield and dry matter allocation to reproductive sinks. *Acta Horticulturae*, 728, 131-136.
- Potgieter JP 2007. The influence of environmental factors on spineless cactus pear (*Opuntia* spp.) fruit yield in Limpopo Province, South Africa, *Magister scientiae agriculturae*, University of the Free State, Bloemfontein, South Africa, 121p.
- Ramos JPF, Santos EM, Beltrãocruz GR, Pinho RMA et De Freitas PMD 2015. Effects of harvest management and manure levels on cactus pear productivity. *Revista Caatinga*, Mossoró, 28(2), 135-142.
- Silva TGF, Primo JTA, E Silva SMS, De Moura MSB, Dos Santos DC, Silva MC et Araujo JEM 2014. Water and nutrient use efficiency indicators of cactus pear clones in rainfed conditions in the Brazilian Semi-arid region. *Bragantia*, 73(2), 184-191.
- Stewart WM, Dibb DW, Johnston AE et Smyth TJ 2005. Contribution of commercial fertilizer nutrients to food production. *Agronomy Journal*, 97, 1-6.
- Varela-Gámez Y, Caldera-Arellano AN, Jorge Zegbe A, Serna-Pérez A et Mena-Covarrubias J 2014. Irrigation in nopal influences the storage and packaging of tuna. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(8), 1377-1390.



Chapitre 2

Revue bibliographique



La revue bibliographique ci-après présente des références de caractère généraliste, par distinction avec les revues bibliographiques présentées dans les chapitres 4 (biologie), 5 (phénologie), 6 (irrigation) et 7 (fertilisation), celles-ci étant plus détaillées et spécifiques à leur thématique. Pour une bonne compréhension des textes, il n'a toutefois pas été possible d'éviter certaines redites.

I. BIOLOGIE ET PHENOLOGIE DE LA PLANTE

Le cactus *Opuntia* est bien adapté aux milieux arides et semi-arides. Il a la capacité de fixer le dioxyde de carbone pendant la phase obscure et de fermer ses stomates pendant le jour. La cuticule épaisse qui couvre les cladodes lui permet de tolérer une grande marge de températures et de prospérer dans des environnements qui sont limités en eau (USDA, 2014). La figure 1 montre un morceau de cladode qui est couvert par la cuticule et illustre la structure d'un aréole (nœud axillaire) avec des épines et glochides.

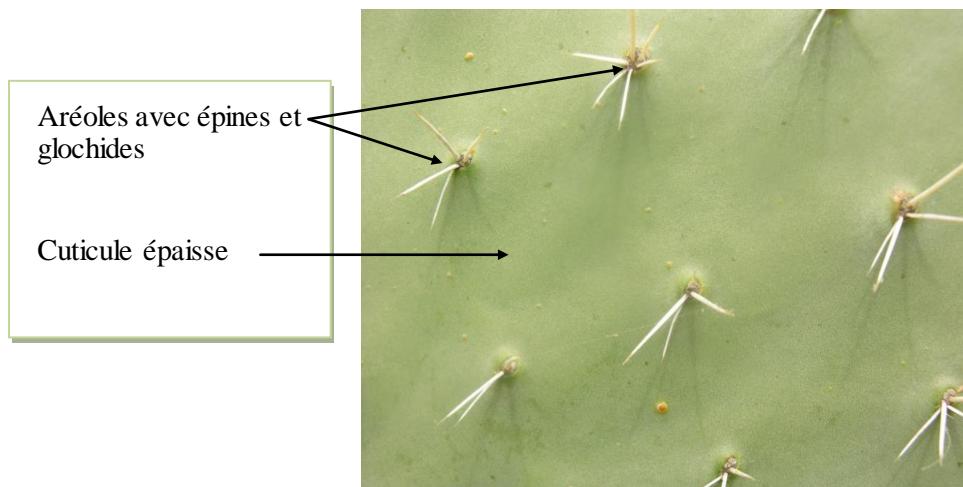


Figure 1 : Morceau de cladode d'*Opuntia* avec cuticule épaisse qui couvre le cladode et aréoles (nœuds axillaires) portant des feuilles réduites en épines et des glochides.

Les feuilles sont réduites à des épines de forme, longueur, couleur et nombre variables sur des aréoles (nœuds axillaires) qui couvrent la totalité du cladode (figure 1). Ces aréoles contiennent aussi de fines épines barbelées appelées glochides qui se collent de façon désagréable dans la peau des humains et des animaux (USDA, 2014).

La floraison et l'émission des pousses se déroulent au printemps, les fleurs naissent souvent sur la partie supérieure des cladodes d'un an et les jeunes pousses naissent souvent sur les cladodes de deux ans et plus (USDA, 2014; Valdez-Cepeda et al., 2014). Les fleurs sont solitaires, de grande taille et de couleur jaune, rose ou rouge, l'ovaire est infère et les fruits se forment en dessous du calice (USDA, 2014). La figure 2 illustre l'émission des fleurs sur les cladodes d'un an et des pousses sur les cladodes de deux ans et plus et montre la forme et la position des fleurs et des pousses sur les cladodes.



Figure 2 : Emission des fleurs et des fruits sur la partie supérieure des cladodes d'un an (a, b et c) et des pousses sur les cladodes de deux ans et plus (c et d). Fleurs solitaires de grande taille et fruits à ovaire infère et qui se situent en dessous des fleurs (a et b).

Le déclenchement du processus de floraison par les facteurs environnementaux est appelé induction florale. Son résultat est un changement dans le modèle de développement des bourgeons qui se transforment en fleurs. Certaines espèces, comme les agrumes, ne demandent aucune signalisation environnementale pour fleurir, elles sont dites auto-inductives. Cependant, leur floraison peut être augmentée par des traitements de températures basses modérées ou par un stress hydrique (Sinon Gene Albrigo et Galan Sauco, 2004).

L'aréole est un bourgeon axillaire chez le cactus. Après une certaine période (qui peut être longue ou courte), son méristème du centre entre en dormance et lorsqu'il revient à son état d'activité, il se développe soit (i) en petite pousse qui va donner un cladode avec des aréoles et des feuilles rudimentaires (ii) ou en pousse longue modifiée qui va donner une fleur (Prat et al., 2017). La photopériode et/ou les températures basses d'hiver peuvent être des signaux environnementaux pour une induction florale chez les opuntias (Inglese et al., 2017). Les éléments nutritifs peuvent également affecter l'induction

florale chez le cactus *Opuntia* puisque la fertilisation azotée peut augmenter le nombre de bourgeons floraux chez cette espèce (Nerd et al, 1993).

Nobel et Castaneda (1998) qui ont étudié l'émission de nouveaux organes chez les cladodes détachés (en hiver, à la fin de printemps ou fin d'été) d'*O. ficus-indica* et qui sont placés dans une serre (températures moyennes maximales jour/nuit de 26/14°C de Janvier à Mai et 29/17°C de Juin à Décembre et humidité relative max/min de 75/40%) ou dans une chambre environnementale à environnement contrôlé (températures jour/nuit de 15/5°C, 25/15°C et 35/25°C et humidité relative moyenne de 85/55% à 15/5°C, 75/45% à 25/15°C et 65/40% à 35/25°C), ont montré qu'après une période de 14 semaines l'émission de nouveaux organes dans une chambre environnementale à 25/15°C ou dans une serre à 26/16°C a été plus facile et significativement plus élevée chez les cladodes détachés en hiver (2,14 organes/cladode détaché) que chez les cladodes détachés en fin de printemps (0,78 organes/cladode détaché) ou fin d'été (0,07 organes/cladode détaché). Chez les cladodes détachés en hiver, 22% des organes émis sont des fruits et le nombre de fruits émis chez les cladodes détachés en fin de printemps ou fin d'été a été plus faible et a diminué de la même manière que dans l'émission des organes.

Ils ont également montré que la lumière (photopériode) a une influence sur l'émission des organes. Chez les cladodes détachés en hiver, l'émission des organes ne se fait que lorsque la lumière à l'intérieur de la serre dépasse celle de l'extérieur de la serre de 35% et le nombre d'organes émis a atteint son maximum lorsque la lumière de l'intérieur de la serre est à 75% de la lumière externe. Les températures jour/nuit ont également une influence sur l'émission des organes. Dans une chambre environnementale, le nombre de pousses émises sur les cladodes détachés en hiver a été augmenté de 4 fois d'une température jour/nuit de 15/5°C à une température jour/nuit de 25/15°C, avec 25% de plus à température de 35/25°C. Mais l'émission des fruits a été plus élevée à température jour/nuit basse de 15/5°C (4,7 fruits/cladode détaché) qu'à températures jour/nuit élevées de 25/15°C (1,18 fruits/cladode détaché) et 35/25°C (0,19 fruits/cladode détaché).

Nobel et Castaneda (1998) ont conclu que les températures basses favorisent l'émission des fruits et les températures modérées à élevées favorisent l'émission des pousses puisque l'émission des pousses a augmenté avec l'augmentation des températures jour/nuit et l'émission des fruits a diminué avec l'augmentation de ces températures.

Dans une expérimentation qui est proche de celle de Nobel et Castaneda (1998), l'exposition de cladodes détachés d'*O ficus-indica* à une température constante de 10°C pour une période de 3 semaines a entraîné la production de plus de fleurs que leur exposition à 35°C pour une même période (Gutterman, 1995). Sinon Gene Albrigo et Galan Saucó (2004) ont également rapporté que les températures basses entraînent la dormance des bourgeons et l'intensité de la floraison augmente avec la durée de traitement des bourgeons au froid.

Le cactus *Opuntia* préfère des sols légers et drainants. Les conditions idéales pour sa croissance et son développement se rencontrent dans les régions de plein soleil et de températures clémentes. De telles conditions règnent dans des reliefs ensoleillés et rocheux des régions du sud du Maroc.

L'étude du comportement phénologique de plusieurs écotypes d'une jeune plantation de cactus (âgée de trois ans) dans la région de Chaouia-Ourdigha au Maroc a montré que ces écotypes ne présentent pas le même comportement phénologique (Mabrouk et al., 2016). Certains écotypes ont une période de production des bourgeons végétatifs et floraux durant le printemps et l'été et une période de fructification assez longue due au chevauchement des phases végétatives et reproductives (écotypes des espèces *O. ficus-indica* et *O. megacantha*). La figure 3 montre le chevauchement et le recouvrement des phases végétatives et reproductives chez le cactus *Opuntia*. D'autres écotypes n'ont produit des bourgeons végétatifs et floraux que durant l'une des deux saisons (écotypes des espèces *O. dillenii* et *O. robusta*). La figure 4 montre la différence entre un bourgeon floral (forme sphérique) et végétatif (forme plate). L'émission des pousses chez les écotypes étudiés est également variable, elle est importante chez les écotypes des espèces *O. ficus-indica* et *O. megacantha* où elle varie de 16 à 20 pousses par plante.

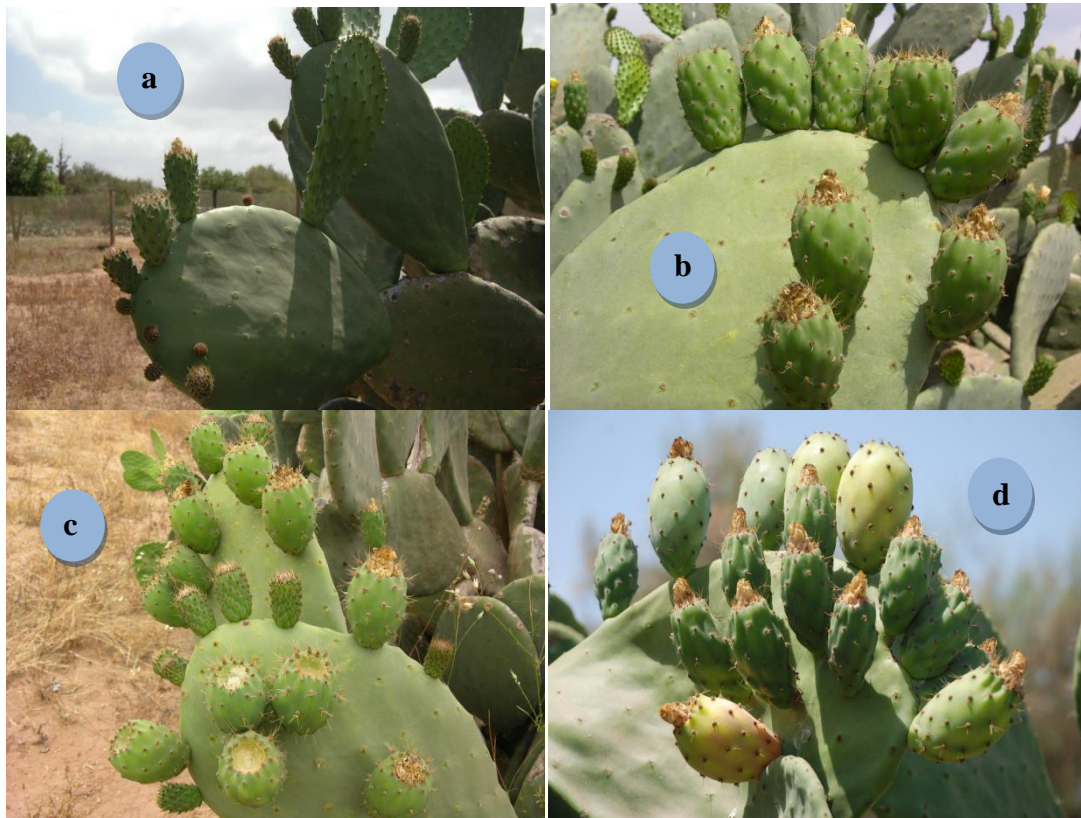


Figure 3: Chevauchement et recouvrement des phases végétatives et reproductrices chez le cactus opuntia: (a) et (b) recouvrement des phases émission des bourgeons et des pousses, floraison et grossissement des fruits; (c) et (d) recouvrement des phases développement des bourgeons floraux, développement et grossissement des fruits et maturation des fruits.



Figure 4: Bourgeon floral (a) et végétatif (b) du cactus opuntia. Ils se distinguent par leur forme qui est sphérique chez le bourgeon floral et aplatie chez le végétatif.

L'étude de la phénologie de la floraison et de la fructification de 14 accessions d'une jeune plantation de cactus (âgée de deux ans) dans la même région a montré que les

bourgeons végétatifs et floraux ont commencé à apparaître durant la première semaine de mai chez la plupart des espèces (El Kharrassi et al., 2015). Le nombre de bourgeons végétatifs émis est très variable, allant de 0.25 à 12.35 par plante et celui des bourgeons floraux allant de 0.05 à 13.75 par plante. L'émission des pousses se déroule de février à juin et la période de floraison se situe entre la seconde semaine de mai et le début juin. Le nombre de cladodes formés varie de 1.75 à 7.75 par plante.

Sur le plan de la fertilisation (pollinisation, fécondation), la plupart des espèces d'opuntia sont auto-compatibles. Le nombre d'ovules dans une fleur varie de 222 à 310 et celui des grains de pollen est plus élevé que le nombre d'ovules. La pollinisation croisée entre variétés n'est pas obligatoire et l'intervention des insectes dans la pollinisation est importante dans la production de fruits de bonne qualité (Lo Verde et La Mantia, 2011). La figure 5 montre la structure d'une fleur des opuntias avec ses pièces florales et l'intervention des abeilles dans la pollinisation de ces fleurs.

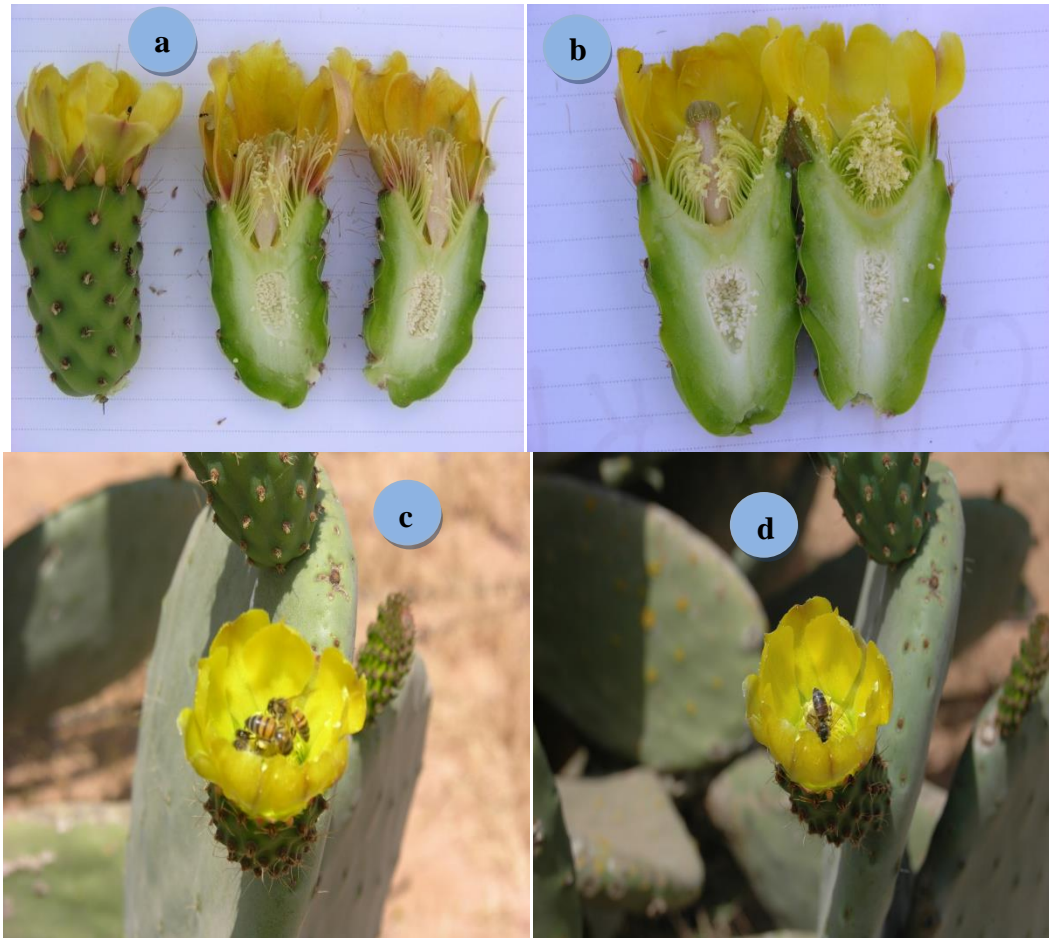


Figure 5: (a et b) Coupe longitudinale d'une fleur des opuntias qui montre la structure de la fleur et les pièces florales et (c et d) intervention des abeilles dans la pollinisation des opuntias.

Cota-Sanchez et al. (2013) ont rapporté que les conditions climatiques, notamment la température, l'ensoleillement et l'humidité de l'air ont un effet sur la phénologie de la floraison d'une espèce d'opuntia (*Opuntia polyacantha* Haw.). Elles peuvent avancer ou retarder d'une semaine la floraison de cette espèce. La longueur de la période de floraison de cette espèce est de trois semaines. La durée de l'ouverture des fleurs est courte, elle varie de 12 h au minimum à 30 h au maximum, en fonction principalement des conditions climatiques journalières. En général, les fleurs qui s'ouvrent au milieu de la matinée (10:30 am) restent ouvertes durant toute la journée pour se fermer à la fin de la soirée (figure 6); celles qui ne s'ouvrent qu'en fin d'après-midi se contractent lentement durant la soirée et s'ouvrent à nouveau pour une partie de la deuxième journée pour se fermer complètement au milieu de l'après-midi.



Figure 6: Fleurs en fanaison à la fin de la journée, après douze à vingt quatre heures d'ouverture.

L'aréole est une structure végétative distincte chez les cactus (figure 1), il est considéré comme un bourgeon axillaire latéral chez les plantes mésophytes. Des épines, glochides, fleurs, pousses et racines naissent à partir de ces aréoles. Les fleurs et les pousses apicales naissent sur des bourgeons axillaires appelés méristèmes aréolaires et un méristème aréolaire peut produire un bourgeon floral ou une jeune pousse. Chez la plupart des cactus, les fleurs naissent sur les méristèmes de l'année en cours ou sur ceux qui sont formés avant. Chez les opuntias, les fleurs naissent en grande partie sur les méristèmes aréolaires qui sont formés plus tôt car ce sont les cladodes d'un an qui sont les plus fertiles (Nobel, 2002). Et pour qu'ils puissent survivre, les opuntias doivent maintenir un équilibre entre la production de cladodes et celle des fleurs (Inglese et al., 2002). La plus grande partie des fleurs et des pousses est produite sur la partie supérieure des cladodes.

La relation qui existe entre la reproduction sexuée et la croissance végétative a suscité peu d'intérêt chez les cactus. Chez les cactus dressés qui fleurissent une fois par an (*Carnegiea gigantea* (Eng.) Britt. & Rose), la floraison se fait souvent un à deux mois avant l'émission des pousses. Chez les opuntias qui produisent des fleurs et des pousses plus ou moins simultanément, la compétition entre les fleurs et les pousses pour les ressources de la plante peuvent être intenses et le choix de produire une pousse au lieu d'une fleur est par défaut un choix de reporter la production de fleurs en faveur de la formation d'un grand nombre de méristèmes aréolaires l'année qui suit (Nobel, 2002).

La propagation des opuntias est une procédure simple car plusieurs espèces peuvent être propagées facilement par boutures ou par graines, naturellement ou avec l'intervention de l'Homme (Kelly, 2009). La propagation par semis n'est pas désirable à cause de l'hybridation génétique des graines qui donne des plants hétérozygotes et de la croissance des plants qui est très lente (entrée en production tardive). La multiplication végétative par boutures est la méthode de multiplication la plus utilisée chez les opuntias car elle est la plus facile à réaliser et permet de produire des plants qui sont identiques à la plante mère (Arba, 2009). La multiplication végétative est la capacité d'un plant d'opuntia à produire de nouvelles racines et de nouvelles pousses à partir des aréoles d'un cladode ou d'un morceau de cladode (Kelly, 2009).

Les boutures qui peuvent être utilisées sont des boutures composées (un cladode basal muni de 2 à 3 latéraux), des boutures simples formées d'un seul cladode ou des fragments de cladodes (Arba et Sbihi, 2013). Pour les deux derniers types de boutures, il est souhaitable d'utiliser les cladodes d'un an car ils s'enracinent mieux que les plus âgés du fait que ces derniers présentent un anneau sclérenchymatique qui constitue une barrière physique à l'émission des racines (Arba, 2009). La multiplication par boutures composées est la méthode la plus utilisée dans la région méditerranéenne car elle permet une entrée en production qui est plus précoce par rapport aux boutures de cladodes ou de fragments de cladodes et au semis (Arba et Sbihi, 2013). La meilleure période de plantation se situe entre les saisons d'automne et de printemps, selon les régions, et la meilleure période pour le prélèvement des boutures est également en automne, avant la saison des pluies ou au printemps, après la saison des pluies (Arba, 2009; Arba et Sbihi, 2013). La multiplication de morceaux de tissus par voie *in vitro* est possible (El Finti et al., 2013), mais c'est une technique en pratique coûteuse par rapport à la multiplication par boutures moins coûteuse et facile à réaliser.

Plusieurs auteurs ont rapporté l'effet bénéfique de l'eau que ce soit de pluie ou d'irrigation sur l'émission des bourgeons et des pousses chez le cactus (Mulas et D'hallewin, 1997; Inglese, 2010; Nerd & Mizrahi, 2010).

En Iran, dans la région d'Ilam, Ghasemi et al. (2013) ont étudié pendant deux années successives l'effet des traitements d'irrigation sur l'émission des pousses et le rendement en biomasse d'une jeune plantation d'*O. ficus-indica*. Les traitements d'irrigation utilisés sont: (i) témoin sans irrigation, (ii) irrigation des plantes une fois par semaine, (iii)

irrigation une fois tous les 15 jours et (iv) irrigation des plantes une fois par mois. L'application de l'irrigation a commencé à partir du mois de juillet de la première année. Les résultats obtenus ont montré que le traitement irrigation une fois par semaine a donné les meilleurs résultats en ce qui concerne l'émission des pousses et le rendement en biomasse. L'émission des pousses est de 16 pousses/plante chez le traitement irrigation une fois par semaine, il est suivi des traitements irrigation une fois par 15 jours et irrigation une fois par mois et le témoin non irrigué vient en dernière place. Le rendement en biomasse est de 65 t/ha chez le traitement irrigation une fois par semaine, 35 t/ha chez le traitement irrigation une fois tous les 15 jours, 16 t/ha chez le traitement irrigation une fois par mois et le traitement non irrigué vient en dernière place. Liguori et al. (2013) ont également rapporté que les plantes d'opuntia qui sont irriguées ont une absorption de CO₂ qui est plus élevée que celle des plantes non irriguées (40% de plus par plante).

Le fruit du cactus a une forme souvent ovale et allongée. Il est protégé par une écorce épaisse qui porte de fines épines barbelées appelés glochides. Il est principalement constitué d'une pulpe juteuse contenant un certain nombre de graines qui sont consommées avec le fruit (Jiminez-Aguilar et al., 2014; Roghelia et Panchal, 2016). La figure 7 illustre les caractères morphologiques des fruits des variétés de cactus opuntia au sud du Maroc et les différentes parties d'un fruit. La forme du fruit, sa taille et sa couleur (pourpre, rouge, orange, jaune, verte, blanche) peuvent varier d'une espèce ou variété à l'autre (Jiminez-Aguilar et al., 2014; Beyene et Haile, 2015). La figure 8 montre des variétés de fruits de cactus avec différentes couleurs dans la région sud du Maroc. Les fruits et les jeunes cladodes du cactus peuvent être consommés à l'état frais ou sous forme de différents produits alimentaires (Chenna Kesava et al., 2014; Beyene et Haile, 2015; Roghelia et Panchal, 2016). Le poids du fruit est de 48 à 251g (El-Guizani et al., 2012; Jiménez-Aguilar et al., 2013), la pulpe représente 28 à 58% du fruit, l'écorce 37 à 67% et les graines 2 à 10% (Jiménez-Aguilar et al., 2013). Les fruits contiennent 81 à 90% d'eau, une part importante de vitamines (vitamine C) et de minéraux (Ca, K et Mg), des composés phénoliques, des bétalaïnes (hétérosides dont une partie de la molécule est liée à un sucre) et des fibres digestibles. Ils ont un pouvoir antioxydant élevé (Chenna Kesava et al., 2014; Jiminez-Aguilar et al., 2014; Roghelia et Panchal, 2016). Cette composition est généralement considérée comme contribuant à la bonne santé de l'Homme (Chenna Kesava et al., 2014). Le pH du jus des fruits varie de 4,2 à

6,5, selon l'espèce ou variété et le stade de maturation des fruits (El-Guizani et al., 2012).

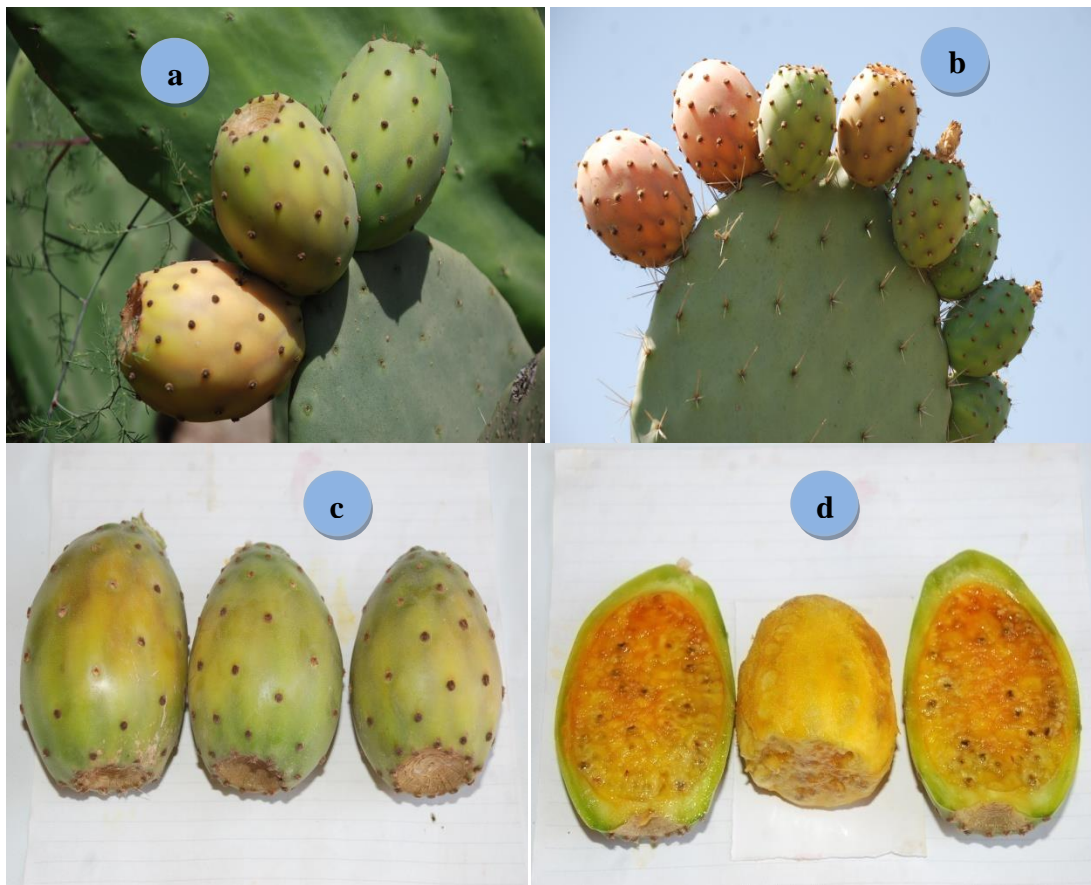


Figure 7: Fruits du cactus *Opuntia ficus-indica* à maturité: forme ovale (a, b et c), protégé avec une écorce épaisse contenant des épines fines (glochides) sur des aréoles (c), fruit contenant une pulpe juteuse qui contient des graines (d).

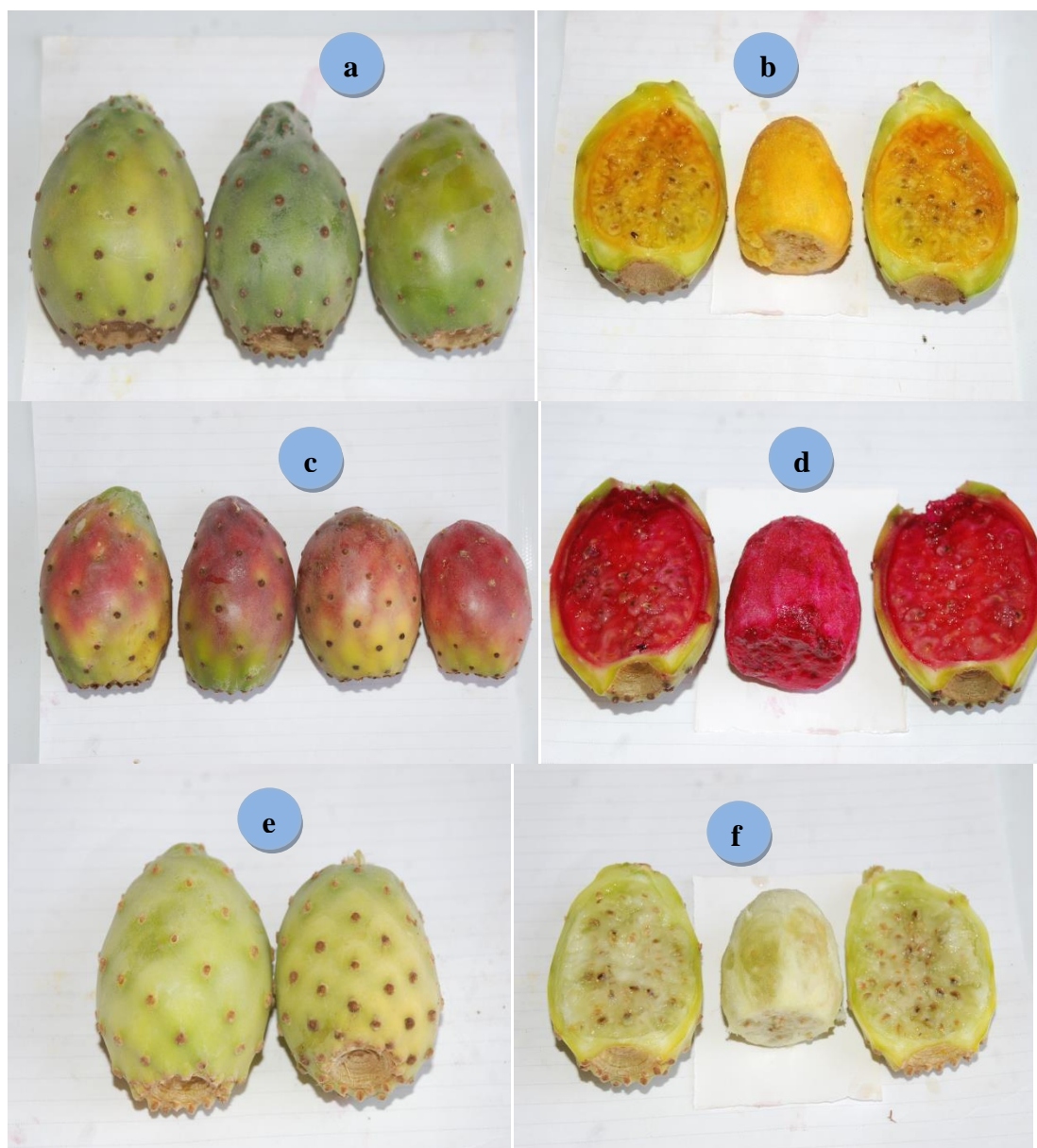


Figure 8: Variétés de fruits du figuier de Barbarie *Opuntia ficus-indica* avec différentes couleurs au Maroc: (a et b) variété 'Moussa' (écorce vert jaunâtre et pulpe jaune orangé); (c et d) variété 'El Akria' (écorce vert rougeâtre et pulpe rouge pourpre); (e et f) variété 'El Bayda' (écorce verdâtre et pulpe vert blanchâtre).

Les critères recommandés pour la commercialisation des fruits du cactus sont les suivants: le poids de 120 à 160 g est considéré comme calibre de première classe et le poids qui est supérieur à 160 g est un calibre extra; le poids de la pulpe ne doit pas descendre en-deçà de 55% du poids total du fruit; le degré Brix doit être supérieur à 13; le contenu en graines doit être inférieur à 3,5 g par 100 g de pulpe; l'épaisseur de l'écorce ne peut pas dépasser 6 mm, et la durée de conservation en post récolte doit

dépasser 4 semaines à 2 °C (De Wit et al., 2010). Ces critères sont applicables pour les fruits à commercialiser sur le marché international.

El Kharrassi et al (2016), qui ont étudié les caractéristiques des fruits et du jus de 30 accessions d'opuntia cultivées dans différentes régions du Maroc (23 accessions d'*O. ficus-indica* et 7 d'*O. megacantha* Salm-Dyck), ont montré que la longueur du fruit (6-8,4 cm) et le poids du fruit (53-103 g) et de la pulpe (31-43 g) sont significativement différents entre espèces et entre accessions au sein de chaque espèce. Il y a également des différences significatives entre accessions en ce qui concerne la plupart des caractères physico-chimiques des fruits: pH 3,3 à 4,8; °Brix 6,2 à 12,6; acidité titrable 0,14 à 0,88; acide ascorbique 11,1 à 29,2 mg/l. Dehbi et al. (2014) ont également trouvé que les propriétés pomologiques et physico-chimiques des fruits des opuntias qu'ils ont étudiés et qu'ils ont récoltés dans 9 régions et localités du Maroc diffèrent significativement d'une région à l'autre. Le poids des fruits varie de 68 à 113 g, leur longueur varie de 6,5 à 8 cm et leur diamètre varie de 4,5 à 5,5 cm. Leur taux en jus varie de 89,13 à 91,18%, le degré Brix de 11,33 à 15,77, le pH varie de 5,25 à 5,95 et l'acidité de 0,046 à 0,098%. Pour ce qui est du calibre des fruits, les meilleures régions sont celles qui ont une pluviométrie annuelle élevée (400 à 500 mm) (régions de Chaouia et de Doukkala) et pour ce qui est de la saveur et du taux en sucre, la région sud à proximité de la mer, notamment la région d'Aït Baâmrane à Sidi Ifni, est la meilleure. Roghelia et Panchal (2016), qui ont étudié les paramètres physico-chimiques des fruits du cactus dans trois localités de la région de Gujarat en Inde, ont également montré que le cactus dans la localité de Rajkot produit des fruits de plus grand calibre, plus acides, avec un contenu plus élevé en vitamine C et en certains minéraux (calcium et magnésium) que dans deux autres localités de l'étude (Junagadh et Anjar). Ils ont attribué cela à la différence des conditions de l'environnement entre les trois localités, notamment les températures qui sont plus clémentes à Rajkot (température moyenne de 27°C) et les précipitations annuelles qui sont importantes (652 mm). Albano et al. (2015) et Chalak et al. (2014) ont également rapporté des valeurs similaires pour certains contenus des fruits. Par contre, Bouzoubaâ et al. (2014, 2016) ont étudié la phytochimie de la pulpe de deux variétés de cactus dans deux sites au sud du Maroc et ont montré qu'il n'y avait pas de différence significative entre variétés dans le contenu des fruits en antioxydants, que ce soit au sein d'une même région ou entre régions pour une même variété. L'acidité titrable variait de 0,054 à 0,058% et le degré Brix de 13,15 à 15,87.

Quelques autres sources bibliographiques sont rapportées dans le chapitre 5 constitué d'un article concernant l'effet de l'irrigation sur la phénologie de la floraison et de la fructification du cactus opuntia.

II. EFFETS DE L'IRRIGATION SUR LE RENDEMENT ET SUR LA QUALITE DES FRUITS

Plusieurs auteurs ont montré que les précipitations ou les apports d'eau par irrigation durant la période de développement des fruits entraînent une augmentation dans le rendement de la production et le calibre des fruits (poids et dimensions) (Van Der Merwe *et al.*, 1997; Felker *et al.*, 2002; Barbara, 2007) et d'autres (Mulas et D'hallewin, 1997; Gugliuzza *et al.*, 2002) ont indiqué que l'irrigation du cactus en cette période augmente le rendement, mais n'a pas d'effet significatif sur le calibre des fruits ou sur leurs propriétés organoleptiques.

Dans la région de Zacatecas au Mexique, Varela-Gamez *et al.* (2014) ont étudié l'effet de l'irrigation sur le rendement et la qualité des fruits d'une plantation adulte (âgée de 7 ans) de deux variétés d'*Opuntia ficus-indica* ('Cristalina' et 'Amarilla Olorosa') qui est espacée de 4 m sur 3. Les traitements d'irrigation utilisés ont été: (i) témoin non irrigué T0, (ii) irrigation des plantes lorsque le contenu du sol en eau était inférieur à 50% (T50) et (iii) irrigation des plantes avec 100% d'évapotranspiration de la culture (T100). Le système d'irrigation utilisé était le goutte à goutte, l'irrigation a été appliquée durant la saison de croissance des plantes et la dose d'eau apportée par traitement d'irrigation a été de 0 mm pour le témoin (T0), 146 mm pour le traitement T50 et 331 mm pour T100. Les résultats obtenus ont montré que l'irrigation a un effet positif sur la production et la qualité des fruits. Le nombre moyen de fruits produit par plante chez les deux variétés est plus élevé pour les traitements irrigués; sur la variété 'Cristalina', il est de 215 fruits par plante pour T50 et 180 pour T100 vs 156 pour T0; sur 'Amarilla Olorosa', le nombre de fruits par plante est de 157 pour T50 et 143 pour T100 vs 115 pour T0). Le poids moyen des fruits est également plus élevé pour les traitements irrigués des deux variétés; pour 'Cristalina', il est de 186 g pour T100 et 162 g pour T50 vs 139 g pour T0; chez la variété 'Amarilla Olorosa', le poids moyen des fruits est de 117 g pour T100 et 107 g pour T50 contre 76 g pour T0. Le contenu des fruits en solides solubles totaux (SST) a été peu influencé par les traitements d'irrigation.

Quelques autres sources bibliographiques sont rapportées dans le chapitre 6 constitué d'un article concernant l'effet de l'irrigation à des périodes critiques sur le rendement et la qualité des fruits du cactus *opuntia*.

III. EFFETS DE LA FERTILISATION SUR LE RENDEMENT ET SUR LA QUALITE DES FRUITS

Au Mexique, Jorge Zegbe et al. (2014) ont étudié l'effet de la fertilisation minérale NPK sur la production en fruits d'une jeune plantation (âgée de trois ans) d'*O. ficus-indica* variété 'Cristalina' installée avec des espacements de 4 m sur 3. Les doses de fertilisation utilisées étaient: 0, 30, 60 et 90 kg N/ha; 0, 30, 45 et 60 kg P₂O₅/ha; 0, 30 et 60 kg K₂O/ha et les traitements de fertilisation utilisés sont (en kg N-P₂O₅-K₂O par ha): (1) 0N-0P₂O₅-0K₂O (témoin sans fertilisation), (2) 0N-30P₂O₅-30K₂O, (3) 30N-30P₂O₅-30K₂O, (4) 60N-30P₂O₅-30K₂O, (5) 90N-30P₂O₅-30K₂O, (6) 60N-45P₂O₅-30K₂O, (7) 60N-60P₂O₅-30K₂O, (8) 60N-30P₂O₅-0K₂O, (9) 60N-30P₂O₅-60K₂O et (10) 90N-60P₂O₅-60K₂O. Les résultats obtenus ont montré que le traitement (5) (90N-30P₂O₅-30K₂O) a donné le meilleur rendement avec 21 t/ha. Il est suivi du traitement (10) 90N-60P₂O₅-60K₂O avec 18 t/ha et du traitement (8) 60N-30P₂O₅-0K₂O avec 17 t/ha. Les traitements qui ne sont pas fertilisés en N ont donné les plus faibles rendements avec 6 t/ha pour le témoin non fertilisé et 7 t/ha pour le traitement (2) 0N-30P₂O₅-30K₂O. Les traitements de fertilisation utilisés n'ont pas eu d'effet sur la qualité des fruits et l'application d'une fertilisation n'apportant que la potasse n'a pas eu d'effet sur le rendement de la production.

Dans la région de Bahia au Brésil, Da Silva et al. (2016) ont appliqué une fertilisation minérale NPK sur une jeune plantation d'*opuntia* pour voir son effet sur la croissance des plantes et la productivité du cactus sous trois densités de plantation. Les traitements de fertilisation utilisés en kg N-P₂O₅- K₂O par hectare ont été: (i) 0N-0P₂O₅-0K₂O, (ii) 0N-150P₂O₅-0K₂O, (iii) 200N-150P₂O₅-0K₂O et (iv) 200N-150P₂O₅-100K₂O; les densités de plantation utilisées étaient: (a) 1 x 0.50 m, (b) 2 x 0.25 m et (c) 3 x 1 x 0.25 m. La croissance des plantes a été évaluée durant la période du 3^{ème} mois après plantation jusqu'au 13^{ème} mois; le nombre de cladodes formés et la productivité en biomasse ont été évalués 20 mois après plantation. La pluviométrie annuelle de la zone des essais a été de 665 mm et la température moyenne de 26 °C. Les résultats obtenus ont montré qu'il y a une interaction significative entre la fertilisation et la densité de plantation en ce qui concerne le nombre de cladodes formés et la productivité du cactus en biomasse. La

densité de plantation a un effet sur la surface des cladodes, alors que la fertilisation a une influence sur la croissance des plantes, l'émission des pousses et la surface des cladodes. Le nombre de cladodes formés par plante a varié entre 7 et 10 chez les traitements NPK et NP des trois densités de plantation, alors qu'il n'a pas dépassé 7 chez le traitement non fertilisé des trois densités. La productivité en biomasse fraîche a été de 200 à 300 kg/ha pour les traitements fertilisés NPK et NP des trois densités de plantation et de 132 à 200 kg/ha pour les traitements non fertilisés de ces densités. Les meilleurs résultats de formation des cladodes et de productivité en biomasse ont été obtenus avec les fertilisations NPK et NP et avec la densité de plantation 1 x 0.5 m.

Dans la région semi-aride de Rayalaseema en Inde, Chenna Kesava et al. (2014) ont conduit une expérimentation au champ sur trois années successives pour évaluer l'aptitude de cette région à la culture du cactus pour la production de fruits (pour l'industrie alimentaire) et de biomasse (pour l'alimentation du bétail). Les paramètres étudiés ont été la densité de plantation et la fertilisation organique et minérale. Les densités de plantation utilisées étaient (i) 1 x 0,5 m (20000 plants/ha), (ii) 1 x 0,75 m (13333 plants/ha) et (iii) 1 x 1 m (10000 plants/ha) et les traitements de fertilisation utilisés ont été (en kg de fertilisants minéraux et en t de fumier à l'hectare) (a) contrôle sans fertilisation, (b) 20t de fumier, (c) 50N-30P₂O₅-40K₂O + 20t de fumier/ha, (d) 55N-35P₂O₅-45K₂O + 20t de fumier/ha et (e) 60N-40P₂O₅-50K₂O + 20t de fumier/ha. Les résultats obtenus ont montré que pour le rendement en fruits, l'espacement 1 x 0,5 m a donné le meilleur résultat, avec 3,54 t/ha contre 3,12 et 2,69 t/ha respectivement pour les espacements 1 x 0,75 m et 1 x 1 m. Le rendement des plantes qui ont reçu une fumure organique et minérale a été significativement plus élevé (3,23-3,85 t/ha) que celui des plantes qui n'ont reçu qu'une fumure organique (2,83 t/ha) et ce dernier est plus élevé que celui des plantes non fertilisées (2,19 t/ha). L'interaction espacement x fertilisation était significative et les traitements qui ont une densité de plantation de 1 x 0,5 m et une fertilisation qui apporte une fumure organique et minérale ont donné le meilleur rendement (3,28-4,48 t/ha) par rapport aux traitements qui ont une densité de plantation de 1 x 0,75 ou 1 x 1 m (2,49-3,57 t/ha) et qui n'ont pas reçu une fertilisation ou qui n'ont reçu qu'une fumure organique. Pour ce qui est des caractères physico-chimiques des fruits, les contenus des fruits en solides solubles totaux, en acidité titrable et en acide ascorbique sont significativement plus élevés pour les espacements 1 x 1 m et 1 x 0,75 m (15,7 et 14,8 °Brix; 0,12 et 0,11% d'acidité titrable et 33,2 et 31,2 mg/100g de pulpe

d'acide ascorbique respectivement pour les deux espacements) que pour l'espacement 1 x 0,5 m (14,4 °Brix; 0,09% d'acidité titrable et 27,4 mg /100 g de pulpe d'acide ascorbique). De même, les contenus des fruits en ces éléments chez les plantes qui sont fertilisées en fumure organique et minérale (14,4 à 15,5 °Brix; 0,07 à 0,13% d'acidité titrable et 26,7 à 35,7 mg/100 g de pulpe d'acide ascorbique) sont plus élevés que ceux des plantes qui sont fertilisées uniquement en fumure organique (14,4 °Brix; 0,07% d'acidité et 26,7 mg/100 g de pulpe d'acide ascorbique) et ces derniers sont plus élevés que chez les plantes non fertilisées (13,9 °Brix; 0,05% d'acidité titrable et 22,0 mg/100g de pulpe d'acide ascorbique). Les contenus des fruits en solides solubles totaux, en acidité titrable et en acide ascorbique augmentent avec l'apport de fertilisation minérale et diminuent avec la densité de plantation.

Quelques autres sources bibliographiques sont rapportées dans le chapitre 7 constitué d'un article concernant l'effet de la fertilisation minérale azoto phosphorique sur le rendement et la qualité des fruits du figuier de Barbarie O. ficus-indica.

Références

- Albano C, Negro C, Tommasi N, Gerardi C, Mita G, Miceli A, De Bellis L et Blando F 2015. Betalains, phenols and antioxidant capacity in cactus pear [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.] fruits from Apulia (South Italy) genotypes. *Antioxidants*, 4(2), 269-280.
- Arba M 2009. Rooting of one year and second year old cladodes of cactus pear. *Acta Horticulturae*, 811, 303-307.
- Arba M et Sbihi H 2013. Rooting of cuttings and pads fragments of cactus pear. *Acta Horticulturae*, 995, 181-187.
- Barbara KM 2007. Characterization of cactus pear germplasm in South Africa. A thesis of Philosophiae Doctor. Faculty of Natural and Agricultural Sciences, University of the Free State, South Africa.
- Beyene HD et Haile RG 2015. Agro-industrial use of cactus, a review. *Food Science and Quality Management*, 39, 26-30.
- Bouzoubaâ Z, Essoukrati Y, Tahrouch S, Hatimi A, Gharby S et Harhar H 2014. Physico-chemical study of two varieties of prickly pear ('Achefri' and 'Amouslem') of southern Morocco. *Les Technologies de Laboratoire*, 8 (34), 137-144.
- Bouzoubaa Z, Essoukrati Y, Tahrouch S, Hatimi A, Gharby S et Harhar H 2016. Phytochemical study of prickly pear from southern Morocco. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 15, 155-161.
- Chalak L, Younes J, Roupheal S et Hamadeh B. 2014. Morphological characterization of prickly pears (*Opuntia ficus indica* (L.) Mill.) Cultivated in Lebanon. *International Journal of Science Research*, 3(6), 2541-2553.

- Chenna Kesava RS, Sucharitha KV, Venkata Ramana DK, Raveendra RM et Syamala B 2014. Medicated prickly pear (*Opuntia ficus indica*)-the new emerging agricultural crop in arid and semi-arid regions of India. *International Journal of Applied Biology and Pharmaceutical Technology*, 5(4), 264-270.
- Cota-Sánchez JH, Almeida OJG, Falconer DJ, Choi HJ et Bevan L 2013. Intriguing thigmonastic (sensitive) stamens in the plains prickly pear *Opuntia polyacantha* (Cactaceae). *Flora*, 208, 381-389.
- Da Silva JA, Donato SLR, Donato PER, Souza ES, Júnior MCP et Junior AAS 2016. Yield and vegetative growth of cactus pear at different spacings and under chemical fertilization. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(6), 564-569.
- De Wit M, Nel P, Osthooff G et Labuschagne MT 2010. The effect of variety and location on cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) fruit quality. *Plant Foods for Human Nutrition* 65(2), 136-145.
- El Finti A, El boulaini R, Ait Aabad N, Msanda F, Serghini MA et El Mousadik A 2013. In vitro propagation of three Moroccan pricklypear cactus *Opuntia* and plant establishment in soil. *Natulae Scientia Biologicae*, 5(1), 39-44.
- El-Guizani T, Tlili N et Triki S 2012. Fruit characteristics and chemical proprieties of juice and seeds of three *Opuntia ficus-indica* cultivars. *African Journal of Biotechnology*, 11, 1460-1464.
- El Kharrassi Y, Mazri MA, Benyahia H, Benaouda H, Nasser B et El Mzouri E 2016. Fruit and juice characteristics of 30 accessions of two cactus pear species (*Opuntia ficus-indica* and *Opuntia megacantha*) from different regions of Morocco. *Food Science and Technology*, 65, 610-617.
- El Kharrassi Y, Sedra MH, Mazri MA, El Mzouri EH et Nasser B 2015. Genetic diversity of the cactus pear (*Opuntia spp*) in Morocco as revealed by morphological descriptors and molecular markers. 4th International conference on agriculture and horticulture. Beijing, China, 13-15 July 2015.
- Felker P, Soulier C, Leguizamon G et Ochoa J 2002. A comparison of the fruit parameters of 12 *Opuntia* clones grown in Argentina and the United States. *Journal of Arid Environments*, 52, 361-370.
- Ghasemi S, Ramezani M, Mirmiran SM 2013. The effect of various water application strategies on cladode development of *Opuntia ficus-indica*. *Journal of Agriculture and Food Technology*, 3(7), 1-4.
- Gugliuzza G, Inglese P et Farina V 2002. Relationship between fruit thinning and irrigation on determining fruit quality of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) fruits. *Acta Horticulturae*, 581, 205-209.
- Guttermann Y 1995. Environmental factors affecting flowering and fruit development of *Opuntia ficus-indica* cuttings during the three weeks before planting. *Israel Journal of Plant Science*, 43, 151-157.
- Inglese P 2010. Cactus pear *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. for fruit production: An overview. *FAO Cactusnet Newsletter special issue*.
- Inglese P, Liguori G et De La Barrera E 2017. Ecophysiology and reproductive biology of cultivated cacti. In: *FAO & ICARDA (eds.): Crop ecology, cultivation and uses of cactus pear*. Rome, Italy. p. 30-41.
- Inglese P, Basile F et Schirra M 2002. Cactus pear fruit production. In: *Nobel PS (ed.). Cacti: Biology and uses*. University of California Press, p. 163-183.
- Jiménez-Aguilar D, López-Martínez J, Hernández-Brenes C, Gutiérrez-Urbe J et Welti-Chanes J 2013. Phytochemical compounds and antioxidant activity of commercial varieties of prickly pear (*Opuntia ficus-indica*). Manuscript in preparation.
- Jiménez-Aguilar DM, Mújica-Paz H et Welti-Chanes J 2014. Phytochemical characterization of prickly pear (*Opuntia spp.*) and of its nutritional and functional properties: A review. *Current Nutrition & Food Science*, 10, 57-69.

- Jorge Zegbe A, Sánchez-Toledano BI, Serna-Pérez A et Mena-Covarrubias J 2014. Economic analysis of the application of mineral fertilizers on the yield of prickly pear. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(3), 449-461.
- Kelly J 2009. How to propagate agaves and cacti from cuttings and seeds. University of Arizona, College of agriculture and life sciences, 4p.
- Liguori G, Inglese G, Pernice F, Sortino G et Inglese P 2013. CO₂ uptake of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. whole trees and single cladodes, in relation to plant water status and cladode age. *Italian Journal of Agronomy*, 8(3), 14-20.
- Lo Verde G et La Mantia T 2011. The role of native flower visitors in pollinating *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill., naturalized in Sicily. *Acta Oecologica*, 37, 413-417.
- Mabrouk A, Abbas Y, Fakiri M, Benchekroun M, El Kharrassi Y, El Antry-Tazi S et El Mzouri E 2016. Phenological characterization among Moroccan ecotypes of cactus (*Opuntia* spp.) under soil and climatic conditions of the Chaouia-Ouardigha region. *Journal of Materials and Environmental Science*, 7(4), 1396-1405.
- Mulas M et D'hallewin G 1997. Fruit quality of four cactus pear (*Opuntia ficus-indica* Mill.) cultivars as influenced by irrigation. *Acta Horticulturae*, 438, 115-122.
- Nerd A et Mizrahi Y 2010. Reproductive biology of cactus fruit crops. *Horticultural Review*, 18, 321-346.
- Nerd A, Mesika R et Mizrahi Y 1993. Effect of N fertilizer on autumn floral flush and cladode N in prickly pear *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. *Journal of Horticultural Sciences*, 68, 545-550.
- Nobel PS 2002. *Cacti: Biology and uses*. University of California Press.
- Nobel PS et Castaneda M 1998. Seasonal, light, and temperature influences on organ initiation for unrooted cladodes of the prickly pear cactus *Opuntia ficus-indica*. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 123(1), 47-51.
- Prat L, Franck N et Sudzuki F 2017. Morphology and anatomy of Platyopuntiae. In: *FAO & ICARDA (eds.): Crop ecology, cultivation and uses of cactus pear*. Rome, Italy. p. 22-28.
- Roghelia V et Panchal J 2016. Physicochemical characteristics of cactus pear fruits. *Journal of Pharmaceutical, Chemical and Biological Sciences*, 4(1), 119-125.
- Sinon Gene Albrigo L et Galan Sauco V 2004. Flower bud induction, flowering and fruit-set of some tropical and subtropical fruit tree crops with special reference to citrus. *Acta Horticulturae*, 632, 81-90.
- USDA 2014. Field guide for managing prickly pear in the Southwest. Forest service, Southwest region, 7p.
- Valdez-Cepeda RD, Méndez-Gallegos SJ, Magallanes-Quintanar R, Ojeda-Barrios DL et Blanco-Macías F 2014. Fruit yield per cladode depends on its physical attributes in *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. variety 'rojo pelón'. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 20(2), 131-146.
- Van Der Merwe LL, Wessels AB et Ferreira DI 1997. Supplementary irrigation for spineless cactus pear. *Acta Horticulturae*, 438, 77-82.
- Varela-Gámez Y, Caldera-Arellano AN, Jorge Zegbe A, Serna-Pérez A et Mena-Covarrubias J 2014. Irrigation in nopal influences the storage and packaging of tuna. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(8), 1377-1390.



Chapitre 3

Matériels et méthodes



Les essais ont eu lieu au cours de deux années, soit de février 2011 à octobre 2012 dans un verger d'opuntia installé en 1998 à la ferme expérimentale du Complexe Horticole d'Agadir. La ferme est située à 17 km au sud est d'Agadir à une altitude de 32 m, latitude 30° 36' nord et longitude 9° 36' Est. Le site de l'étude est caractérisé par un sol de type sablo-limoneux et par un climat aride avec une pluviométrie moyenne annuelle de 250 mm, des températures mensuelles moyennes qui varient de 8°C environ en janvier à 31°C en juillet, et des températures maximales journalières qui peuvent atteindre 45°C entre juin et août. Les essais d'irrigation et de fertilisation ont été installés sur des variétés représentatives de ce qui est cultivé au Maroc, notamment les variétés inermes 'Aissa' et 'Moussa' d'*O. ficus-indica* et la variété 'Achefri' d'*O. megacantha*. Ces variétés sont parmi les plus cultivées au Maroc et elles sont les plus cultivées dans la région sud. La densité de plantation du verger a été de 3m x 1m.

Dans ce verger, en début d'expérimentation, nous avons installé un système d'irrigation en goutte à goutte pour les apports d'eau d'irrigation et pour les apports des fertilisants sous forme de solutions aqueuses (figure 1). Ce système d'irrigation localisée a permis d'une part de bien utiliser la ressource en eau limitée mais également et surtout de bien piloter les essais, c'est-à-dire de maîtriser le timing et les doses d'irrigation et de fertigation.

Les fertilisants ont été injectés sous forme soluble dans le système d'irrigation goutte à goutte et toutes les parcelles de l'essai fertilisation ont reçu une même irrigation durant les périodes d'apport des fertilisants.



Figure 1: Système d'irrigation au goutte à goutte installé dans la parcelle des essais, avec une station de tête pour l'incorporation des engrais solubles dans l'eau d'irrigation et des vannes d'ouverture et de fermeture d'eau au niveau des lignes de plantation.

Le suivi des phases phénologiques a été assuré par des observations depuis l'émission des bourgeons végétatifs et floraux en février-mars jusqu'à la maturation des derniers fruits en fin septembre, en passant par l'émission des pousses et la floraison. Les observations ont été effectuées avec une cadence d'environ une semaine à dix jours, elles ont commencé en mars en première année et en février la deuxième année (soit à des dates qui permettaient de suivre l'émission des bourgeons) et elles se sont terminées en fin de cycle, en septembre, par le dénombrement des derniers fruits ayant atteint la maturité au cours de la semaine précédente. Le suivi de la phénologie des plantes a le plus souvent été réalisé sur un échantillon de 40 cladodes par variété et par traitement de fertilisation ou d'irrigation (10 cladodes par parcelle et par bloc: 10 x 4 répétitions). Les cladodes âgés d'une année étaient bien identifiés, numérotés de 1 à 10 au feutre indélébile. Soit au total 200 cladodes pour l'essai fertilisation, et 10 cladodes par traitement d'irrigation (3 traitements) par variété (3 variétés également) et par bloc (4 blocs), soit un total de 360 cladodes pour l'essai irrigation. Ces dix cladodes étaient répartis sur cinq plantes. Deux cladodes par plante ont été marqués et numérotés de 1 à 10 en début de saison. Nous avons considéré comme date de début ou de fin d'une phase la date d'observation à laquelle le stade de début ou de fin de cette phase est atteint sur au moins un cladode d'une répétition d'un traitement. Par exemple pour un traitement d'irrigation, la phase de floraison débute lorsque dans une répétition, une fleur au moins est ouverte et la fin de floraison est la date où nous avons vu pour la dernière fois une fleur ouverte dans une répétition.

Nous avons considéré qu'un cycle de végétation annuel commençait après la maturation des derniers fruits du cycle précédent, ce qui dans les conditions locales correspond au 1^{er} octobre.

Dans chaque parcelle unitaire, les observations (par exemple date de première apparition d'un stade) et les dénombrements (par exemple nombre de fleurs) ont été effectués sur un échantillon de 10 cladodes âgés de un an.

Que ce soit pour les essais d'irrigation ou de fertilisation, le rendement en fruits a été déterminé sur la production de 8 plantes par traitement (2 plantes par traitement d'irrigation ou de fertilisation dans chacun des 4 blocs). L'évaluation de la qualité physique des fruits, notamment leurs calibres (poids et dimensions du fruit), a été réalisée sur place, au champ ou au laboratoire voisin du Complexe Horticole d'Agadir

sur un échantillon de 80 fruits par traitement et par variété (soit 20 fruits par bloc). La détermination des caractères chimiques et organoleptiques (taux en jus, degré Brix, acidité titrable, pH, sucres totaux) a été réalisée dans le laboratoire Qualité et sécurité des produits agro-alimentaires à la Faculté des Sciences agronomiques de Gembloux (actuellement Gembloux Agro-BioTech) sur des échantillons conservés en chambre froide et, pour le transport, en caisses réfrigérées.

Pour le détail concernant plus particulièrement chacune des expérimentations, on se reportera aux paragraphes Matériels et Méthodes dans les chapitres 4, 5, 6 et 7.

Nous n'avons pu suivre les essais au cours d'une troisième année car nous étions dans l'obligation de réaliser une taille sévère des plantes du fait qu'il était impossible de passer entre les lignes de plantation pour faire des observations et prélever les échantillons de fruits. Les plantations sont denses, les interlignes sont fermés et le passage entre les lignes de plantation est devenu pratiquement impossible à cause de l'étendue et de l'étalement des plantes sur les interlignes, d'autant plus que le problème des épines et des glochides se pose aussi avec force. Nous avons fait une dernière observation des plantes cette année (2017), entre les mois de février et avril, pour voir s'il n'y a pas de différences entre les plantes qui ont reçu du phosphore et celles qui ne l'ont pas reçu, étant donné que l'effet du phosphore est long à observer compte tenu de plusieurs raisons: adsorption dans le sol, absorption racinaire lente et translocation lente dans la plante surtout si la plante est âgée (8 à 10 ans et plus).

Chapitre 4

Biology, flowering and fruiting of the cactus *Opuntia* spp.: A review and some observations on three varieties in Morocco

Running title: Biology, Flowering and Fruiting of *Opuntia*

Ce travail a fait l'objet de la publication suivante:

Arba, M., Falisse, A., Choukr-Allah, R. and Sindic, M. 2017. Biology, flowering and fruiting of the cactus *Opuntia* spp.: A review and some observations on three varieties in Morocco. Article accepté pour publication à la revue internationale Brazilian Archives of Biology and Technology, vol. 60, p. 1-11. 2017.
<http://dx.doi.org/10.1590/1678-4324-2017160568>.

ABSTRACT

The cactus is a succulent plant resistant to droughts. According to the recently reviewed classification, cacti belong to the family of Opuntiaceae Desv. (synon. Cactaceae Juss.) with *Opuntia* Mill. as the typical genus. This genus is economically the most important in the family, as it includes a group of cactus pear plants which play an important role in the agricultural systems of arid and semi-arid regions. The timing of flowering is an important determinant of the fruit harvesting period. The goal of this paper is to present the physiology of the cactus pear and to explain in detail the biology of its flowering and fruiting processes. This study is also enriched by our observations on the flowering and fruiting of three varieties of cactus pear that we followed for two successive years in southern Morocco.

Key words: *Opuntia ficus-indica*, phenology, flowering, fruiting, cactus pear

INTRODUCTION

The prickly pears are xerophytic plants which, according to convention—which are currently under review—belong to the new family of Opuntiaceae Desv. (synon. Cactaceae Juss.). According to the authors this family is composed of 26–160 genera and 1,500–2,000 species native to North and South America, mainly Mexico [1] and the typical genus is *Opuntia* Mill. [2]. The Opuntiaceae Desv. family is composed of green plants that often possess succulent stems, and are characterized by the crassulacean acid metabolism (CAM). The prickly—or cactus—pear plants are included in the genus *Opuntia*, and are characterized by the presence of cladodes, which are a kind of jointed stems. Their leaves are often rudimentary and transitory, or absent and replaced by spines and barbed hairs (glochids) carried by areoles (axillary nodes). Flowers are born on the upper half of the cladode until more than 25 are born; most (90–95%) are transformed into fruits. Flowers are generally large and are born individually on the areoles. The perianth is formed by a chalice with petaloid sepals and a corolla with sepaloid petals. Stamens are numerous while the ovary is infer, containing 3–20 cyclic carpels [1].

In this family, the genus *Opuntia* Mill. is the most important economically as a great number of species that produce edible fruits, like as *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill., *O. megacantha* Salm-Dyck, *O. stricta* Haw., *O. dilennei* (Ker Gawl.) Haw., *O. schumannii* Weber, *O. robusta* Wendl. and *O. albicarpa* Scheinvar. All species producing edible fruits are also called by the vernacular name of “prickly pear tree”. Cactus pears—in particular *O. ficus-indica*, the true prickly pear tree—were introduced

to the Mediterranean basin at the end of the 15th century by Christopher Columbus, and then in North Africa one century later. Their distribution in the world was facilitated by the transport of fresh cladodes on European boats at the end of the 15th century [3,4]. The cultivation of cactus pears extended to the hot arid regions of the world due to their resistance to drought; now, *O. ficus-indica* is cultivated in more than 30 countries of both hemispheres, and in all continents except the Antarctic [4,5]. Mulas et al. [6] reported that the cultivation of cactus pear can be an alternative to cereal and forage crops in arid regions of the world. There is a large variety of prickly pear cacti from their hybridisation in nature, from the creation of new varieties through clonal selection, and through the exchange of cladodes between different regions and countries [7,8]. In many countries several varieties are cultivated, most notably so in the country of origin, Mexico. The total area occupied by the cactus pear is around 3 million hectares (ha) in Mexico, including more than 70,000 cultivated ha. The area of the prickly pear cactus in Brazil, also a great producer, is 900,000 ha with 600,000 cultivated ha [9]. Inglese [10] reported around 3,000 ha for commercial production in Italy, 25,000 ha in Tunisia and more than 1,000 ha in each of the countries Chile, Argentina and South Africa. In Morocco, the area occupied by cactus pears have evolved remarkably during the last two decades, reaching around 150,000 ha and continuous to grow within the framework of the Moroccan Green Plan.

The objectives of this article are to describe some biological aspects of the prickly pear cactus, mainly the ones related to flowering and fruiting process, and to report some personal observations on the phenology of flowering and fruiting of three varieties of cactus pear in Morocco.

THE BIOLOGY OF FLOWERING AND FRUITING IN CACTUS PEAR

PHYSIOLOGY OF THE PLANT

The prickly pears are drought-resistant plants that grow perfectly in the arid regions of the globe [11]. Their success in arid environments lies in their particular CAM [4,12]. These plants have also developed typical morphological adaptations (transformation of leaves to spines, protection of cladodes by an impermeable cuticle) and mechanisms that allow them to use water efficiently (absorption of water when it's available and efficient storage, reduction of transpiration, etc). In the Mediterranean, the production of flowers and shoots in cactus pears occurs in the spring, when climatic conditions are favorable—

i.e., when temperature and day length increase [4,8,13]. The threshold values can be at a temperature of 14 °C and day length of 12 hours.

Flowers are often emitted on one year old cladodes, whereas shoots are mainly emitted on two or more years old cladodes [7,8,13]. After the emission of floral buds, flowering takes place for about one month and is followed by the development of fruits. The plant is able to flower a second time during the same year if the environmental conditions are favorable (i.e. clement temperatures, frequent fogs or high hygrometry of the air) or through the use of advanced agriculture techniques (i.e. continuous irrigation and fertilization programs, or irrigation during the dry summer period [4,7,13,14]. This phenomenon is called “reflowering” and it presents a non-negligible interest to the farmers, with the timing of the production period and potential for reflowering and total annual production having large impacts on the income of farmers. Cactus pears need an average temperature of more than 10°C, a mild winter and a hot summer [4,10]. The plant starts producing fruits 2–3 years after plantation. Full production is obtained approximately 7 years after plantation, and fruit production can last 25–30 years or longer [7,8,13]. Fruit yields vary from 1–5 tons (t) per ha in traditional plantations and can reach 15–50 t/ha in modern plantations [5,10]. Mulas et al. [6] reported that fruit yield of 22 accessions in the Chaouia-Ouardigha central region of Morocco is medium or high (yield was not specified).

BIOLOGY OF FLOWERING

Flowers are sessile, large, often solitary and typically born on the upper part of the cladode. They are regular, composed of several sepals, yellow petals, and stamens, and only have a single pistil with a lobbed stigma at the apex. The stamens and pistil are often yellow or green. The average number of petals is 19 for *O. phaeacantha* Engelm. and 11 for *O. ficus-indica*, and they possess 258 and 240 stamens, respectively [7,13]. The ovary—located under the floral parts—is consisting of several fused carpels and numerous ovules with parietal placentation [4,7,8,13]. The number of ovules per ovary varies from 150–400 for *O. ficus-indica* and *O. robusta* Wendland, and that of the number of pollen grains per flower is about 160,000 [7,13].

In the Mediterranean Basin, flowers begin to open in the spring; it is followed by the development of fruits, which reach maturity during the summer period [7,8,13]. Mulas

[15] reported that the period of development of floral buds at 'Gialla' variety under natural conditions of Sardinia is located between April and July. Flowers of the prickly pears are commonly diurnal and anthesis begins early in the morning after sunrise. They typically remain open between 8–11 a.m. [7,13,14], but some flowers can remain open until the next day [7,13]. Full flowering occurs around midday, after which the perianth starts to close gradually until it is completely closed by the end of the day [7,8,13,14]. Floral bud emission of *O. ficus-indica* lasts 3–5 weeks [13,16] and two months in Selviria, Brazil [14]. However, this period can exceed 25 weeks in some species [13,16]. The timeframe which separates the floral bud development period and the opening of flowers is relatively short in the prickly pears, lasting only 30–50 days [13,14] while the development of floral buds alone, from their emission until anthesis, varies from 7–10 weeks in other species [8,13,16]. Flowering extends over a period of 48 days [14] to 100 days [7,8,13,15,17], with the peak of flowering corresponding to the period when 50% of flowers are open [14]. Cactus pear flowering is not synchronous: the phenologic phases overlap, with the start of floral bud formation starting well before the end of the emission of both vegetative and floral buds, and the maturation of fruits can also start little before the end of flowering [7,13,14]. As a consequence, the phases of flowering and fruit maturation are spread out over a period of several weeks [7,8,15].

Many authors define the phase of flowering as the period which extends from the beginning of flowering (5% of open flowers) until the end of flowering [7,18]. Barbara [19] determined the duration of a phenologic phase of flowering or fruiting as the period between the week when the first characteristics of each phase are visible on a specific variety of cactus (i.e. open flowers), until the last week they are visible on the same variety.

POLLINATION AND FRUITING

Hermaphrodite flowers are the most frequent on cactus pears [3,7], but cross-pollination occurs most often [7,13]. Bees are the major pollinators of the prickly pears. Factors favoring this pollination are the auto-incompatibility, the dichogamy (male and female organs do not mature at a same time in a flower), the herchogamy (separation in space between anthers and stigma) and the unisexuality of prickly pears. A stigma receives several grains of pollen but only about 30% of these grains germinate on the style. The germination of pollen grains and the development of pollen tubes in the style are made

relatively quickly, within 24–48 hours [13]. Very few flowers fail to form fruits, as 95% of formed cactus pear flowers can yield fruits [7,13], whereas fruit-bearing species like apple, avocado, mango and orange trees often have less than 10% of flowers transforming into fruits [13]. This could be partially due to the cactus pears water reservation techniques, where the reproductive organs can access stored reserves during the dry period [12].

THE FRUIT DEVELOPMENT PERIOD (FDP)

The FDP is defined as the period of time between the formation of floral buds (or reproductive bud break) and the maturation of fruits (or 50% of fruit ripening) [8]. Floral buds are formed when they reach a length of 4–5 mm; at this stage they become spherical and easy to distinguish from vegetative buds, which are punt-shaped. This is also the stage where the first signs of flower structure can be detected under a microscope [7,8,13,19].

There is a large variability in the FDP, which appears to be variety-specific [8,19]; it also varies between regions, as it depends on the climatic conditions of the cultivation medium [8,14]. The FDP for the majority of varieties studied in South Africa is 120–130 days; for plants which have an earlier emission of floral buds, the FDP is longer and can reach up to 148 days [8]. Other authors report the emission of floral buds varying from 96–122 days, with the maturation of fruit varying from day 66, or 80–90 days after flowering [8,14].

THE PHENOLOGY OF FLOWERING AND FRUITING OF THREE VARIETIES IN MOROCCO

The primary objective of this study was to follow the phenology of three varieties of *Opuntia* in the Agadir area: the spineless varieties “Aissa” and “Moussa” of *O. ficus-indica*, and the thorny variety “Achefri” of *O. megacantha*. In addition, we wanted to see whether the physiological stages and the phenological phases of the three varieties, mainly the phases of flowering and fruiting, occur at similar times, and to compare the period of these phases with those observed in other regions.

MATERIAL AND METHODS

To study the flowering and fruiting phenology of the cactus pear in Morocco, we followed the flowering and fruiting of three varieties for two successive years (2011–2012; Table 1). For each variety, we followed a sample of 10 one year old cladodes in each of the 4 rows of the plantation, and in 4 randomized plots considered as blocks of the repetitions. We adopted the method of Barbara [19] to determine the period of both the flowering and fruiting phases. We have chosen the method of Barbara [19] than other methods: Reyes-Aguero et al. [7], Chessa and Nieddu [18], because in the first one the FDP starts at the formation of floral buds, when fruit development is beginning in cactus pear because this development starts well before the formation of floral parts. However, the real start and end dates may differ from our observed sample dates, and this was indicated in the records.

Table 1: Observations realized during the two years of observations on the phenology of flowering and fruiting of 'Achefri', 'Aissa' and 'Moussa' in the Agadir area.

Phenologic phase	Realized observations	
	2011	2012
Emission of vegetative and floral buds and formation of floral buds	8 observations (03/03; 11/03; 21/03; 29/03; 05/04; 20/04; 10/05; 25/05)	7 observations (02/02; 17/02; 01/03; 15/03; 27/03; 11/04; 24/04)
Flowering	8 observations (03/03; 11/03; 21/03; 29/03; 05/04; 20/04; 10/05; 25/05)	6 observations (27/03; 11/04; 24/04; 09/05; 23/05; 10/06)
Fruiting	8 observations (18/06; 28/06; 12/07; 20/07; 31/07; 15/08; 01/09; 15/09)	7 observations (22/06; 04/07; 17/07; 01/08; 09/08; 17/08; 27/08)

RESULTS AND DISCUSSION

Vegetative and floral bud emission

Monitoring the flowering and fruiting phases made it possible to note that emission of vegetative and floral buds, and flowering of these varieties were important from March–May, the timeframe when temperatures were clement and day length increased (Table 2, 3). This is in agreement with findings on the cactus pears from the northern hemisphere [4,7,8,13]. During the first year of observations, the phase of the emission of vegetative and floral buds was 89 days long for spineless varieties and 76 days long for the thorny

variety. The duration of the bud emission phase exceeded what was reported by others by 21–60 days [13,14,16], but was shorter than the period indicated for *O. joconostle* Weber [16]. The period of time which separated the end of floral bud emission and the beginning of flowering varied from one variety to another, lasting 15–23 days in 2011 but 55–63 days in 2012.

Table 2: Duration of the phenologic phases of flowering and fruiting of 'Achefri', 'Aissa' and 'Moussa' during the first year of observations (2011) in the Agadir area.

Variety	Phenologic phase				
	Emission of vegetative and floral buds	Formation of floral buds	Flowering	Fruit maturation	FDP
Aissa	89 days \pm 4: 18 Feb–18 May	90 days \pm 5: 24 Feb–25 May	89 days \pm 7: 3 Mar–1 June	79 days \pm 6: 28 June–15 Sept	145 days \pm 6: 24 Feb–20 July
Moussa	89 days \pm 4: 18 Feb–18 May	90 days \pm 5: 24 Feb–25 May	81 days \pm 7: 11 Mar–1 June	72 days \pm 4: 28 June–8 Sept	156 days \pm 5: 24 Feb–31 July
Achefri	76 days \pm 4: 3 Mar–18 May	76 days \pm 4: 3 Mar–18 May	65 days \pm 7: 21 Mar–25 May	63 days \pm 4: 7 July–8 Sept	164 days \pm 5: 3 Mar–15 Aug

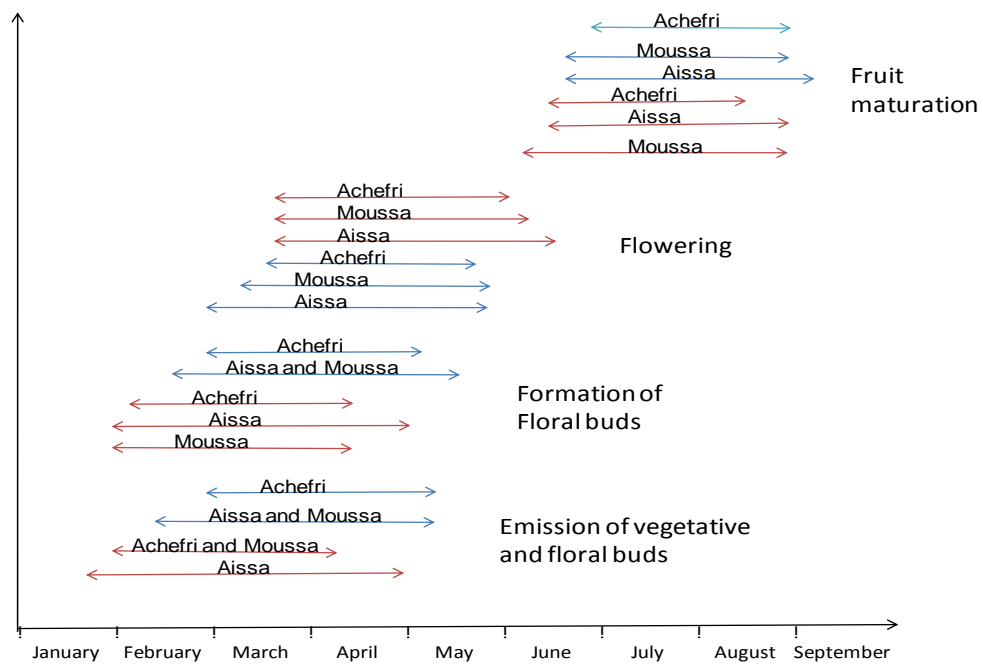
Table 3: Duration of the phenologic phases of flowering and fruiting of 'Achefri', 'Aissa' and 'Moussa' during the second year of observations (2012) in the Agadir area.

Variety	Phenologic phase				
	Emission of vegetative and floral buds	Formation of floral buds	Flowering	Fruit maturation	FDP
Aissa	98 days \pm 5: 24 Jan–2 May	98 days \pm 4: 2 Feb–9 May	85 days \pm 4: 27 Mar–20 June	76 days \pm 6: 22 June–6 Sept	180 days \pm 3: 2 Feb–1 Aug
Moussa	76 days \pm 7: 2 Feb–17 Apr	83 days \pm 5: 2 Feb–24 Apr	78 days \pm 3: 27 Mar–13 June	84 days \pm 5: 14 June–6 Sept	180 days \pm 3: 2 Feb–1 Aug
Achefri	76 days \pm 7: 2 Feb–17 Apr	76 days \pm 6: 10 Feb–24 Apr	70 days \pm 6: 27 Mar–6 June	61 days \pm 5: 22 June–22 Aug	172 days \pm 3: 10 Feb–1 Aug

During the second year of observations, the period of vegetative and floral bud emission, and flowering, were earlier compared to 2011 (Fig. 1). This was probably due to differences in climatic conditions, which were characterized by low rainfall from March–April and high temperatures from February–March in 2012 (Fig. 2). The emission of vegetative and floral buds began one month before the date of this emission in the first year; it started early in February (Fig. 1). The duration of the emission period

was 76–98 days long for the three varieties (Table 3). In another trial taking place in the same area, the duration of the vegetative and floral bud emission phase for 'Moussa' was 98 days long in 2011 and 80 days in 2012.

Over the two years of observation, the duration of vegetative and floral bud emission, along with floral bud formation, was 76–98 days long (Table 2, 3).



Legend: ←→ First year of observations
←→ Second year of observations

Figure 1: Phenologic phases of flowering and fruiting of 'Achefri', 'Aissa' and 'Moussa' during the two years of observations in the Agadir area.

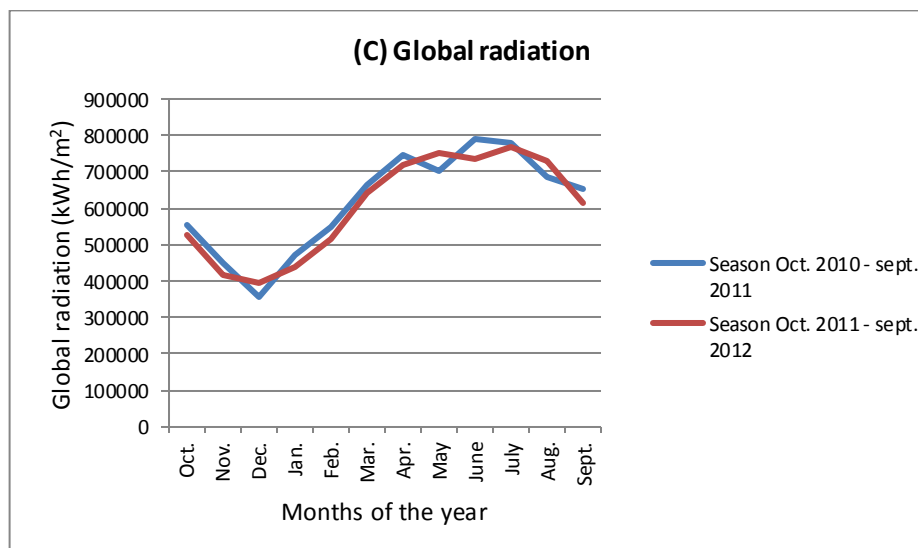
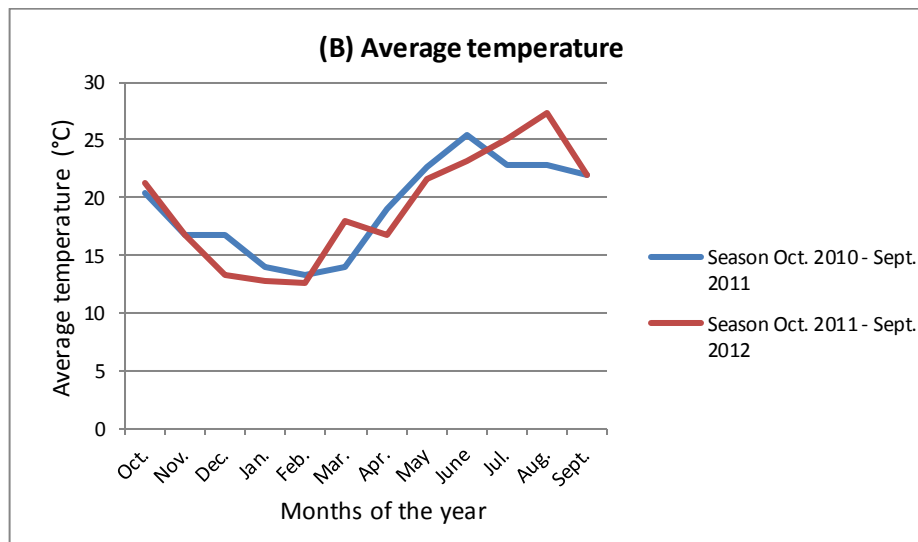
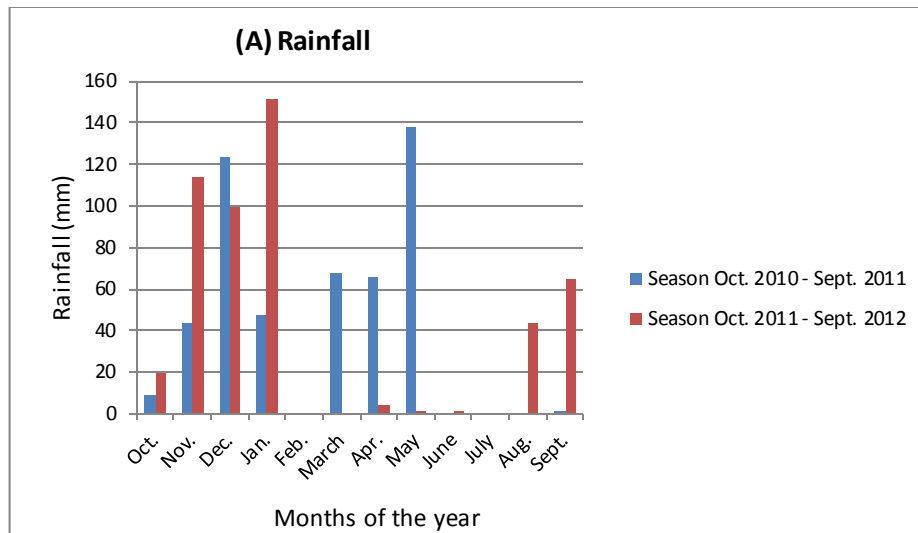


Figure 2: Climatic data of the experimental area during the two years of observations: (A): Rainfall; (B): Average temperature; and (C): Monthly sum of global radiation.

The phases of flowering and fruiting

In the first year of observations, the phase of flowering was longer (78–85 days) and later for the spineless varieties 'Aissa' and 'Moussa' than for the 'Achefri', and fruit maturation also occurred later for the spineless varieties compared to the 'Achefri' (Fig. 1). During the second year of observations, the period of flowering was 65 days for 'Achefri', 81 days for Moussa, and 89 days for 'Aissa'. Similar periods—ranging from two months to 100 days—are reported by other authors in some countries (Brazil, Italy, Mexico, South Africa) [8,13,14,15,17]. The period of fruit maturation is also little longer for 'Aissa' (79 days) and shorter at 'Achefri' (63 days). In another trial taking place in the same area, the flowering phase was 80 days in 2011 and 66 days in 2012 [20]. In the central zone of the country, the period of flowering of two varieties in Khouribga area (the spineless 'Mles' of *O. ficus-indica* and the thorny 'Draibina' of *O. megacantha*) was about 50 days long and extended from April 9th to May 29th [21]. In the same central zone, the ripening time of 22 accessions in the Chaouia-Ouardigha region could be early, late or medium-late [6]. This is an example of the phenological diversity between *Opuntia* varieties during different years and regions, as a result of genetic diversity and annual climatic conditions. Those, over the two years of our observations, there are differences between the duration of the phase of flowering and between varieties. The flowering phase is 65–70 days long for 'Achefri', 78–85 days long for 'Moussa', and 85–89 for 'Aissa'.

The period which separates the end of flower opening and the beginning of fruit maturation was 27–43 days long in 2011 and 1–16 days in 2012 (Table 2, 3). These periods were much shorter than previous reports of different *Opuntia* varieties, where the range was between 40–60 days [7,8,14]. The fruit maturation period of the three varieties during 2011 extended from the end of June to mid-September (Fig. 1). It was 63 days long for 'Achefri' (it extend from July 7th to September 8th); 72 days for 'Moussa' (it's located between June 28th and September 8th) and 79 days for 'Aissa' (from June 28th to September 15th) (Table 2). In 2012 (Table 3), the period of maturation was 61 days long for 'Achefri' (from July 7th to September 8th), 84 days for 'Moussa' (from June 14th to September 6th); and 76 days for 'Aissa' (from June 22nd to September 6th). The end of the fruit maturation period for all three varieties occurred between the 6th and the 15th of September for both years, but the end of harvest of an amount of fruits which can be the

object of marketing is located around the beginning of September. What represents a non-negligible lateness of about 15 days in the harvesting period in comparison to the end of the prickly pears season of production in Morocco which is located at mid-August; this provides evidence supporting the notion that different times are required for fruit maturation in different *Opuntia* species, which also varies between regions. For example, it extends from 80 days in Brazil [14] to several weeks in other countries [8]. In addition, Valdez-Cepeda et al. [22] showed that, even within a variety, variation in environmental conditions also affects the time required for fruit maturation.

The duration of the majority of the flowering and fruiting phases for the three varieties was shorter in the second year due to differences in the climatic conditions between both years. The second year was marked by low rainfall during spring (0 mm in March, 4.2 mm in April and 0.6 mm in May against 67.6; 65.6 and 137.8 mm in the 2011, respectively), low amounts of sunlight during the winter (about 439,000 kWh/m² in January 2012 and 518,000 kWh/m² in February, 2012 against 473,000 and 546,000 kWh/m² in January and February of 2011, respectively) and colder winters (12.8°C in January and 12.5°C in February against 13.9 and 13.2°C for 2011, respectively)

The FDP

The FDP also varies between varieties [8,19], regions—as a result of different environmental conditions [8,14]—and years. During the first year of observations, it was 156 days long for 'Moussa', 145 days for 'Aissa', and 164 days for 'Achefri'. During the second year, the FDP was longer—taking 180 days for spineless varieties and 172 days for the 'Achefri'. The FDP was lengthier in 2011 (Fig. 1), possibly due to the amount of rainfall in December (124 mm vs 99.4 mm for the first and second year, respectively) and January (47.2 vs 151.4 mm; Fig. 2). Arba et al. [20], who also recorded the 'Moussa's FDP in the same area noted that it lasted 152 days in 2011, and 188 days in 2012. However, Barbara [19] has noted that varieties which have an early emission of floral buds have a longer FDP, which is in line with what is reported here. This last author reported that for two seasons, the FDP of the majority of varieties in South Africa varied between 120–130 days, and that the FDP of varieties with longer FDP varies from 148 days during the first year to 162 days or more during the second year. Comparatively, the FDP of *O. ficus-indica* is for 96 days in Brazil [14] and about 122 days in Italy [8].

CONCLUSIONS

The periods of the emission of vegetative and floral buds, and flowering, typically occur in the spring but can be little earlier or later depending on the variety, the region of cultivation and climatic conditions of that year. Our observations on three varieties showed a diverse phenology of flowering and fruiting for the cactus pear, with the period between March and May being the most important for the emission of vegetative and floral buds and the flowering. In addition, our observations on the phenological phases of the cactus pear also reflect a trend that is observed in other plants: phases can overlap, with flowering, fruit development and maturation occurring simultaneously.

The duration of the majority of the flowering and fruiting phases for the three varieties was shorter in the second year, and occurred later; these results were likely due to differences in the climatic conditions between both years. Our second year of observations was marked by low rainfall during spring and low amounts of sunlight during the winter. Climatic conditions of 2012 were also marked by colder winters and involved an early initiation of floral buds. The FDP varies between varieties and years, but was longer for the three varieties in the second year compared to the first, thanks to earlier floral bud formation. This observation is supported by several authors, who also reported that the FDP varies from one variety to another and from one year to another [8,14,19].

The end period of fruit maturation for the three varieties over the two years was between the 6th and the 15th of September and the end period of harvest of an amount of fruits which can be marketed is situated around the end of August until the beginning of September which is close to the end of the Moroccan prickly pear harvesting period, making it an excellent time for marketing this fruit

Studies on the phenology of flowering and fruiting of cactus pear in the world are not numerous and investigations are underway that will provide an explanation on differences in the behavior between varieties in regard to their fruit production.

Acknowledgements: *The authors wish to thank the Belgian Technical Cooperation (BTC) and Agrotech Souss Massa Draa for their financial support, and to all the people who contributed to the realisation of this study.*

REFERENCES

- 1- Anon. Field botany at Williams College. Ed. Williams College. USA; 2006.
- 2- GRIN. Opuntiaceae information from NPGS (National plant germplasm system) of GRIN (Germplasm resources information network). Taxonomic information on cultivated plants in the USA. National genetic resources program. United States Department of Agriculture, Agricultural research service. Maryland, USA; 2007.
- 3- Anderson EF. The cactus Family. Timber Press. Oregon, USA; 2001.
- 4- FAO. Agro-industrial utilization of cactus pear. Rural Infrastructure and Agro Industrial Division. FAO, Rome; 2013.
- 5- Inglese P, Basile F, Schirra M. Cactus pear fruit production. In: Nobel PS editor. Cacti: Biology and uses. University of California Press; 2002. p. 163-183.
- 6- Mulas M, Loi M, El Mzouri EH, Chiriyaa A, El Gharous M, Aouragh EH, Arif A, Mazhar M. Cactus pear (*Opuntia ficus-indica* Mill.) genetic resources from central regions of Morocco. *Agr. Med.* 2006; 136: 11-19.
- 7- Reyes-Aguero JA, Aguirre JR, Valiente-Banuet A. Reproductive biology of *Opuntia*: A review. *J Arid Environ.* 2006; 64: 549-585.
- 8- Nerd A, Mizrahi Y. Reproductive biology of cactus fruit crops. *Hort Rev.* 2010; 18: 321-346.
- 9- Santo-Ares T, Venusa de Silva M, Alves de Almeida CM, Oliveira D. Genetic diversity in cactus clones using ISSR Markers. *Acta Hort.* 2009; 811: 55-65.
- 10- Inglese P. Cactus pear *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. for fruit production: An overview. FAO Cactusnet Newsletter special issue; 2010.
- 11- Patel S. Reviewing the prospects of *Opuntia* pears as low cost functional foods. *Rev Env Sci Biot.* 2013; 12(3): 223-234.
- 12- Nobel PS. Cacti: Biology and uses. University of California Press; 2002.
- 13- Pimienta-Barrios E, Del Castillo RF. Reproductive Biology. In: Nobel PS editor. Cacti: Biology and uses. University of California Press; 2002. p. 75-90.
- 14- Segantini DM, Torres LA, Boliani AC, Leonel S. Phenology of cactus pear in Selviria-MS State, Brazil. *Rev Bras Frutic.* 2010; 32(2): 630-636.
- 15- Mulas M. Blossoming and fructification cycle of *Opuntia ficus-indica* Mill. in the Mediterranean environment. Acts of the 2nd International Congress on cactus pear and cochineal. Santiago, Chile; 1992. p. 53-60.
- 16- Reyes-Aguero JA, Aguirre JR, Rodriguez-Flores JL. Variación morfológica de *Opuntia* (cactaceae) en relación con su domesticación en la altiplanicie meridional de México. *Interciencia.* 2005; 30(8): 476-484.
- 17- Lenz M, Orth AI. Mixed reproduction systems in *Opuntia monacantha* (Cactaceae) in Southern Brazil. *Braz J Bot.* 2012; 35(2): 49-58.
- 18- Chessa I, Nieddu G. Descriptors for cactus pear (*Opuntia* spp.). FAO Cactusnet Newsletter special issue. Tipografia moderna. Sassari, Italy; 1997.

- 19- Barbara KM. Characterization of cactus pear germplasm in South Africa. A thesis of Philosophiae Doctor. Faculty of Natural and Agricultural Sciences, University of the Free State, South Africa; 2007.
- 20- Arba M, Falisse A, Choukr-Allah R, Paul R. Phenology of flowering and fruiting of cactus pear and effect of NP fertilizing. *Acta Hort.* 2015; 1067: 31-38.
- 21- Arba M, Sharoua E. 'Mles' and 'Draibina' wild populations of cactus pear in Khouribga area. *Acta Hort.* 2013; 995: 63-68.
- 22- Valdez-Cepeda RD, Blanco-Macias F, Magallanes-Quintanar R, Vasquez-Alvarado R, Mendez-Gallegos de Jesus S. Fruit weight and number of fruits per cladode depend on fruiting cladode fresh and dry weight in *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. variety. *Sci Hortic.* 2013; 161: 165-169.

Chapitre 5

Effects of irrigation at critical stages on the phenology of flowering and fruiting of the cactus *Opuntia* spp.

Running title: Phenology of the cactus *Opuntia*

Ce travail a fait l'objet de la publication suivante:

Arba, M., Falisse, A., Choukr-Allah, R. and Sindic, M. 2018. Effects of irrigation at critical stages on the phenology of flowering and fruiting of the cactus *Opuntia* spp. Article accepté pour publication à la revue internationale Brazilian Journal of Biology, il sera publié au vol. 78(4).

ABSTRACT

This paper briefly reports some effects of irrigations at two critical periods on the phenology of three varieties of cactus pear cultivated in Agadir area: the spineless varieties 'Aissa' and 'Moussa' and the thorny one 'Achefri'. In the first year experiments (2010-2011) treatments of irrigation used were: (T1) 0 mm, (T2) 30 mm during flowering and 30 mm during fruit enlargement and (T3) 30 mm only during fruit enlargement. In the 2nd year experiments, irrigation treatments were: (T1) 0 mm, (T2) 60 mm during flowering and 60 mm during fruit enlargement and (T3) 60 mm only during fruit enlargement. Treatments of irrigation were applied between mid-April and mid-June in the 1st year experiments and in February and May in the 2nd year experiments. Results of the first year experiments showed that the emission of buds was higher in the thorny variety than in the spineless ones (more than 6 emitted buds/cladode *vs* less than 4.5 in the spineless varieties). In the second year, irrigation increased the emission of buds in the three varieties (more than 7 emitted buds/cladode for each T2 and T3 of all varieties *vs* not more than 5 for T1) and the duration of the flowering phase of these varieties. However, irrigation did not modify the proportions of fruits reaching commercial maturity during the early or the late period of maturation.

Key words: *Opuntia*; cactus pear; bud emission; flowering; fruiting

RESUMO

*Este artigo relatou brevemente alguns efeitos das irrigações em dois períodos críticos na fenologia de três variedades de Opuntia cultivadas na área de Agadir: as variedades sem espinhos 'Aissa' e 'Moussa' e um espinhoso 'Achefri'. No primeiro ano (2010-2011) os seguintes tratamentos do experimento da irrigação foram usados: (T1) 0 milímetros, (T2) 30 milímetros durante a florescência e 30 milímetros durante a ampliação do fruto e (T3) 30 milímetros somente durante a ampliação do fruto. No segundo ano das experiências, os tratamentos da irrigação foram: (T1, 0 milímetros), (T2) 60 milímetros durante a florescência e 60 milímetros durante a ampliação do fruto e (T3) 60 milímetros somente durante a ampliação do fruto. Os tratamentos da irrigação foram aplicados entre a metade de abril e metade de junho nas experiências do primeiro ano e em fevereiro e maio nas experiências do segundo ano. Os resultados das experiências do primeiro ano mostraram que a emissão de brotos foi maior na variedade espinhosa do que no rufia (mais de 6 emitida gomos/cladode *vs* inferior a 4,5 no rufia variedades). No segundo ano, a irrigação aumentou a emissão dos botões nas três variedades (mais de 7 botões emitidos/cladódio para cada T2 e T3 de todas as variedades não mais que 5 para o T1) e a duração da fase de florescência destas variedades. Contudo, a irrigação não alterou as proporções de frutos que alcançaram a maturidade comercial durante o período adiantado ou atrasado de maturação.*

Palavras-chave: *Opuntia*; palma ; emissão do botão; florescência; frutificação

INTRODUCTION

The cactus *Opuntia* plays an important role in the systems of agriculture of arid and semi-arid regions thanks to its efficient use of water (Nobel and Bobich, 2002; Nobel, 2002; Oliveira et al., 2007; Sales et al., 2009; Silva et al., 2014) and its multitude of uses (fodder, human consumption, protection against erosion, etc.) and products (edible fruits, young cladodes as vegetable, adult cladodes as fodder, oil from seeds, etc.) (Nefzaoui and Ben Salem, 2000; Le Houérou, 2002; Felker and Inglese, 2003; Oliveira et al., 2007; Arba, 2009; Inglese, 2010; Silva et al., 2014). It is one of the main factors that ensure the food security to rural families, the creation of job opportunities, and income in the Brazilian semi arid region. Cactus pear constitutes a potential food source for animals in this region (Farias Ramos et al., 2015). Its drought resistance and efficient use of water make the cactus rarely irrigated (Nobel, 2002). However, currently, the irrigation of cactus pear is a common practice in hot and dry summer areas where cultivation for commercial production is practiced (Mexico, USA, Chile, Italy, South Africa, Brazil, Morocco, etc.) (Dubeux et al., 2006; Inglese, 2010). A continuous irrigation of plants involved an important emission of floral buds in spring (Nerd and Mizrahi, 2010) and the beneficial effect of water (whether of rain or irrigation) on the emission of vegetative and floral buds was shown by several authors (Mulas and D'hallewin, 1997; Inglese, 2010; Nerd and Mizrahi, 2010). Recently, plantations with high plant density and drip irrigation system are also developed in Southern Morocco, mainly in the areas of Haouz and Guelmim.

In the Mediterranean region, the principal flush of buds occurs in spring (March-April) when temperatures are favorable and day length increase. Flowers are often emitted on one year old cladodes, whereas shoots are mainly emitted on two or more years old cladodes (Pimienta-Barrios and Del Castillo, 2002; Reyes-Aguero et al., 2006; Nerd and Mizrahi, 2010). After the emission of floral buds, flowering takes place for about one month and is followed by the development of fruits. The plant is able to flower a second time during the same year if the environmental conditions are favorable (i.e. clement temperatures, frequent fogs or high hygrometry of the air) or through the use of advanced agriculture techniques such as continuous irrigation and fertilization programs, or irrigation during the dry summer period (Pimienta-Barrios and Del Castillo, 2002; Reyes-Aguero et al., 2006; Segantini et al., 2010; FAO, 2013). This phenomenon called “reflowering” presents a non-negligible interest to the growers by increasing total annual

production and modifying the timing of the production both resulting in higher income. The plant starts producing fruits 2–3 years after plantation. Full production is obtained approximately 7 years after plantation, and fruit production can last 25–30 years or longer (Pimienta-Barrios and Del Castillo, 2002; Reyes-Aguero et al., 2006; Nerd and Mizrahi, 2010).

The duration of the floral buds emission phase in *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. vary from 3-5 weeks (Pimienta-Barrios and Del Castillo, 2002; Reyes-Aguero et al., 2005) to two months (Segantini et al., 2010), but can exceed 25 weeks in some species (Pimienta-Barrios and Del Castillo, 2002; Reyes-Aguero et al., 2005). The period of time between the differentiation of floral buds and flowering is relatively short in cactus pears (30 to 50 days) (Pimienta-Barrios and Del Castillo, 2002; Segantini et al., 2010) and the period between the emission of floral buds and flowering vary from 7 weeks (Pimienta-Barrios and Del Castillo, 2002; Nerd and Mizrahi, 2010) to two months and half (Reyes-Aguero et al., 2005). Flowering extends over a period of 48 days (Segantini et al., 2010) to 100 days (Pimienta-Barrios and Del Castillo, 2002; Reyes-Aguero et al., 2006; Nerd and Mizrahi, 2010; Lenz and Orth, 2012) and the peak of flowering corresponds to the period when 50% of flowers are open (Segantini et al., 2010). Several authors indicated that flowering in cactus pear is not synchronous: in parallel with the floral buds emission and formation, flowers are at the first stage of differentiation, others are in flowering and fruit growth is simultaneously occurring (Pimienta-Barrios and Del Castillo, 2002; Reyes-Aguero et al., 2006; Segantini et al., 2010). The consequence of this is that the phases of flowering and fruit maturation are spread out over a period of several weeks (Reyes-Aguero et al., 2006; Nerd and Mizrahi, 2010). Barbara (2007) determined the duration of a phenological phase of flowering or fruiting as period which extends from the week when the characters of this phase are visible on a variety until the last week when these characters are visible on this variety. Thus, the period of flowering for example extends from the week when open flowers are visible on a variety until the last week when the open flowers are visible on this variety.

The fruit development period (FDP) is defined as the period of time between the formation of floral buds (or reproductive bud break) and the maturation of fruits (or 50% of fruit ripening) (Barbara, 2007). Floral buds are formed when they reach a length of 4–5 mm; at this stage they become spherical and easy to distinguish from vegetative buds,

which are punt-shaped. This is also the stage where the first signs of flower structure can be detected under a microscope (Pimienta-Barrios and Del Castillo, 2002; Reyes-Aguero et al., 2006; Barbara, 2007; Nerd and Mizrahi, 2010). There is a large variability in the FDP, which appears to be variety-specific (Barbara, 2007; Nerd and Mizrahi 2010); it also varies between regions, as it depends on the climatic conditions of the cultivation medium (Nerd and Mizrahi, 2010; Segantini et al., 2010). The FDP for the majority of varieties studied in South Africa is 120–130 days; for plants which have an earlier emission of floral buds, the FDP is longer and can reach up to 148 days (Barbara, 2007). Other authors reported that the FDP (from the emission of floral buds until fruit maturation) varies from 96 days (Segantini et al., 2010) to about 122 days (Nerd and Mizrahi, 2010). The fruit maturation occurs 66 days (Segantini et al., 2010) to 80-90 days (Nerd and Mizrahi, 2010) after flowering. It extends over a period of 80 days (Segantini et al., 2010) to several weeks (Nerd and Mizrahi, 2010) and the peak of maturation corresponds to the period when 50% of fruits are at maturity (Segantini et al., 2010).

Results on the impact of irrigation on fruit yield and quality of the cactus *Opuntia* (Arba et al., 2017) showed in the first year experiments (2010-2011) a significant positive effect of irrigation on fruit yield of the thorny variety and no effect on the spineless varieties. Fruit weight and size (length and diameter) were not affected by irrigation. In the second year experiments (2011-2012), irrigations had significant positive effects on fruit yield and quality of the three varieties and no effect on the biochemical quality of fruits, the treatment T3 with a single irrigation at fruit enlargement giving the best results.

From the same experiments, our goal was to see whether in addition to fruit yield and quality, the irrigation could modify the phenology of plants, in particular the dates of the first maturations of fruits and those of the last maturations. We understand the interest of the prolongation of the maturation period / harvesting period or to move it - either in precocity, or in tardivity - allowing marketing fruits in "out of season" periods when the prices are higher.

MATERIAL AND METHODS

To meet these aims, we carried out for two years in the Agadir area a precise monitoring of the phenology of plants in trials having as other objectives to record the effects of irrigations on fruit yield and quality of three varieties of cactus pear: the spineless 'Aissa' and 'Moussa' of *O. ficus-indica* and the thorny 'Achefri' of *O. megacantha* Salm Dyck (see Figure 1). The experimental design was a split-plot with four replications, the factor variety constituting the large plots and the factor irrigation the small ones. A drip irrigation system has been used in order to well control the amounts of irrigation water.

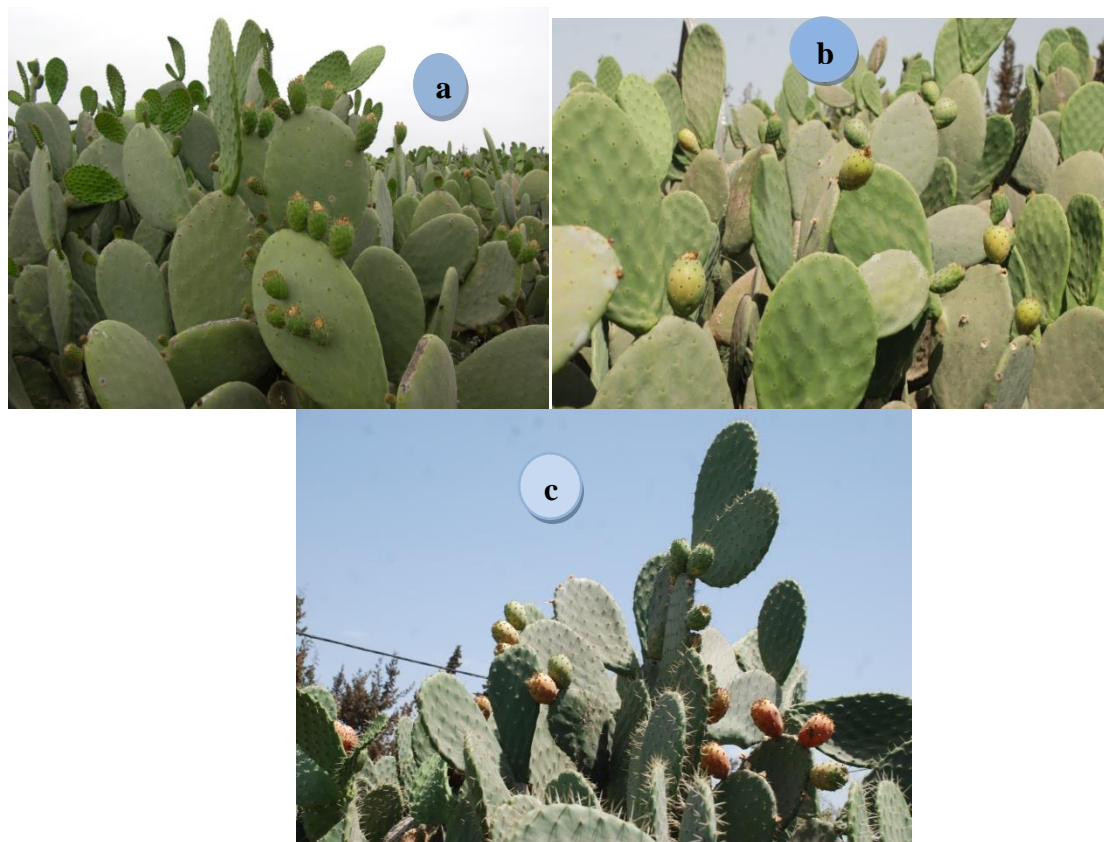


Figure 1: Varieties used in the study: the spineless varieties 'Aissa' (a) and 'Moussa' (b) and the thorny one 'Achefri' (c): pictures were taken during the ripening phase in July 2011 and show differences in spines and cladode colour (green for the spineless cultivars and glaucous for the thorny cultivar).

In the first year of experiment, irrigation treatments were as follow: T1: 0 mm (control without irrigation); T2: 30 mm during flowering (mid-April) and 30 mm during fruit enlargement (mid-June); and T3: 30 mm only during fruit enlargement. In the second year experiments, treatments of irrigation used were: (T1) 0 mm, (T2) 60 mm during flowering (February) and 60 mm during fruit enlargement (May) and (T3) 60 mm only

on fruit enlargement. The frequency of water applications in T2 and T3 treatments of the first year and second year experiments was for 1 every 3 days and the dose of water in each application was 4 mm in the 1st year and 8 mm in the 2nd year.

In the first year, T2: application of two sequences of 30 mm, the first one in April-May (from 18/04 to 19/05: 7 times 4 mm every 3rd day then once of 2 mm), the second in May-June (from May 24th to June 15th), that means 60 mm in total; T3: application of the second sequence only with 30 mm in May-June.

In the second year, T2: application of two sequences of 60 mm, the first in February, 7 times 8 mm every 3rd day and once of 4 mm (from 1st February to 1st March); the second in May (from the 1st May to May 30); T3: application of the second sequence only for 60 mm in May.

Climatic data, in particular the rainfall and temperature data (see Figure 2), have been recorded in Saouda station located at 10 km from the site of trials. It has been considered that the vegetation annual cycle started after the last fruits maturation of the previous cycle, which under the local climatic conditions corresponds to October 1st.

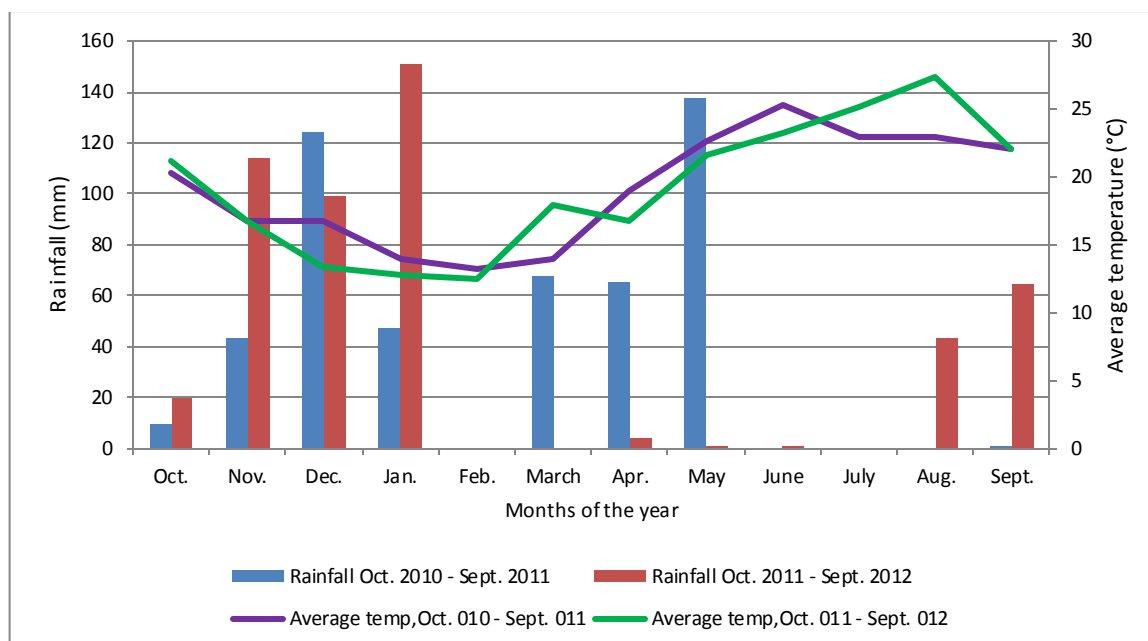


Figure 2: Climatic conditions of the area of experiments (rainfall and average temperature) during the two years of study.

For this phenological study, flowering and fruiting of the plants were observed since the emission of vegetative and floral buds until the fruit maturation. In each experimental unit, observations (such as the date of the first appearance of a stage) and the enumerations (like the number of flowers) were realized on a sample of 10 one year old cladodes: on five plants, two cladodes per plant were marked and numbered from 1 to 10 in the beginning of season. Observations were carried out on a total of 360 cladodes.

Observations and enumerations were carried out in a rate of about a week to ten days. They started in March in the first year and February in the second year (either in dates which made it possible to follow the emission of buds). They finished at the end of the cycle, in September, by the enumeration of the last fruits having reached maturity during the previous week. Observations are related to the start and end period of the emission of buds, the flowering, the fruit development and the fruits maturation. On a same plant or even on a same cladode, the phases delimited by these stages overlap.

We considered as the start date (or the end date) of a phase the date of observation when the start or the end stage of this phase is reached on at least one of the ten selected cladodes in one replication of an irrigation treatment. The starting and end dates of a phase were determined according to visual observations of this phase, by considering the average date of appearance of this phase on the 4 replicates of a treatment of irrigation during the starting or the end week of appearance of this phase in this treatment.

The collected data have been summarized and analyzed by means and standard errors, or when relevant, by ANOVA in order to detect possible "varieties x irrigations" interactions and to examine the magnitudes of irrigation effects and their level of significance. Used tools have been MINITAB.

RESULTS AND DISCUSSION

In the First Year of the Study

For the emission and formation of floral buds, irrigation was not taken in consideration because it coincided with rains in March-May (see Figure 2).

The duration of the phase of the emission of vegetative and floral buds has been 89 days long at the spineless varieties 'Aissa' and 'Moussa' and 74 days for the thorny variety 'Achefri' and the duration of the phase of the formation of floral buds was 90 days long

at the spineless varieties and 76 days for the thorny one (as shown in Table 1). The peak of the emission and formation of floral buds for all varieties is located at the end of March-the beginning of April and the importance of the emission and formation of buds in this period is due to favorable climatic conditions (rainfall, increase in temperatures and day length). The number of emitted and formed buds was higher in the thorny variety than in the spineless ones (more than 6 formed buds /cladode *vs* not more than 4.5 in the spineless varieties) and the difference is significant between varieties ($p < 0,05$) (as shown in Table 2).

Table 1: Durations and start and end dates of the phases of flowering and fruit maturation of the varieties 'Achefri', 'Aissa' and 'Moussa' under the treatments of irrigation T1, T2 and T3, year 2011.

	Phase of Flowering		Phase of Fruit maturation	
	duration (days)	Start and end dates	duration (days)	Start and end dates
'Aissa'				
T1 (0 mm)	89±3	03/03-01/06	79±4	28/06-15/09
T2 (30+30 mm)	81±3	11/03-01/06	79±4	28/06-15/09
T3 (0+30 mm)	82±2	03/03-25/05	89±3	18/06-15/09
'Moussa'				
T1 (0 mm)	81±4	11/03-01/06	72±2	28/06-08/09
T2 (30+30 mm)	81±4	11/03-01/06	79±4	28/06-15/09
T3 (0+30 mm)	89±4	03/03-01/06	89±4	18/06-15/09
'Achefri'				
T1 (0 mm)	65±3	21/03-25/05	62±2	07/07-08/09
T2 (30+30 mm)	81±3	11/03-01/06	79±4	28/06-15/09
T3 (0+30 mm)	81±2	11/03-01/06	79±4	28/06-15/09

Table 2: The emission of vegetative and floral buds at the three varieties 'Achefri', 'Aissa' and 'Moussa' and under the three treatments of irrigation T1, T2 and T3 in 2011 (irrigations coincided with rains in march-May).

Treatment of irrigation	Varieties		
	Achefri	Aissa	Moussa
Number of emitted buds by cladode in March			
T1 (0 mm)	7.00±0.39	3.50±0.21	5.50±0.34
T2 (60+60 mm)	6.50±0.32	3.25±0.20	4.50±0.40
T3 (0+60 mm)	5.25±0.15	4.00±0.18	3.50±0.40
Mean	6.25±0.15 <i>b</i>	3.58±0.20 <i>a</i>	4.50±0.40 <i>a</i>
ANOVA	*	*	ns

irrigations: ns (no significant difference); varieties: * (significant difference at $p < 0.05$); interactions irrigations x varieties: ns

The duration of the phase of flowering at the spineless varieties was 81 to 89 days long for the three treatments of irrigation. For the variety 'Achefri' the duration of the phase of flowering was 65 days long in T1 not irrigated and significantly longer (81 days) in the irrigated treatments (as shown in Table 1). The flowering peak for the all varieties and treatments of irrigation is located in April. Irrigation had no effect neither on flowering, nor on the duration of the flowering phase of the spineless varieties. It has a significant positive effect of about 16 days on the duration of flowering of the thorny variety, this increase resulting from about 8 days for each of precocity and lateness.

The duration of the maturation phase in not irrigated plants of 'Aissa' and 'Moussa' (79 and 72 days respectively), is prolonged to 89 days after the application of T3 treatment. For 'Achefri', irrigations have elongated the maturation phase by two weeks (from 62 to 79 days) (as shown in Table 1). Irrigation had no effect on the maturation peak of all varieties. It had a significant positive effect on the duration of the maturation phase of the varieties 'Moussa' and 'Achefri'.

The FDP of all varieties under the three treatments of irrigation varies between 146 and 165 days. Irrigation had no effect on the FDP of the three varieties and the variability in FDP between varieties is due to differences regarding the dates of formation of floral buds and of fruit maturation. The FDP of the three varieties is longer than the FDP of the majority of varieties in South Africa (120-130 days) (Barbara, 2007) and than those reported for some Mediterranean countries (122 days in Italy) (Nerd and Mizrahi, 2010). The FDP of these varieties is similar or a little longer than that of varieties with an earlier emission of floral buds in South Africa (148 days) (Barbara, 2007).

In the Second Year of the Study

For the spineless varieties 'Aissa' and 'Moussa', the duration of the floral buds formation phase has been 83-98 days long in the three treatments of irrigation. For 'Achefri' the duration of this phase was 76-83 days long in all treatments of irrigation (as shown in Table 3). The appearance dates of the first floral buds are located between the end of January for 'Aissa' and 'Moussa' and the beginning of February for 'Achefri'. The emission peak of buds was located in March for the all varieties and treatments of irrigation. The number of emitted buds was often higher in irrigated treatments (it can reach more than 7 buds/cladode in some varieties whereas it did not exceed 5

buds/cladode in not irrigated treatments of the all varieties) (as shown in Table 4). Irrigation has favored the emission of vegetative and floral buds. Several authors also confirmed that irrigation increases the emission and formation of the organs in the plant, in particular the vegetative and floral buds (Mulas and D'hallewin, 1997; Inglese, 2010; Nerd and Mizrahi, 2010).

Table 3: Durations and start and end dates of the development phases for the varieties 'Achefri', 'Aissa' and 'Moussa' under T1, T2 and T3 treatments of irrigation, year 2012.

	Phase of the formation of floral buds		Phase of flowering		Phase of fruit maturation	
	Duration (days)	Start and end dates	Duration (days)	Start and end dates	Duration (days)	Start and end dates
'Aissa'						
T1 (0 mm)	98±3	02/02 - 09/05	85±4	27/03 - 20/06	76±3	22/06 - 06/09
T2 (60+60 mm)	98±3	02/02 - 09/05	99±4	20/03 - 27/06	91±3	14/06 - 13/09
T3 (0+60 mm)	98±3	02/02 - 09/05	99±4	20/03 - 27/06	91±3	14/06 - 13/09
'Moussa'						
T1 (0 mm)	83±3	02/02 - 24/04	78±4	27/03 - 13/06	84±4	14/06 - 06/09
T2 (60+60 mm)	92±4	02/02 - 02/05	92±4	20/03 - 20/06	84±4	14/06 - 06/09
T3 (0+60 mm)	92±4	02/02 - 02/05	92±4	20/03 - 20/06	84±4	14/06 - 06/09
'Achefri'						
T1 (0 mm)	76±3	10/02 - 24/04	70±3	27/03 - 06/06	61±3	22/06 - 22/08
T2 (60+60 mm)	83±3	10/02 - 02/05	77±4	27/03 - 13/06	76±4	14/06 - 29/08
T3 (0+60 mm)	76±4	10/02 - 24/04	77±3	27/03 - 13/06	68±4	22/06 - 29/08

Table 4: The emission of vegetative and floral buds and of shoots at the three varieties 'Achefri', 'Aissa' and 'Moussa' under the three treatments of irrigation T1, T2 and T3 in 2012

Treatments of irrigation	Varieties		
	Achefri	Aissa	Moussa
Number of emitted buds by cladode in March			
T1 (0 mm)	4.14±0.85 a	3.12±0.29 a	2.67±0.33
T2 (60+60 mm)	7.20±1 b	3.94±0.36 ab	3.06±0.14
T3 (0+60 mm)	4.24±0.94 a	4.50±0.40 b	2.80±0.18
ANOVA	*	*	ns
Number of emitted shoots by cladode			
T1 (0 mm)	0.17±0.11 a	0.10±0.058 a	0.08±0.01 a
T2 (60+60 mm)	0.50±0.10 b	0.25±0.08 b	0.35±0.06 c
T3 (0+60 mm)	0.20±0.10 a	0.15±0.04 a	0.20±0.08 b
ANOVA	*	*	*

(ns): no significant difference; (*): significant differences between irrigations at $p < 0.05$.

Irrigation had significant positive effects on the duration of the flowering phase of all three varieties: for 'Aissa', 99 days long in irrigated treatments *vs* only 85 days in not

irrigated treatment; for 'Moussa', 92 days long in irrigated plants *vs* 78 days in not irrigated plants; and for 'Achefri', 77 days long *vs* 70 days in not irrigated plants (as shown in Table 3). The flowering peak in all varieties and treatments of irrigation is located between the end of April and the first fortnight of May. Irrigation also has had an effect on the number of flowered buds (more than 6 flowered buds/cladode in irrigated treatments and not more than 5 flowered buds/cladode in not irrigated treatments). Several authors also reported that irrigation increases the emission of floral buds in cactus pear (Mulas and D'hallewin, 1997; Nerd and Mizrahi, 2010).

The duration of the fruit maturation phase was longer for irrigated treatments of 'Aissa' (91 days in T2 and T3 *vs* only 76 days in T1 not irrigated) and 'Achefri' (76 days in T2 and 68 in T3 *vs* 61 days in T1). For 'Moussa', irrigations have had no effect on the duration of the maturation phase (as shown in Table 3). The maturation peak for all varieties and treatments of irrigation is located in the 1st week of August.

For all the varieties, the date of July 31st can be considered as the date of 50% of fruit maturation. The FDP of all varieties and treatments of irrigation varies between 172 and 180 days. It's as long as the FDP reported for other varieties in South Africa or Italy, including those which have an earlier emission of floral buds (Barbara, 2007; Nerd and Mizrahi, 2010).

In this second year overlapping between two successive phases has been observed. For 'Aissa' and 'Moussa', the phases of flowering and fruit ripening overlap each other for one to two weeks; but for 'Achefri' they are quite distinct, without overlapping.

Irrigations T2 and T3 have had little effect on the durations of the floral buds formation: no effect on 'Aissa' and one week prolongation on 'Moussa' and 'Achefri'. They have induced a slight increase on the flowering phase duration, 7 days at 'Achefri' and 14 days (7 days precocity and 7 days lateness) at 'Aissa' and 'Moussa'. Irrigations also have prolonged the duration of the fruit maturation phase for two weeks in 'Aissa' and one to two weeks for 'Achefri' but they have had no effect on this duration on 'Moussa'. These prolongations concern only a very low proportion of flowers or matured fruits.

From the maturation dynamics described by the counted numbers of ripe fruits at the seven observations made from June to September, it can be considered that the 4 weeks

period located between July 17th and August 15th was that of the full harvest (indicated by (B) in Table 5), harvests before July 17th (A) and after August 15th (C) can be considered as "early" and "late" harvests for marketing. For each irrigation treatment, the number of ripe fruits during each period A, B and C, has been expressed as a percentage of the total number of produced fruits (as shown in Table 5). Results showed at first that whatever the treatment of irrigation, the harvest in period B represents about 58% of fruits in 'Aissa' and 64% in 'Moussa'. Applied treatments of irrigation did not modify the proportions of fruits maturing during the early period (A) or the late period (C) (23% of early fruits and 12% of late fruits in 'Moussa', and respectively 21% and 20% in 'Aissa' variety). For 'Achefri', T2 treatment which caused a prolongation of the maturation period, involve a significant increase of a period of one week in the earlier proportion of fruits (+ 4%) and a late percentage of fruits (+2%). These differences are weak and not of a sufficient economic interest.

Table 5: Maturation dynamics in 2012 season, for the varieties 'Achefri', 'Aissa' and 'Moussa': (N) Total numbers of fruits per 10 cladodes; (A) proportions (in %) of ripe fruits before July 17th; (B) between July 17th and August 15th; (C) after August 15th.

Treatment	'Moussa'				'Aissa'				'Achefri'			
	N	A (%)	B (%)	C (%)	N	A (%)	B (%)	C (%)	N	A (%)	B (%)	C (%)
T1 0+0	75±10	23,0±7.5	64,7±8	12,3±8	75±8	19,9±9	58,5±8	21,6±8	76±8	16,4±8	78,3±6	5,3±7
T2 60+60	92±10	24,3±11	64,3±9	11,4±9	95±9	21,3±9	59,2±9	19,2±7	100±10	20,4±10	72,1±10	7,5±8
T3 0+60	87±11	23,2±9.5	64,2±8	12,6±10	93±10	21,4±7	58,4±7	20,0±7.5	82±6	16,2±8	78,7±12	5,2±6

In the second year experiments, irrigation favored the emission of growths. The number of emitted shoots per cladode was higher in irrigated treatments of the all varieties (0.15-0.50 growths/cladode) than in not irrigated treatment of these varieties (0.075-0.10 growths/cladode) (as shown in Table 4). It is also important to note that the emission of growths is more important in two years and older cladodes than in one year old cladodes. For 'Achefri' for example, in the second year experiments, the emission of growths in two years and older cladodes of irrigated treatments was 0.75-1.0 growths/cladode vs 0.35-0.5 in one year old cladodes of these treatments. In the first year experiments, irrigation did not modify the emission of shoots between irrigation treatments of all varieties because irrigation coincided with rains in March-May when the emission of shoots is important in these varieties.

CONCLUSIONS

In the first year experiments, the effect of irrigations on the phenology of flowering and fruiting of the three varieties was negligible because irrigations coincided with rains in March-May. The only positive effect of irrigation appeared on flowering and the duration of flowering of the thorny variety 'Achefri'. In the second year experiments, irrigations had a positive effect on the emission of buds (as shown in Table 4) and on flowering of the three varieties.

The applied irrigations doses during the two years of trials (30 to 120 mm) have little modified the lengths of the development phases, generally for few days. We know in addition that these irrigations increased the yields, by increasing amongst other things the number of fruits (Arba et al., 2017). This higher number of fruits becomes ripe during the same periods in proportions which are not significantly modified by application of irrigation water. We can thus conclude that, under our conditions irrigation has not allowed to significantly elongate the fruit maturation periods, neither in precocity, nor in lateness. Irrigation did not let appear eventual possibilities of better commercial valorization by a shift of the fruits maturation dates.

The beneficial effect of irrigation on the emission of shoots has been demonstrated. Several authors also reported that irrigation increases the emission of the organs (buds, flowers, growths) in cactus pear (Mulas and D'hallewin, 1997; Inglese, 2010; Nerd and Mizrahi, 2010). In dry periods irrigation seems to increase the growth emission both on one year and on older cladodes.

Acknowledgements: *The authors wish to thank the Belgian Technical Cooperation (BTC) and Agrotech Souss Massa Draa for their financial support, and to all the people who contributed to the realization of this study.*

REFERENCES

Arba, M., 2009. Le cactus opuntia une espèce fruitière et fourragère pour une agriculture durable au Maroc. In: Bouaziz, A., Choukr-Allah, R., Mrabet, R. and Falisse, A. eds. *Actes du Symposium International AGDUMED. Durabilité des systèmes de culture en zone méditerranéenne et gestion des ressources en eau et en sol*. Cana Print, Rabat, Maroc. Pp: 215-223.

Arba, M., Falisse, A., Choukr-Allah, R. and Sindic, M. 2017. Impact of irrigation at critical crop stages on fruit yield and quality of the cactus *Opuntia* spp. Under reviewing process in *Agrociencia Journal*, Mexico.

- Barbara, K.M., 2007. *Characterization of cactus pear germplasm in South Africa*. Faculty of Natural and Agricultural Sciences, University of the Free State, South Africa, 194 p. A thesis of Philosophiae Doctor.
- Dubeux Jr, J.C.B., Santos, M.V.F., Lira, M.A., Santos, D.C., Farias, I., Lima, L.E. and Ferreira, R.L.C. 2006. Productivity of *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller under different N and P fertilization and plant population in north-east Brazil. *Journal of Arid Environments*, vol.67, pp. 357-372.
- FAO. 2013. Agro-industrial utilization of cactus pear. Rural Infrastructure and Agro Industrial Division. FAO, Rome. 150p.
- Farias Ramos, J.P., Santos, E.M., Cruz, G.R.B., Araujo Pinho, R.M. and Dias De Freitas, P.M. 2015. Effects of harvest management and manure levels on cactus pear productivity. *Revista Caatinga, Mossoró*, vol. 28, no 2, pp. 135-142.
- Felker, P. and Inglese, P., 2003. Short-term and long-term research needs for *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. utilization in arid areas. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, vol. 7, pp. 131-152.
- Inglese, P., 2010. Cactus pear *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. for fruit production: An overview. FAO Cactusnet Newsletter Special Issue.
- Le Houérou, H.N., 2002. Cacti (*Opuntia* spp.) as a fodder crop for marginal lands in the Mediterranean basin. *Acta Horticulturae*, no. 581, pp. 21-46.
- Lenz, M. and Orth, A.I., 2012. Mixed reproduction systems in *Opuntia monacantha* (Cactaceae) in Southern Brasil. *Brazilian Journal of Botany*, vol. 35, no. 2, pp. 49-58.
- Mulas, M. and D'hallewin, G., 1997. Fruit quality of four cactus pear (*Opuntia ficus-indica* Mill.) cultivars as influenced by irrigation. *Acta Horticulturae*, no. 438, pp. 115-122.
- Nefzaoui, A. and Bensalem, H., 2000. *Opuntia*: A strategic fodder and efficient tool to combat desertification in the WANA region. FAO Cactusnet Newsletter Special Issue.
- Nerd, A. and Mizrahi, Y., 2010. Reproductive biology of cactus fruit crops. *Horticultural Review*, no. 18, pp. 321-346.
- Nobel, P.S., 2002. Cacti: biology and uses. University of California Press, California. 291p.
- Nobel, P.S. and Bobich, E.G. 2002. Environmental biology. In: Nobel, P.S. ed. Cacti: biology and uses. University of California Press, pp. 57-74.
- Oliveira, V.S., Ferreira, M.A., Guim, A., Modesto, E.C., Lima, L.E. and Silva, F.M. 2007. Total replacement of corn and partial of tifton hay by forage cactus in diets for lactating dairy cows. Intake and digestibility. *Revista Brasileira Zootecnia, Viçosa*, vol.36, no.5, pp.1419-1425.
- Pimienta-Barrios, E. and Del Castillo, R.F., 2002. Reproductive Biology. In: Nobel P.S., ed. Cacti: biology and uses. University of California Press, pp. 75-90.
- Reyes-Aguero, J.A., Aguirre, J.R. and Rodriguez-Flores, J.L., 2005. Variacion morfologica de *Opuntia* (Cactaceae) en relacion con sa domesticacion en la Altiplanicie Meridional de Mexico. *Intersciencia*, vol. 30, no. 8, pp. 476-84.
- Reyes-Aguero, J.A., Aguirre, J.R. and Valiente-Banuet, A., 2006. Reproductive biology of *Opuntia*: A review. *Journal of Arid Environment*, vol. 64, pp. 549-85.

Sales, T.A., Andrade, P.A., Silva, S.D., Mello Vieira Leite, M.L., Viana, L.B., León, M.J. and Solís, A.M. 2009. Adaptation potential of cactus pear to soil and climatic conditions of the semi arid in Paraíba State, Brazil. *Acta Horticulturae*, no. 811, pp. 395-400.

Segantini, D.M., Torres, L.A., Boliani, A.C. and Leonel, S., 2010. Phenology of cactus pear in Selviria-MS State, Brazil. *Revista Brasileira de Fruticultura = Brazilian Journal of Horticulture*, vol. 32, no. 2, pp. 630-36.

Silva, T.G.F, Primo, J.T.A., (1); Silva, S.M.S., Moura M.S.B., Santos, D.C., Silva, M.C. and Araújo, J.E.M. 2014. Water and nutrient use efficiency indicators of cactus pear clones in rainfed conditions in the Brazilian semi arid region. *Bragantia, Campinas*, vol. 73, no. 2, pp. 184-191.

Chapitre 6

Impact of irrigation at critical crop stages on fruit yield and quality of the cactus *Opuntia* spp.

Ce travail a fait l'objet de la publication suivante:

Arba, M., Falisse, A., Choukr-Allah, R. and Sindic, M. 2017. Impact of irrigation at critical crop stages on fruit yield and quality of the cactus *Opuntia* spp. Article en révision à la revue internationale Agrobiencia.

ABSTRACT

The impact of three irrigation regimes during flowering and fruit growth on fruit yield and quality of the varieties 'Aissa', 'Moussa' and 'Achefri' in the Agadir area were monitored for the years 2011 and 2012. In 2011, irrigation treatments were: T1 (0 mm), T2 (30 mm during flowering and 30 mm during fruit enlargement) and T3 (30 mm only during fruit enlargement). Watering was applied between mid April and mid June. In 2012, irrigation doses were doubled (60 mm) and watering was applied in February and May. For each season it got watered sixteen times in T2 (once every three days) and 8 times in T3. In 2011, T2 and T3 irrigations had a negative effect on 'Aissa' and 'Moussa' (-2.8 kg/plant) and T2 had a positive effect on 'Achefri' (+2.7 kg/plant or +18%). Fruit quality was not affected by irrigation. In 2012, all the varieties responded positively to irrigation: 'Achefri' and 'Aissa' yielded best with T3 and 'Moussa' with T2. The increases in yield varied between 30% for 'Moussa' to 63% for 'Achefri'. All irrigations increased fruit number and size and slightly decreased the content of total sugars and titratable acidity. Irrigations had no significant effect on the other chemical and organoleptic parameters.

Key words: cactus pear, fruit yield, fruit size, chemical composition, irrigation

INTRODUCTION

Prickly pear cactus plays an important role in the system of agriculture of arid and semi-arid zones, due to the multitude of its uses (forage, pharmaceuticals, cosmetic oil from the seeds and for, anti-erosion), as a food products (cladodes as vegetables, fruit, fruit juice) (Nefzaoui and Ben Salem, 2000; Le Houérou, 2002; Felker and Inglese, 2003; Arba, 2009; Inglese, 2010) and to its low demand for water (Nobel, 2002; Nobel and Bobich, 2002). It's a species that rarely requires irrigation in the Mediterranean region (Inglese, 2010) due to its resistance to drought and its efficient use of water (Nobel, 2002). However, irrigation may be required in hot and dry zones in summer, especially where an intensive commercial production is practised, i.e. Mexico, USA, Chile, Italy, South Africa, Morocco, Tunisia, etc. (Inglese, 2010). High density plantations have been established with drip irrigation in South Morocco, notably in the areas of Haouz, Tiznit and Guelmim.

Cactus pear fruits are appreciated by the consumer for their flavour, taste and dietetic properties. Their quality can be assessed on the basis of size (shape, weight and dimensions) and the contents of edible fresh matter (pulp) and organo-leptic compounds (juice, total soluble solids (sugars) and acidity) (Barbara, 2007). Chessa and Nieddu

(1997) established five size categories for harvested fruits: very small calibre (<80 g), small (81 to 120 g), medium (121 to 150 g), large (151 to 200 g) and extra large (>200 g). In South Africa, fruit size determination for commercial production is based on the following quantitative parameters: fruit weight >140 g, ratio pulp/fruit >50%, peel thickness <6 mm and total soluble solids (TSS) >13°Brix (Potgieter, 2007; De Wit *et al.*, 2010).

The amount of rain received during the fruit development period (FDP), which extends from the beginning of the formation of floral buds until fruit ripening, influences the mean fresh weight of fruit (Barbara, 2007). Felker *et al.* (2002) also suggested that high rainfall during the last two months of fruit maturation led to an increase in fruit size (calibre) and in the content of pulp. The amount of rain received during the FDP also affects the total soluble solids (TSS) of the fruits. These contents are higher (14.36 °Brix) in a low-rainfall season (76.7 mm) than in a high-rainfall season (12.68 °Brix for a rainfall of 106.6 mm) (Barbara, 2007) due to dilution effect.

In Italy, a micro-spray irrigation of 60 mm in three applications (the first one week before flowering, the second two weeks after flowering and the third, six weeks after flowering), was applied to a 10-year-old plantation of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. The results showed that irrigation had a positive effect on fruit size and no significant effect on the organoleptic characteristics (°Brix, pH, malic acid) (Gugliuzza *et al.*, 2002). Also in Italy, a drip irrigation of 566 m³ (\approx 60 mm) per ha per year applied from May to September during three consecutive years to adult plantations of four varieties of *Opuntia* increased yield by 40% to 50% for the first two years, and 130% in the third year (Mulas and D'hallewin, 1997). In South Africa, a drip irrigation of 12.5 mm per week applied during the dry period (from July 15th to February 15th) on five varieties of *O. ficus-indica* increased fruit yield from 9.2 to 10.7 kg/plant (+16%) and fruit and pulp weight by 6% and 3%, respectively (Van Der Merwe *et al.*, 1997).

The cactus *Opuntia* is a drought resistant species and its requirements in water are weak, but it is difficult for him to overcome the hot and dry period of summer in the Mediterranean region, mainly the southern part of the Mediterranean Sea. In the dry areas of Morocco, the summer season is a hot period which can extend over 7 to 8 months without raining (from March-April to October). What involves the dehydration and the yellowing of the plants and the desiccated spots on the cactus pads. Fruit yield is

low and the calibre of the fruits is small. The objective of our study was to evaluate the impact of irrigation at critical phenological stages, particularly during the flowering and fruit-growth stages, on fruit yield and fruit quality, mainly in terms of calibre and composition.

MATERIALS AND METHODS

To study the impact of irrigation on fruit yield and fruit quality, irrigation trials were carried out on three varieties of *Opuntia*: the spineless varieties 'Aïssa' and 'Moussa' of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. and the thorny variety 'Acheffi' of *O. megacantha* Salm Dyck (Figure 1). These varieties were obtained in the Sidi Ifni area and are cultivated in the Agadir area.



variety 'Aïssa' (spineless)



variety 'Moussa' (spineless)



variety 'Acheffi' (spiny)

Figure 1. Varieties used in the study: the spineless 'Aïssa' and 'Moussa' varieties and the thorny 'Acheffi' variety: pictures were taken during the ripening phase in July 2011 and show differences in spines and cladode colour (green for the spineless cultivars and glaucous for the thorny cultivar).

In the first year experiments, three treatments of irrigation were compared: T1, 0 mm (control, not irrigated); T2, 30 mm during flowering and 30 mm during fruit growth; and T3, 30 mm only during the phase of fruit growth. In the second year experiments, irrigation treatments compared were as follow: T1 (pilot without irrigation); T2, 60 mm during flowering and 60 mm during fruit growth; and T3, 60 mm only during fruit growth. Treatments were applied between mid-April and mid-June in the first year and in February and May in the second year. For each season it got watered sixteen times in T2 (14 times of 4 mm each one in the first season and 8 mm each one in the second season and two times of 2 mm each one in the first season and 4 mm each one in the second season) and 8 times in T3 (7 times of 4 or 8 mm each one and 1 time of 2 or 4 mm each one). The irrigation frequency in each of T2 and T3 irrigation treatments was every third day. Drip irrigation was used, to manage correctly the amounts and timing of irrigation.

The experimental design was split-plot with 4 replicates, with the variety factor being the main effect, and irrigation factor, the subplot.

Fruit yield was determined on a sample of two plants per treatment of irrigation per variety and per replication. The study of fruit quality focused on fruit calibre (weight, length and diameter, pulp proportion) and its organoleptic characteristics (amount of juice, titratable acidity, pH, degree Brix, total sugars, juice dry matter). Measurements of the physical characters of fruits were performed on a sample of 20 fruits for each treatment and variety and organoleptic properties were determined by chemical analysis of samples of five to six combined fruits for each treatment and variety. Statistical analyses consisted mainly of analysis of variance (ANOVA). Climatic data relating to rainfall and evapotranspiration were obtained from the Saouda Station located 10 km from the experimental site.

RESULTS AND DISCUSSION

Effects of irrigation treatments on fruit yield and physical features in the first year experiments

Results of the first year experiments (Table 1) reveal a significant interaction between varieties and irrigations and indicate the positive effect of irrigation doses on fruit yields

for the thorny cultivar 'Achefri'. However, irrigation had no effect on the yields of the spineless cvs. 'Aissa' and 'Moussa'.

Table 1. Fruit yields of cvs. 'Achefri', 'Aissa' and 'Moussa' under T1, T2 and T3 irrigations in the first year experiments (2011).

Variety	Fruit yield (kg.plant ⁻¹)		
	T1	T2	T3
	Not irrigated	30 mm + 30 mm	0 mm + 30 mm
'Achefri'	14.6±0.8	17.3±2	15.6±1
'Aissa'	13.4±0.7	11.3±2.2	10.7±1.4
'Moussa'	12.4±0.6	9.6±2.4	10.8±1.4

Effect "variety": ** (significant difference at p <0.01); effect "irrigation": ns (no significant); interaction: * (significant at p <0.05)

Fruit and pulp weight and the content of fruit in pulp were not significantly different according to treatments of irrigation as well as fruit length and diameter (Table 2). All these features only differed according to variety, except for the pulp/fruit ratio, which was remarkably constant between 52-55%.

Table 2. Fruit weight (a) and sizes (b) of cvs. 'Achefri', 'Aissa' and 'Moussa' under T1, T2 and T3 irrigations in the first year experiments.

(a) Fruit weight and pulp weight

Variety	Fruit weight (g)			Pulp weight (g)			Pulp/fruit (%)		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Achefri	112±4	122±3	124±3.5	59.3±2.3	66.9±3	67.4±2.3	53±0.6	55±0.6	54±0.6
Aissa	135±2	130±2	129±2.3	72.6±1.5	68.3±1.5	69.6±1.2	54±0.8	52±0.7	54±0.7
Moussa	122±3	131±1.8	130±2.3	67.2±1.3	67.8±1.9	71.7±1.5	55±1	52±1	55±1

(b) Fruit length and fruit diameter

Variety	Fruit length (cm)			Fruit diameter (cm)		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Achefri	7.17±0.44	7.40±0.58	7.53±0.40	4.85±0.55	4.99±0.21	5.08±0.30
Aissa	7.24±0.37	7.09±0.30	7.12±0.20	5.27±0.30	5.35±0.20	5.23±0.17
Moussa	7.14±0.25	7.12±0.40	7.17±0.20	5.02±0.41	5.25±0.20	5.28±0.20

Effect "variety": * (significant difference at p <0.05); effect "irrigation": ns (not significant); interaction: ns (not significant)

The numbers of fruits calculated or observed (Table 3) are highly correlated between them ($R^2 = 0.792$) and are also significantly correlated with the yield (resp. $R^2(a) = 0.976$ and $R^2(b) = 0.836$).

Table 3. Effect of irrigation treatments on the number of fruits produced per plant and by 10 cladodes in 2011.

(a) Number of fruits /plant (calculated on the basis of the ratio yield/mean fruit weight)			
Variety	T1 (0 + 0)	T2 (30 + 30)	T3 (0 + 30)
'Achefri'	130.7±4.5	141.9±4.5	125.6±4.3
'Aïssa'	99.3±4	86.9±4.3	82.6±4.3
'Moussa'	101.5±7	73.3±6	83.2±7.5
(b) Number of fruits observed on 10 cladodes			
Variety	T1 (0 + 0)	T2 (30 + 30)	T3 (0 + 30)
'Achefri'	75.4±11.5	117.0±12	94.9±12
'Aïssa'	67.4±2.2	61.7±2	61.9±2
'Moussa'	59.7±3.5	70.7±3	65.3±2

Effects of irrigation treatments on fruit yield and fruit quality in the second year experiments

Statistical analysis (Table 4) revealed a very significant interaction between the two factors. For 'Achefri', the application of both T2 and T3 irrigations caused a very significant increase in the yields by 6 and 13 kg/plant (or 30% and 65%), respectively. For the variety 'Aïssa', irrigations T2 and T3 increased the yields by nearly 6 and 10 kg (or 30% and 55%) respectively. For 'Moussa', irrigations significantly increased the yield by 6.3 and 3.2 kg/plant.

On average, and in comparison to the control (T1), the global positive effects of T2 and T3 irrigations were 6.0 and 8.6 kg/plant (or 32% and 45%) respectively. Irrigation T3 with 60 mm applied at the start of the ripening stage gave the best positive results on 'Aïssa' and 'Achefri'. Irrigation T2 with 120 mm (60 mm during flowering and 60 mm during fruit growth) has given lower yield than T3, indicating that the needs for water was limited and situated in the late period of the cycle.

Table 4. Effect of irrigation dose on the fruit yield of the three varieties of cactus pear ('Achefri', 'Aissa' and 'Moussa') in 2012.

Variety	Fruit yield (kg.plant ⁻¹)		
	T1	T2	T3
	Not irrigated	60 mm + 60 mm	0 mm + 60 mm
'Achefri'	20.4±1	26.4±0.8	33.2±2.7
'Aissa'	17.7±0.8	23.5±1	27.4±3.1
'Moussa'	18.3±0.7	24.6±0.9	21.5±3.5

Effect "variety": ** (significant difference at p <0.01); effect "irrigation": ** (significant at p <0.01); interaction: ** (significant at p <0.01)

Fruit and pulp weights (Table 5) increased very significantly in the irrigated treatments (with the exception of the 'Moussa' pulp weight). The irrigations also increased the fruit length and diameter, and reduced the 'pulp/fruit' ratio for 'Achefri' (55 vs 58%) and for 'Moussa' (52 vs 59%). Yields and mean fruit weights were positively correlated ($R^2 = 0.802$).

Table 5. Effect of the irrigation treatments on fruit weight (a) and sizes (b) of the three cactus pear cultivars ('Achefri', 'Aissa' and 'Moussa') in 2012.

(a) Fruit weight and pulp weight											
Variety	Fruit weight (g)				Pulp weight (g)				Ratio Pulp/ Fruit (%)		
	T1	T2	T3		T1	T2	T3		T1	T2	T3
Achefri	115±9	143±9	143±9	**	66±4	76±4	79±3.5	**	58±3	53±2.75	55±2.80
Aissa	122±6	141±7	164±6	**	67±3	72±3.5	79±2.5	**	55±2.75	51±2.80	56±3
Moussa	117±6	136±6	135±5	**	69±2	70±2	71±2.5	ns	59±3	52±2.15	52±2.5

(b) Fruit length and fruit diameter									
Variety	Fruit length (cm)				Fruit diameter (cm)				
	T1	T2	T3		T1	T2	T3		
Achefri	7.4±0.20	8.0±0.18	7.9±0.19	*	4.8±0.17	5.2±0.18	5.3±0.12	**	
Aissa	7.3±0.12	7.7±0.13	7.8±0.18	*	5.0±0.09	5.3±0.09	5.2±0.09	*	
Moussa	7.5±0.10	7.8±0.10	7.7±0.10	*	5.0±0.08	5.1±0.06	5.2±0.05	ns	

(*): significant difference at p <0.05; (**): significant difference at p <0.01; (ns): no significant difference

Although the number of fruits produced by 10 cladodes and per plant (Table 6) were not significantly correlated ($R^2 = 0.409$), the means indicate that the T3 treatment increased the number of fruits more than the T2 treatment. The variations in yield are well explained by the number of fruits produced by plant (the coefficient of determination is for 89%) and very poorly by the numbers of fruits observed on ten cladodes (the coefficient of determination is for 38%).

Table 6. Effect of irrigation treatment on the number of fruits produced per plant and by 10 cladodes in 2012.

(a) Number of fruits /plant (calculated on the basis of the ratio yield/mean fruit weight)			
Variety	T1 0 mm + 0 mm	T2 60 mm + 60 mm	T3 0 mm + 60 mm
‘Achefri’	178±12,5	184±16,5	232±18
‘Aissa’	145±10	167±11,5	193±14,5
‘Moussa’	157±3,5	180±8,5	159±6
(b) Number of fruits observed on 10 cladodes			
Variety	T1 0 + 0	T2 60 + 60	T3 0 + 60
‘Achefri’	76,0±6	82,0±8	99,5±6
‘Aissa’	75,3±5	92,5±6,5	95,0±6
‘Moussa’	75,0±5	87,5±4	91,8±4,5

The results indicate that a correlation exists between fruit yield and climatic conditions during the growing season, as well as with timing of supplemental irrigation. In order to better understand this relationship, we have computed the hydric data (rainfall, evapotranspiration, irrigation) during the two years the study was conducted.

It has been considered that the annual cycle of *Opuntia* begins immediately at the end of fruit maturation, and thus, in this case, covered the period from 1 October to 30 September (a period of 36 decades: 36 periods of ten days). To simplify the situation, the residual hydrous state at the end of the previous cycle was not taken into account. It has been also assumed that rainfall and irrigation during the annual cycle were completely taken into consideration (no losses by run off or drainage). Attempts to find reliable values of K_c for *Opuntia* in the region were not successful, despite consulting numerous sources, e.g., Allen *et al.* (1998), Lazzara and Rana (2010), Consoli *et al.* (2013). On the basis of various indications for perennial fruit woody plants in the Mediterranean-type environments, a value of 0.7 for K_c was adopted. Figures 2 and 3 display the cumulated ETR ($= 0.7 * ET_0$), the cumulated rainfall and the cumulated rainfall + irrigation for the first year and second year experiments. Considering the approximations, and that the main aim was not an extensive study of the hydrous relationships, it can be observed that on these bases, the periods of significant risk of water stress without irrigation were as follows: in the season of the first year experiments (2010/2011), the end period of the cycle starting from the second week of May; in the season of the second year experiments (2011/2012), the period starting from the second week of April, whereas the period between the end of December and the end

of March showed a positive water supply for the cactus. This clearly explains the variable efficiency of the supplemental irrigations in the first year and second year experiments.

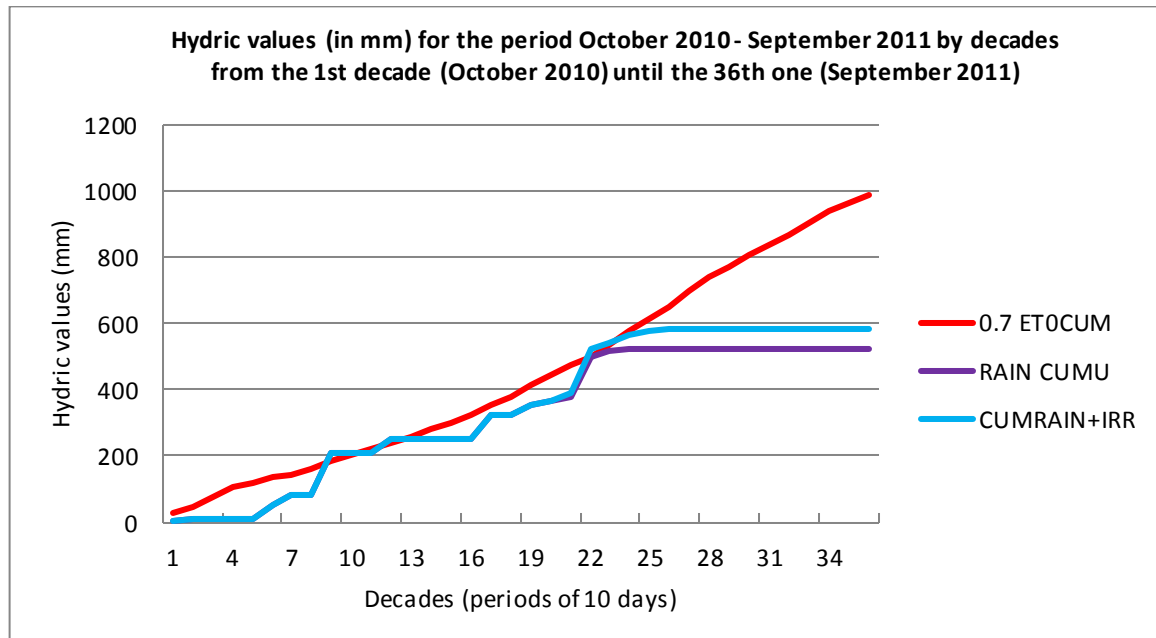


Figure 2. Hydric values on the basis of $K_c = 0.7$ and taking into account rainfall and irrigation. Agadir area, 2010–2011 season. (RAIN CUMU = cumulative rainfall; CUMRAIN+IRR = cumulative rainfall + irrigation).

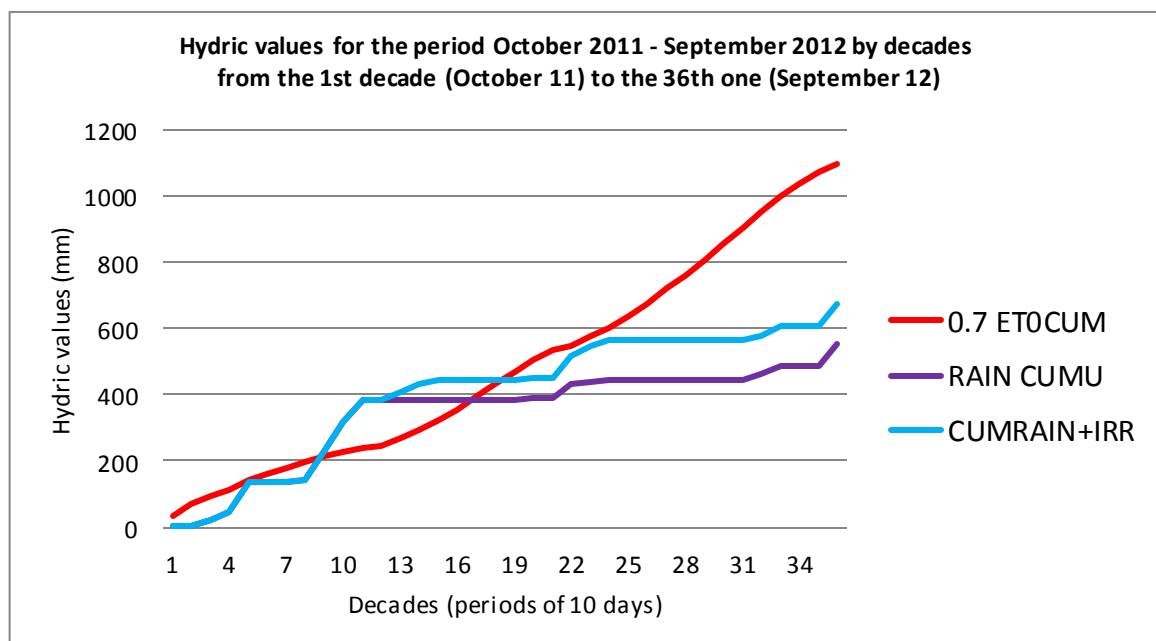


Figure 3. Hydric values on the basis of $K_c = 0.7$ and taking in account rainfall and irrigation. Agadir area, 2011–2012 season. (RAIN CUMU = cumulative rainfall; CUMRAIN + IRR = cumulative rainfall + irrigation).

Effects of irrigation treatments on the fruit quality in the 1st year and in 2nd year of experimentation

Fruit analytical characteristics were recorded for the two years, and are summarised in Table 7. In the second year experiments, the amount of juice in fruit was higher in irrigated treatments; the content of total sugars and the titratable acidity of fruit were lower. Brix value of fruit juice and pH were not affected by the irrigation regime in the subsequent year.

Table 7. Effects of the irrigation treatments on fruit organoleptic characteristics of the three cactus pear cultivars ('Achefri', 'Aïssa' and 'Moussa') for 2011 and 2012.

Organoleptic Compounds		'Achefri'			'Moussa'			'Aïssa'		
		T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
The rate of juice (%)	2011	71,23±1	69,06±2	72,18±2	71,14±1.5	69,61±2.5	70,35±2.5	70,44±2.5	71,44±1	71,45±1
	2012	63,85±1	72,16±1.75	67,04±2	63,85±1	70,84±2	67,20±1	-	-	-
Total sugars (%)	2011	48,49±2	49,26±2	54,55±1.75	67,05±2.25	56,78±1.75	55,86±1.75	52,47±2	51,87±1.75	56,56±2
	2012	63,68±3	44,06±2.5	57,99±2.25	62,33±2.70	61,70±2.25	59,46±2.5	-	-	-
Titrable acidity (g/l)	2011	0,51±0.03	0,63±0.03	0,41±0.03	0,54±0.03	0,45±0.03	0,57±0.03	0,61±0.03	0,68±0.03	0,71±0.03
	2012	0,69±0.05	0,45±0.06	0,50±0.06	0,85±0.06	0,78±0.06	0,68±0.06	-	-	-
Dry matter of the juice (%)	2011	4,36±0.04	4,38±0.04	4,49±0.05	4,35±0.03	4,41±0.02	4,12±0.04	4,35±0.03	4,42±0.04	-
	2012	4,46±0.02	4,43±0.02	4,40±0.10	4,38±0.02	4,36±0.01	4,37±0.02	-	-	-
°Brix	2011	13,90±0.75	13,36±0.75	14,04±0.80	13,98±0.70	13,40±0.70	14,06±0.80	13,40±0.70	13,90±0.65	14,26±0.70
	2012	14,43±0.80	12,40±0.60	12,85±0.60	14,20±0.60	13,06±0.65	14,43±0.80	-	-	-
pH	2011	6,21±0.05	5,96±0.04	6,19±0.05	-	6,12±0.05	-	6,10±0.04	5,89±0.05	6,19±0.05
	2012	6,03±0.07	5,99±0.06	6,10±0.07	6,13±0.08	5,67±0.06	5,99±0.07	-	-	-

The results regarding fruit quality are similar to those reported by most authors (Van Der Merwe *et al.*, 1997; Gugliuzza *et al.*, 2002). Irrigation had a positive effect on fruit size (fruit weight, fruit length and diameter). However, supplemental irrigation had no significant effect on fruit biochemical quality. This confirms the observations of Mulas and D'hallewin (1997) and Gugliuzza *et al.* (2002), who concluded that irrigation did not significantly affect fruit quality. Our results confirm the results of Barbara (2007) who found that irrigation decreased the degree Brix due to dilution effect.

CONCLUSIONS

The results of our experiments showed both the interest and the limits of supplemental irrigations during the flowering and fruit growth phases. Some irrigation treatments have much increased the yields, depending on the variety and on the year of experiments. In the first year experiments, irrigations did not have a positive effect on the yields. In the second year experiments, a late irrigation during the fruit growing phase had an-

important positive effect on yields. A two watering regimes (at flowering and during fruit growing phases) has shown supplemental effectiveness for one variety only. All the irrigations regimes maintained or improved fruit quality. These results are similar to those obtained by Mulas and D'hallewin (1997) and Van Der Merwe *et al.* (1997). In our experimental conditions, even irrigation at modest doses had marked effects on fruit yield when it was applied after flowering and during the fruit growth stage. Supplemental irrigation is of clear benefit, if it is appropriately supplied, i.e., taking into account a simplified hydrous balance, which easily allows to avoid water losses or harmful effects to the crop. Varietal reactions would merit more attention in relation to climate and to irrigation.

As reported by several authors (Ghassemi et al, 2013; Liguori et al., 2013), the hydric effect on cactus pear also is the improvement of the CO₂ intake and the increase in biomass by increasing the content of water in pads, the sizes of pads (length, diameter and thickness) and the number of new growths. The beneficial effect of irrigation on the emission of shoots in the three varieties is clear in the second year experiments where the number of emitted shoots/cladode was higher in irrigated treatments of the three varieties (0.15-0.50 shoots/cladode) than in not irrigated treatment of these varieties (0.07-0.10 shoots/cladode). Without forgetting that the emission of shoots is more important in two years and more old cladodes than in one year old cladodes. For 'Achefri' for example, in the second year experiments, the emission of shoots in two years and more old cladodes of irrigated treatments was 0.75-1.0 growths/cladode *vs* 0.35-0.50 in one year old cladodes of these treatments. In the first year experiments, irrigation did not modify the emission of shoots between the irrigation treatments of all varieties because irrigation coincided with rains in March-May when the emission of shoots is important in these varieties

Acknowledgements: *The authors wish to thank the Belgian technical cooperation (BTC) and Agrotech Souss Massa Draa for their financial support and all the people who contributed to the realization of this study.*

REFERENCES

Allen, R.G., Peirera, L.S., Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). FAO irrigation and drainage paper 56.

Arba, M., 2009. Le cactus opuntia une espèce fruitière et fourragère pour une agriculture durable au Maroc. In: Bouaziz, A., Choukr-Allah, R., Mrabet, R. and Falisse, A. (Editors) Actes du Symposium

- International AGDUMED. Durabilité des systèmes de culture en zone méditerranéenne et gestion des ressources en eau et en sol. Cana Print, Rabat, Maroc. p. 215-223.
- Barbara, K.M., 2007. Characterization of cactus pear germplasm in South Africa. A thesis of Philosophiae Doctor. Faculty of Natural and Agricultural Sciences, University of the Free State, South Africa.
- Chessa, I. and Nieddu, G. 1997. Descriptors for cactus pear (*Opuntia spp.*). FAO Cactusnet Newsletter special issue. Tipografia moderna, Sassari, Italy.
- Consoli, S., Inglese, G. and Inglese, P. 2013. Determination of evapotranspiration and annual biomass productivity of a cactus pear [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.] orchard in a semiarid environment. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 139(8): 680-690.
- De Wit, M., Nel, P., Osthoff, G. and Labuschagne, M.T. 2010. The effect of variety and location on cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) fruit quality. Plant Foods for Human Nutrition 65(2): 136-145.
- Felker, P. and Inglese, P. 2003. Short-term and long-term research needs for *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. utilization in arid areas. Journal of Professional Association for Cactus Development, 7: 131-152.
- Felker, P., Soulier, C., Leguizamon, G. and Ochoa, J. 2002. A comparison of the fruit parameters of 12 *Opuntia* clones grown in Argentina and the United States. Journal of Arid Environments, 52: 361-370.
- Ghasemi, S., Ramezani, M. and Mirmiam, S.M. 2013. The effect of various water application strategies on cladode development of *Opuntia ficus-indica*. J. Agr. Food Techn. 3(7): 1-4.
- Gugliuzza, G., Inglese, P. and Farina, V. 2002. Relationship between fruit thinning and irrigation on determining fruit quality of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) fruits. Acta Horticulturae, 581: 205-209.
- Inglese, P., 2010. Cactus pear *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. for fruit production: An overview. FAO Cactusnet Newsletter special issue 12.
- Lazzara, P. and Rana, G. 2010. The crop coefficient (*Kc*) values of the major crops grown under Mediterranean climate. Mediterranean dialogue on integrated water management, Inco-Med Project.
- Le Houérou, H.N., 2002. Cacti (*Opuntia spp.*) as a fodder crop for marginal lands in the Mediterranean basin. Acta Horticulturae, 581: 21-46.
- Liguori, G., Inglese, G., Pernice, F., Sortino, G. and Inglese, P. 2013. CO₂ uptake of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. whole trees and single cladodes, in relation to water status and cladode age. Italian Journal of Agronomy, 8(1): 14-20.
- Mulas, M. and D'hallewin, G. 1997. Fruit quality of four cactus pear (*Opuntia ficus-indica* Mill.) cultivars as influenced by irrigation. Acta Horticulturae, 438: 115-122.
- Nefzaoui, A. and Bensalem, H. 2000. *Opuntia*: A strategic fodder and efficient tool to combat desertification in the WANA region. FAO Cactusnet Newsletter special issue.
- Nobel, P.S., 2002. Cacti: Biology and uses. University of California Press, California.
- Nobel, P.S. and Bobich, E.G. 2002. Environmental biology. In: Nobel P.S. (Editor): Cacti: Biology and uses. University of California Press, California. p. 57-74.
- Potgieter, J.P., 2007. The influence of environmental factors on spineless cactus pear (*Opuntia spp.*) fruit yield in Limpopo Province. PhD thesis. University of the Free State, Bloemfontein, South Africa.
- Van Der Merwe, L.L., Wessels, A.B. and Ferreira, D.I. 1997. Supplementary irrigation for spineless cactus pear. Acta Horticulturae 438: 77-82.

Chapitre 7

Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on fruit yield and quality of cactus pear *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.

Ce travail a fait l'objet de la publication suivante:

Arba, M., Falisse, A., Choukr-Allah, R. and Sindic, M. 2017. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on fruit yield and quality of cactus pear *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. Article publié à la revue internationale Fruits, vol 72(4) (Juillet-Août 2017), p. 212-220. <https://doi.org/10.17660/th2017/72.4.3>.

Summary

Introduction – In order to optimise the nitrogen (N) and phosphorus (P) fertilization of cactus pear in arid regions, we decided to determine its effects on the yield and fruit quality as well as on the plant phenology. *Materials and methods* – Five N-P dressings were compared on the spineless cv. Moussa in the Agadir area: 0–0, 0–80, 40–40, 60–0, and 60–80 (in kg N ha⁻¹ – kg P₂O₅ ha⁻¹) over two consecutive growing seasons (2011 and 2012). Yield components and physico-chemical characteristics of the fruit were recorded at harvest. *Results and discussion* – Although in 2011 the applications of N and P had no effect on fruit yielding, in 2012 the dressings 60N or 80P alone increased the yield by +3.0 and 6.1 kg plant⁻¹, respectively, compared with the control. Combining both N and P at the same rate resulted in a maximum yield of 14.9 kg plant⁻¹. Fertilization had positive effects on flowering rates, fruit size and fruit number, and did not modify the content of pulp, the juice content, peel thickness, the juice dry matter, the pH, titratable acidity, total sugars and soluble solids. It also did not modify the dates of flowering and of ripening. Nitrogen dressings significantly increased the number of emitted buds and emitted shoots on one-year cladodes by four fold. *Conclusion* – Relevant N-P fertilization significantly improved fruit yield, the number of fruits per plant and fruit size in particular. Long term and postharvest effects shall be further studied.

Keywords: Morocco, cactus pear, *Opuntia ficus-indica*, agronomic yield, crop management, fruit quality, phenology

Significance of this study

What is already known on this subject?

- Studies on mineral fertilization of cactus pear were carried out in some countries where cactus pear is cultivated. Several authors reported that mineral fertilization increased fruit yield, but some of them have indicated that fruit quality could be affected by fertilization.

What are the new findings?

- Obtained results showed that nitrogen and phosphorus mineral fertilization improved fruit yield, mainly fruit size (weight and dimensions). Fruit quality was not significantly affected. Mineral fertilization also increased the emission of buds and of shoots.

What is the expected impact on horticulture?

- Understanding the effects of nitrogen and phosphorus mineral fertilization on fruit yield and quality of cactus pear. The improvement of cactus pear managing practices, mainly the application of fertilizers, pruning and harvesting. The improvement of the socio-economic life of the farmers and the rural populations in the arid and semi-arid regions, notably in Morocco.

Résumé

Effets de la fertilisation azotée et phosphorique sur les composantes de rendement et la qualité des fruits du figuier de Barbarie *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.

Introduction – La fertilisation azotée (N) et phosphorique (P) du figuier de Barbarie a besoin d'être optimisée en zone aride. Cette étude vise à en évaluer les effets sur le rendement et la qualité des fruits et à en décrire les effets sur la phénologie de la plante.

Matériel et méthodes – Cinq fumures N-P ont été comparées pendant deux années sur la variété inerme 'Moussa' dans la région d'Agadir: 0–0, 0–80, 40–40, 60–0, et 60–80 (en kg N ha⁻¹ – kg P₂O₅ ha⁻¹). Les composantes du rendement et les caractères physicochimiques des fruits ont été enregistrés à la récolte.

Résultats et discussion – En 2011, les différents niveaux de fertilisation n'ont pas eu d'effet sur le rendement alors qu'en 2012, l'interaction entre N et P était très significative. En comparaison avec le témoin, l'apport de 80P ou de 60N a augmenté le rendement de +3,0 et +6,1 kg plante⁻¹, respectivement, et le traitement 60N + 80P de +14,9 kg plante⁻¹. Les traitements fertilisants ont eu des effets positifs sur le nombre de fleurs et le nombre de fruits formés, ainsi que sur le calibre des fruits; en revanche, ils n'ont pas eu d'effet significatif sur la teneur en pulpe et en jus de fruits, l'épaisseur du tégument, la teneur en matière sèche du jus, le pH, l'acidité titrable, les sucres totaux et matières sèches solubles. Ils n'ont pas nettement modifié les dates de floraison et de maturation des plantes. Cependant, l'apport d'azote a augmenté le nombre de bourgeons émis par cladode et le nombre de pousses sur les cladodes d'un an, jusqu'à le multiplier par 4 environ. *Conclusion* – Une fertilisation N-P appropriée permet d'améliorer de façon significative le rendement en fruits des cultures de figuier de Barbarie en condition aride, en particulier le nombre de fruits par plante et le calibre des fruits. Les effets dans la durée et en post-récolte doivent encore être étudiés.

Mots-clés : Maroc, figuier de Barbarie, *Opuntia ficus-indica*, rendement agronomique, gestion de la production, qualité du fruit, phénologie

Introduction

The growing market demand for cactus pear fruits is pushing producing countries to increase their surface areas devoted to this crop and its productivity. Therefore, new plantations of cactus pear are increasing in several Mediterranean countries (Nerd and Mizrahi, 2010; Inglese, 2010; FAO, 2013) and particularly in Morocco. However, the recorded yields in Morocco are still very low due to extensive cultivation and almost no application of mineral fertilization.

Cactus pear is cultivated since a long time in Morocco for its edible fruits and its pads as fodder for cattle. The area occupied by cactus pear evolved in a remarkable way during

these last decades to reach currently more than 120,000 ha. Thousands hectares of aligned plantations with a density of plantation of 1,000 plants ha⁻¹ (5 m between rows × 2 m between plants) devoted to fruit production and fodder for cattle are carried out in the areas of cactus pear within the framework of the Moroccan Green Plan. The production of cactus pear in Morocco is still traditional, the techniques of production are still empirical and crop production and fruit quality are weak. The production is sold at low prices on the local market and the possibility of exporting fresh fruits with a great size is scarce. The development of this crop in Morocco requires an improvement of the cultural practices, mainly the irrigation and the mineral fertilization, subject of the current article, with aim to improve the yield and fruit quality and to ensure a good selling price on the local and overseas market.

Several authors have shown a positive effect of fertilization on fruit yield and fruit quality (Inglese, 2010; Ochoa and Uhart, 2006; Mimouni *et al.*, 2013; Jorge Zegbe *et al.*, 2014). Application of nitrogenous and phosphoric fertilizers at 120 kg N ha⁻¹ and 100 kg P₂O₅ ha⁻¹ on an 8-year old plantation of cactus pear increased fruit yield by more than 80% in comparison with non-fertilized plants (Inglese, 2010). Claassens and Wessels (1997) reported that the best fruit yield from a 4-year old plantation of cactus pear was obtained with the application of a N-P fertilizer with 60N (kg N ha⁻¹) and 16P (kg P₂O₅ ha⁻¹); however, no effect on fruit quality was recorded under this fertilization. Jorge Zegbe *et al.* (2014) reported that the application of 90N, 30P and 30K (kg K₂O ha⁻¹) on an adult plantation of cactus pear during three consecutive seasons increased fruit yield significantly: 9.6 t ha⁻¹ in year 1, 13.1 t ha⁻¹ in year 2 and 21.6 t ha⁻¹ in year 3. This mineral fertilization had however, no effect on fruit quality and the application of potassium alone had no effect on fruit yield (Jorge Zegbe *et al.*, 2014).

On a 7-year old plantation of cactus pear, Ochoa *et al.* (2006) showed that the application of a nitrogenous fertilizer increased fruit yield significantly. In the second cropping season fruit yield was 1,346 g m² on plants receiving 100 to 150 kg N ha⁻¹ against 594 g m² for the control without N. However, fruit weight was higher in the treatment without N (27.1 g in dry weight) than in the treatments receiving N. Mimouni *et al.* (2013) showed that application of an [N-P-K-Mg] fertilizer on 14 selected productive ecotypes increased the fruit yield by more than 27% and had a positive effect on the fruit quality of these ecotypes.

Karim *et al.* (1998) reported that application of a nitrogenous fertilizer combined with phosphorus and potassium at a rate of 100 kg ha⁻¹ for each element on a 3-year old plantation of cactus pear had no significant effect on fruit yield and fruit quality, but significant correlation existed between fruit yield and the contents of cladodes tissue in mineral elements. Galizi *et al.* (2004) also noted the absence of effects on fruit yield and fruit quality with application of an [N-P-K-Mg] fertilization of 100-50-100-50 kg ha⁻¹ on an 8-year-old plantation of cactus pear with a density of 4 × 4 m. These results could be due to the high fertility of the soil.

Fruit quality is a complex concept evaluated on the basis of the appearance of fruit on the market (Barritt, 2001), mainly fruit size and color (FAO, 2013; Callahan, 2003). In Italy, cactus pear fruits are classified into five sizes: extra (>200 g), great (151 to 200 g), medium (121 to 150 g), small (80 to 120 g) and very small calibre (<80 g) (Chessa and Nieddu, 1997). In South Africa, the varietal evaluation for a commercial product based on the following minimal criteria: fruit weight >140 g, total soluble solids (TSS) >13 °Brix, percentage of pulp >50% and peel thickness <6 mm (Potgieter, 2007; De Wit *et al.*, 2010). Karababa *et al.* (2004) and Bekir (2006) suggested that the size and weight of cactus pear fruit are influenced by locality, season and environment. Fruit quality is also influenced by orchard management and may change from year to year (Ochoa *et al.*, 2006; Mokoboki *et al.*, 2009). Whereas Felker *et al.* (2002) reported that fruit size was not determined by environmental or edaphic factors, but genetic factors. The chemical composition of fruit determines its global quality. Thus, in cactus pear, fruit quality is evaluated on the basis of its color, weight and contents of the pulp and sugars (FAO, 2013) and in edible fresh matter (Mashope, 2007). Maataoui-Belabbes and Hilali (2004) reported TSS = 11.9 °Brix, pH = 5.9 and a titratable acidity (TA) of 0.02% in a fruit juice of prickly pear with a yellow orange color, and Arba and Sharoua (2013) reported a juice rate of 49.9 to 57.3%, TSS of 12.3 to 12.5 °Brix and TA of 0.041 to 0.069% in the var. Mles [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.] and Draibina [*O. megacantha* Salm-Dyck] grown in the central area of Morocco. In clones of *Opuntia* with fruit of various color, TSS of the edible core varied from 7.5 to 13.8 °Brix, TA from 0.01 to 0.30% and pH from 4.3 to 6.1 (FAO, 2013).

The first objective of our study is to evaluate the effects of nitrogen and phosphoric mineral fertilization on fruit yield and fruit quality in order to have a scientific basis for

advising the cactus pear producers. The second objective is to describe the possible effects of the N-P fertilization on the morphological development of the plants by monitoring the growth phases, including the dates of the different stages such as floral bud emission, flowering or fruit maturation. Our first hypothesis is that N-P fertilization could modify the time for ripening – by earliness or lateness – offering some commercial advantage. Our second hypothesis is that mineral fertilization would stimulate an intense renewal of cladodes, the young cladodes being more prolific in fruit.

Materials and methods

The site of trials and plant material used in the study

Our studies were carried out at the experimental station of the Hassan II Institute of Agronomy and Veterinary Medicine, Horticultural Complex of Agadir, located at 17 km in the South East of Agadir city, latitude 30°36' North and longitude 9°36' East and 32 m altitude. The site of experiment is characterized by mean monthly temperatures ranging from approximately 8 °C in January to 31 °C in July, with maximum daily temperature reaching 45 °C in June-August.

Experiments were set in an orchard planted in 1998 with cactus pear (*O. ficus-indica* (L.) Mill., cv. Moussa) where plant spacing was 3 × 1 m apart. The cv. Moussa is a spineless variety of *Opuntia ficus-indica* with yellow-orange fruit at maturity.

The soil of the experimental site has a sandy silt texture with 18.51–23.30% coarse sand, 30.00–34.70% fine sand, 18.60–22.09 coarse silt, 19.96–21.45% fine silt and 5.45–7.45% clay. The chemical composition of the soil prior to the application of fertilizers was as follows: poor in available nitrogen (4.5–12.4 ppm), medium in available P (0.094–0.168‰), good or high in Ca (1.456–3.360‰), in K (0.347–0.694‰) and in Mg (0.260–0.940‰). The content of soil in organic matter was low to passable, the electrical conductivity (at 25 °C) was passable (0.13–0.16 mmhos cm⁻¹) and the pH (at 1:2.5 soil:water) was average to alkaline (8.4–8.6).

The experimental design

The following N-P combinations of nitrogen (N) and phosphorus fertilizer (P₂O₅) as units (kg ha⁻¹) were applied: T1: 0–0; T2: 0–80; T3: 40–40; T4: 60–0; and T5: 60–80.

The experimental design was a complete randomized block with 4 blocks, each containing the 5 plots or experimental units corresponding to the fertilization treatments. Fertilizer doses in soluble form were injected in the irrigation system. They were applied once a week during the period of flowering when all the experimental plots received irrigation. Thirty mm irrigation water were applied at a rate of 4 mm per application during the period of April–May 2011, and 60 mm were applied at a rate of 8 mm per application during February 2012.

Fruit yield was determined based on the production of 2 plants per fertilization treatment and per block, which means 8 plants by treatment. It was expressed in kg fruit plant⁻¹ or kg ha⁻¹ considering a density of planting of 3,300 plants ha⁻¹.

Physico-chemical analyses of the fruits

The evaluation of fruit quality was related to (i) fruit size: fruit and pulp weight, peel weight, fruit dimensions (fruit length and diameter at mid-length) (ii) the organoleptic and chemical characteristics of the fruit: the content of juice, soluble solids (in °Brix), titratable acidity, pH, total sugars and dry matter in the juice. The physical measurements were done on a sample made of 20 fruits per treatment and per block. The analytical qualitative features were determined on an average sample made of 5 to 6 mixed fruits per treatment and per block.

The content of juice is the percentage of juice contained in the fruit pulp; it was determined by separating pulp from the peel. The juice is extracted from the pulp by grinding and centrifugation (1 min) and juice collection (1 min). The measure was recorded 3 times per juice sample of fertilization and block.

The measurement of the juice pH was done by potentiometric method using a pH-meter calibrated on pH-4 and pH-7 buffer solutions. The measurement was done three times by fertilization treatment and by block on agitated fruit juice.

The titratable acidity was determined by the volume of solution of NaOH 0.111 N necessary to make fire the solution of juice to a pH of 8.1. It is expressed in g L⁻¹ citric acid. Measurement was repeated three times at least per treatment and per block. The TSS was determined by using a digital refractometer (ATAGO DBx 55, Japan). Measurement was repeated 5 times for each treatment of fertilization and per block. To

determine the dry matter content of the juice, a 100 ml beaker containing a glass rod and about 25 g sea sand washed with sulfuric acid was placed in an oven at 70 °C for at least 30 min and weighed after cooling in a desiccator. A test sample of approximately 5 g of juice was added into the beaker. Using the glass rod, the sample was homogenized with the washed sea sand with sulfuric acid then the set was placed in an oven at 70 °C for 24 h and weighed after the beaker was cooled in a dryer until it returned to room temperature. The dry matter content of the juice is computed as follows:

$$\text{DM\%} = 100 \times (m_2 - m_0) / (m_1 - m_0)$$

where m_0 is the mass of the beaker with glass rod and washed sea sand, m_1 is $m_0 + 5$ g of juice before drying and m_2 is m_1 dried in the oven after homogenizing the sample of juice with sea sand. The measurements were replicated 3 times per treatment and per block.

The analysis of sugars was realized according to AOAC methods (AOAC, 2002). Total sugars were proportioned after freeze-drying of the juice and hydrolysis with hydrochloric acid. The hydrolyzed solution was neutralized by a concentrated solution of sodium hydroxyde and deproteinized with the solutions of Carrez I-II. According to the sugar content of the product an aliquot of filtrate was added to the reactants of Bertrand I and II and the mixture was brought to boiling and then cooled rapidly. After decanting, the supernatant liquid (blue) was vacuum filtered in as interred glass crucible and the precipitate was washed several times with freshly boiled water. The copper oxide precipitate was then dissolved with a ferric solution, rinsed and titrated with a potassium permanganate solution (permanent pink color). Titration was repeated twice per treatment of fertilization and block.

The phenology of flowering and fruiting of the plants

To study the effects of the mineral fertilization on the phenology of the plants during the two successive years, 10 one-year-old cladodes per plot (treatment and block) have been selected and labeled. These cladodes were monitored about every ten days from buds emission (February) until end of fruit maturation (September), via the shoots emission and flowering stages.

Statistical analyses

Statistical analyses of data consisted mainly of analyses of variance (ANOVA) and when the values are different at a level of probability ($P < 0.05$) the least significant

difference (LSD) between these values was computed. The intensity of the relation existing between two variables at a level of probability was assessed by the coefficient of correlation.

Results and discussion

The results obtained during the two seasons (2010/2011 and 2011/2012) are presented in two sections, the effects of fertilization (i) on fruit yield and fruit quality and (ii) on the phenology of flowering and fruiting.

Fruit yield and quality

Fruit yields for the two years of production are displayed in Table 1. Plants of the control (T1) without any fertilizer recorded similar yields (16.5 kg plant⁻¹) for the two years. In 2011, fertilization treatments had minor effects on the yield, the only significant difference being recorded between T3 (40–40) and T5 (60–80). The absence of significant effects in the first year can be related to late application of the fertilizers during the crop cycle and the high vegetative growth of the 14-year old plants.

Table 1. Effect of five N-P dressing treatments (T1–T5) on cactus pear (cv. Moussa) fruit yield (kg plant⁻¹) over two years in Agadir area, Morocco.

Years	N-P	T1	T2	T3	T4	T5	F-test	Lsd (<i>P</i> < 0.05)
		0-0	0-80	40-40	60-0	60-80		
2011		16.52±2.20	14.64±1.65	13.46±1.10	17.37±1.15	19.59±1.25	*	4.67
2012		16.49±2.10	19.44±2.40	21.19±2.40	22.54±2.50	31.26±2.50	**	5.26

(*): significant difference at *P* < 0.05; (**): significant difference at *P* < 0.01.

(Lsd): least significant differences at the corresponding level of significance.

(In bold): values that are significantly different (at *P* < 0.01 level) from the T1 value in 2012.

In 2012, fertilizations had significant effects on the yields, in particular for treatments T4 (60N-0P) and T5 (60N-80P). Our data analysis highlighted a significant interaction between the two elements nitrogen and phosphorus: in fact, the control treatment that received no fertilization recorded the lowest yield, while applying 80P increased the yield by +3.0 kg and applying 60N increased it by +6.1 kg. The simultaneous application of 60N + 80P had a significant effect on the yield with an increment of +14.9 kg, showing a positive interaction evaluated at 5.8 kg plant⁻¹. Similar results have also been reported by several authors who showed that mineral fertilization, in particular nitrogenous and phosphoric, has a positive effect on fruit yield (Inglese, 2010; Ochoa

and Uhart, 2006; Mimouni *et al.*, 2013; Jorge Zegbe *et al.*, 2014; Claassens and Wessels, 1997). The effect of N appears more pronounced than that of P. The main reason is due to the fact that nitrogen is well known for its rapid and intense action on the yield. However, P has a weaker effect on yield except in severe primary deficiency in the soil. In addition, phosphorus has typically a slower mobility in the soil and in the plant, and could be subject to immobilization in calcareous or alkaline soil (the content of CaCO₃ in the soil of the experiment site can reach 6.5% and the pH = 8.4–8.6). Finally, the mobility of P-ions in the plant is slower than that of N-ions. The existence of a positive interaction between N and P – at least at the low doses studied – opens the way to a finer study for optimising N-P fertilization.

As Galizzi *et al.* (2004) reported that the K and Ca content of cactus pear fruits and pads are higher than other fruits and vegetables and despite several other authors reported that the application of K fertilizer had no effect on fruit yield of cactus pear (Jorge Zegbe *et al.*, 2014; Claassens and Wessels, 1997) it could have been possible that the plants requirements for Ca and K nutrients were not met. A chemical analysis of one year pad tissues collected in October 2013 showed that the nutrient contents of pads in T5 were (in g kg⁻¹ for each of the nutrients): N = 10.5, P = 1.3, K = 30.0, Na = 0.4, Ca = 52.2 and Mg = 9.5. The chemical composition of the non-fertilized control (T1) was (in g kg⁻¹): 9.8, 1.2, 28.0, 0.3, 46.7 and 9.8, respectively. The best mineral nutrient concentrations for maximum fruit yield in cactus pear according to Valdez-Cepeda *et al.* (2013) were (in g kg⁻¹): N = 11.4 ± 5.2; P = 3.4 ± 0.7; K = 42.3 ± 8.6; Ca = 42.5 ± 14; and Mg = 16.2 ± 4.4. Thus, in our case, all the optimum nutrient concentrations were reached with T5 as well as with the control (T1), except for P with a slightly weak content for T1 (1.2 g kg⁻¹) as well as for T5 (1.3 g kg⁻¹) when the limits of confidence according to Valdez-Cepeda *et al.*(2013) are between 2.0 and 4.8. Analytical results on other secondary elements and microelements (Na, Mn, Cu, Fe, Zn) (not detailed here) showed the absence of any deficiency in these elements. All these results confirm that aside nitrogen, phosphorus is the right nutrient to give a priority.

Although in 2011, mineral fertilization had no significant effect on the average fruit weight (Table 2), in 2012 however, a positive effect on the fruit weight was recorded (Table 3) contributing greatly to the recorded yield increases. The number of fruits was

also very significantly correlated with the yield (Table 4). Both components (number and weight) explained in a similar intensity the recorded fruit yields.

Table 2. Effect of five N-P dressing treatments (T1–T5) on cactus pear (cv. Moussa) fruit size in 2011 in Agadir area, Morocco.

Fruit size parameters	N-P	T1	T2	T3	T4	T5	ANOVA
		0-0	0-80	40-40	60-0	60-80	
Fruit weight (g)		132±4	142±4	142±4	134±3	146±4	ns
Pulp weight (g)		73±2.0	76±1.5	76±1.4	72±1.4	79±1.3	ns
Peel weight (g)		62±1.8	68±1.6	68±1.8	63±1.8	70±2.0	*
Pulp:fruit ratio (%)		55±2.9	54±2.4	54±2.4	54±2.4	54±2.4	ns
Fruit length (cm)		7.3±0.2	7.4±0.3	7.6±0.2	7.4±0.2	7.5±0.3	ns
Fruit diameter (cm)		5.3±0.1	5.3±0.1	5.4±0.2	5.2±0.2	5.5±0.2	ns
Peel thickness (mm)		1.8±0.1	2.1±0.1	2.2±0.1	2.0±0.1	2.1±0.1	ns

(*): significant differences at $P < 0.05$; (ns): no significant difference.

Table 3. Effect of five N-P dressing treatments (T1–T5) on cactus pear (cv. Moussa) fruit size in 2012 in Agadir area, Morocco.

Fruit size parameters	N-P	T1	T2	T3	T4	T5	ANOVA
		0-0	0-80	40-40	60-0	60-80	
Fruit weight (g)		121±5	160±8	150±6	148±5	176±8	**
Pulp weight (g)		65±4	87±5	81±5	81±5	95±5	**
Peel weight (g)		56±4	72±3	69±4	69±4	78±3	*
Pulp: fruit ratio (%)		55±2.9	54±2.4	54±2.4	54±2.4	54±2.4	ns
Fruit length (cm)		7.1±0.3	7.8±0.4	7.7±0.4	7.7±0.4	8.3±0.5	*
Fruit diameter (cm)		5.0±0.1	5.6±0.2	5.5±0.1	5.4±0.2	5.8±0.2	*
Peel thickness (mm)		1.8±0.1	2.0±0.1	2.2±0.1	2.2±0.1	1.9±0.1	ns

*: significant differences at $P < 0.05$; ns: no significant difference.

Table 4. Effect of five N-P dressing treatments (T1–T5) on cactus pear (cv. Moussa) fruit yield components in 2012 in Agadir area, Morocco.

Fruit yield components	N-P	T1	T2	T3	T4	T5	R ² (3)
		0-0	0-80	40-40	60-0	60-80	
Fruit yield (kg plant ⁻¹)		16.49±2.10	19.44±2.40	21.19±2.40	22.54±2.50	31.26±2.50	
Fruit weight (g)		121±5	160±8	150±6	148±5	176±8	0.84
Number of fruits plant ⁻¹ (1)		136±8	122±9	141±8	152±8	178±8	0.90
Number of fruits per 10-cladodes (2)		82±6	78±6	89±5	105±4	107±5	0.81

(1) number calculated by the average fruit yield and average fruit weight relationship.

(2) observed number (see paragraph on phenology).

(3) coefficient of correlation with yield.

In 2012, fruit sizes resulting from fertilized plots were systematically higher than those of non-fertilized plots. For all treatments and in both years, the proportion of pulp in the total fruit weight was remarkably stable at 54–55%, and higher than what is reported as a quality standard (>50%). Peel thickness always lies between 1.8 and 2.2 mm. These results correspond to the standards of quality for commercial production in South Africa (Potgieter, 2007; De Wit *et al.*, 2010). According to the Italian classification system (Chessa and Nieddu, 1997), fruits from fertilized plots can be considered as large size fruits (151–200 g).

Even though we recorded an increase in the fruit yield and average fruit weight, fertilization did not modify the content of pulp in the fruit, nor the peel thickness (Tables 3 and 4).

The chemical analyses of fruits from the 5 treatments over two years indicate that fruits content 70 to 73% juice, with no significant difference between treatments or between years (Table 5). The dry matter of the juice ranged 4.07 to 4.60%, appearing slightly higher in 2011 than in 2012. The pH was significantly lower in 2012, and the titratable acidity was higher. Total sugar contents were higher in 2011 whereas the total soluble solid contents (TSS) were lower than in 2012, indicating these traits much sensitive to the environmental conditions.

Table 5. Effect of five N-P dressing treatments (T1-T5) on cactus pear (cv. Moussa) fruit organoleptic traits in 2011 and 2012 (Agadir area).

Organoleptic traits	Year of harvest	T1	T2	T3	T4	T5	ANOVA
Content of juice (%)	2011	73.28±3.40	72.12±3.70	69.57±3.40	73.49±3.70	70.83±3.30	ns
	2012	70.21±3.0	71.98±3.60	71.68±3.50	72.54±3.60	69.87±3.20	ns
pH	2011	6.14±0.06	6.27±0.03	6.21±0.02	6.24±0.02	6.02±0.02	ns
	2012	5.99±0.01	5.88±0.01	5.99±0.01	6.06±0.01	6.01±0.01	ns
Titratable acidity (g L ⁻¹)	2011	0.46±0.01	0.43±0.01	0.45±0.01	0.46±0.01	0.47±0.01	ns
	2012	0.50±0.06	0.83±0.07	0.81±0.07	0.75±0.08	0.83±0.06	*
Total soluble solids (°Brix)	2011	13.5±0.3	14.5±0.2	13.1±0.2	13.4±0.2	13.5±0.2	ns
	2012	14.4±0.1	14.4±0.1	14.0±0.1	14.3±0.1	14.2±0.1	ns
Total sugars (%)	2011	62.1±2.3	64.0±2	60.3±2.2	60.5±2.5	62.0±2.4	ns
	2012	54.8±1.5	49.9±1.5	58.0±1.8	53.1±1.6	53.1±2.1	ns
Dry matter content of the juice (%)	2011	4.40±0.04	4.43±0.03	4.60±0.04	4.51±0.04	-	ns
	2012	4.35±0.05	4.32±0.04	4.07±0.05	4.38±0.04	4.43±0.04	*

(ns): no significant difference; (*): significant difference at $P < 0.05$. (In bold): values that are significantly different.

Several authors also reported that fruit quality changes from year to year (Ochoa *et al.*, 2006; Mokoboki *et al.*, 2009). According to the varietal evaluation of the commercial

production in South Africa (Potgieter, 2007; De Wit *et al.*, 2010), the TSS contents of fruit during the two years were similarly >13 °Brix and met the commercial standards of quality. Fruit quality was mainly affected by the year, and applying mineral fertilizers to the crop had no significant effect on the fruit quality components (Table 5).

Effects of fertilization on the phenology of flowering and fruiting of plants

In the first year of observations, fertilization applied in April had no influence on the beginning of the phenological phases. Thus, the observations were aggregated for all the treatments and replications. They constitute a reference for the cv. Moussa, without applying any mineral fertilization.

In 2011 (Table 6) the vegetative and floral buds appeared from March 2 to June 8 (98 days) and the floral buds formed from March 11 to June 23 (104 days). The time for flowers to mature (stage anthesis) took 15 to 20 days after the formation of floral buds. A floral bud is considered formed when it takes a spherical form, which makes it easy to distinguish from a vegetative bud having a flattened form (Nerd and Mizrahi, 2010; FAO, 2013; Mashope, 2007; Arba *et al.*, 2015). The emission and formation of buds are important in April. Many authors have also indicated that in the Mediterranean region emission of the principal series of buds occurred in the spring, in March–April, when temperature rises and day length increases (Nerd and Mizrahi, 2010; FAO, 2013; Arba *et al.*, 2015; Reyes-Aguero *et al.*, 2006; Segantini *et al.*, 2010). The period when blossomed flowers appeared was long (110 days, from March 26 to July 14). It extended from the first blossomed flower appearance in a plot to the last blossomed flower appearance in the same or another plot (noted by numbering the blossomed flowers). Several authors have also confirmed the length of the blossoming period due to non-synchronization of flowering in cactus pear (Nerd and Mizrahi, 2010; FAO, 2013; Arba *et al.*, 2015; Reyes-Aguero *et al.*, 2006; Segantini *et al.*, 2010).

Table 6. Starting and ending dates of the growth phases of cactus pear (cv. Moussa) and their duration (in days) in 2011 (Agadir area).

Plant development phases	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sept	Oct	Duration (days)
Emission of vegetative and floral buds										98±7
Formation of floral buds										104±8
Flowering										110±8
Fruit maturation										94±7
Fruit development period (FDP)										142±8

The period of time between the early blossoming and the starting date of fruit maturation ranged from March 26 to June 18, and the period of fruit ripening was from June 18 to September 20 (94 days long). N-P fertilization had no significant effect on these dates. We did not observe any effect of fertilization, particularly N application, on the emission of a second series of flowers, which could result in late fruiting in autumn. This phenomenon of “re-flowering” has been observed by several authors (Nerd and Mizrahi, 2010; Inglese, 2010) when applying mineral fertilization after the summer harvest.

The fruit development period (FDP) is the time extending from the beginning of the formation of floral buds until fruit maturation (50% of fruits in maturity) (Mashope, 2007; Arba et al., 2015). In our study, the FDP was 142 days long.

In 2012, the phase of emission of vegetative and floral buds lasted about 100 days (from January 20 to April 30) and the floral bud differentiation period was very similar, with a minor shift of approximately 5 days (Figure 1). These two phases perfectly overlapped each other, the second starting with a few days of delay, and resulted in a number of formed floral buds representing 90 to 95% of the total buds. The number of vegetative and floral buds was significantly higher with N fertilization (12 floral buds per cladode for both T4 and T5) than without N fertilizer (fewer than 9 floral buds per cladode for both T1 and T2).

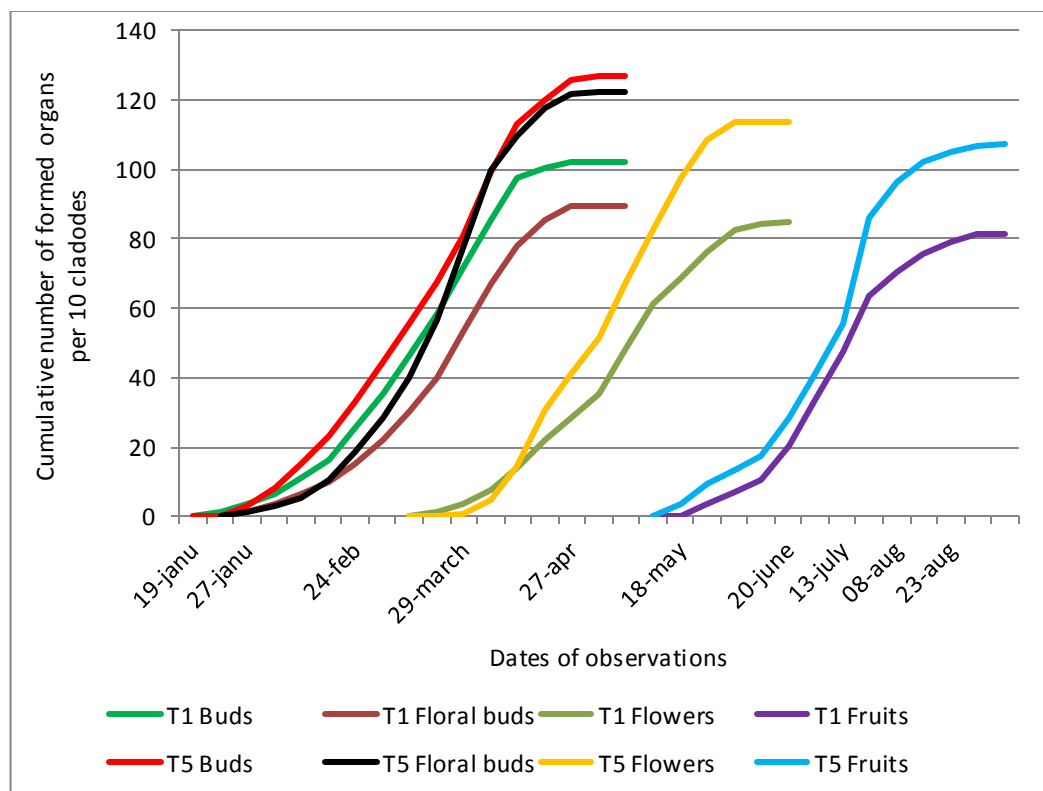


Figure 1. Phenology of cactus pear cv. Moussa in 2012 for N-P fertilization treatments T1 (0 – 0) and T5 (60 – 80) in Agadir area, Morocco. Data values are the cumulative numbers of organs per ten cladodes for each treatment.

The flowering phase began on March 10 and finished around June 10. This phase overlapped the bud emission phase which was 50 to 60 days long. Fertilization had no significant effect on the starting or ending dates of this phase, but significantly increased the total number of flowers formed, whereas the proportion of flowers in comparison to floral buds was not modified (Figure 2).

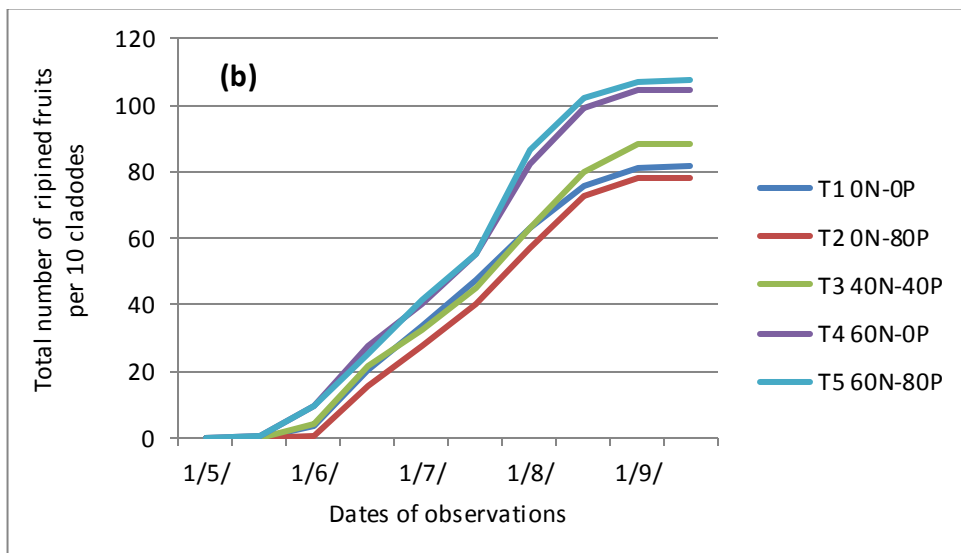
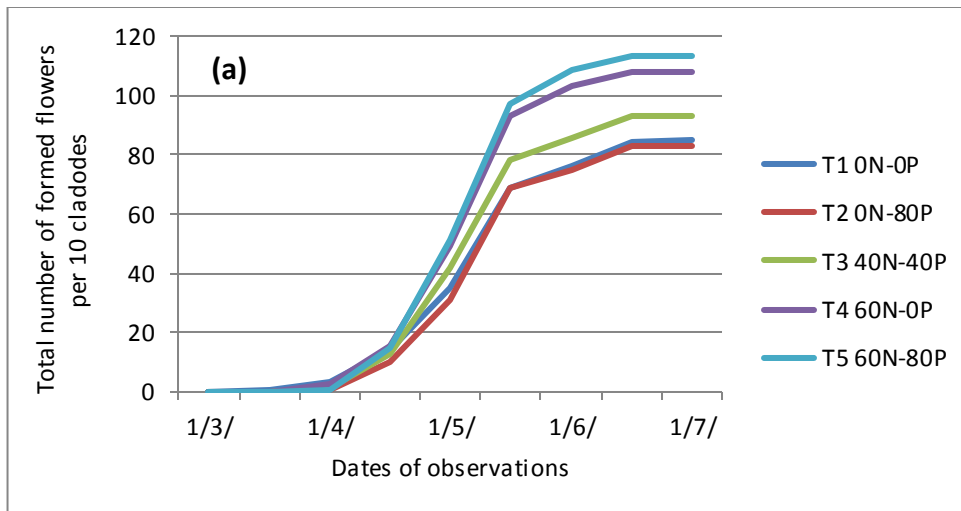


Figure 2. Flowering (a) and fruit ripening (b) phases of cactus pear cv. Moussa for the five N-P fertilization treatments in 2012.

The fruit ripening phase has been around 120 days long. It started slowly from May 10 to June 10, then speeds up until August 1 and continued until early September. It can be considered that the period of “full production” is situated between the beginning of June and the end of August, representing approximately 90 days. Fertilization had no significant effect on these dates, neither in precocity, nor in lateness, although it had a highly significant effect on the number of fruits formed.

For all the fertilization treatments FDP was 180 days long, extending from February 1 until July 30. It was longer and earlier than in 2011 (duration: 142 days; starting date: March 11). In 2012, as in 2011, fertilization had no significant effect on the FDP.

The highest yields recorded in the complete N-P fertilization treatments are particularly related to the highest daily rate of fruit maturation during the following two periods: the beginning of maturation starting late May and the medium/end of this phase in the second half of July (Figure 3). There are possible effects of N-P fertilization on the vegetative growth that will generate the new cladodes for the next season. Our observations took place on the one-year old cladodes only, although two-year-old cladodes or older can also generate vegetative shoots. In 2011, the emission of shoots (Figure 4a) was intense at the end of June and again in July. Compared to the control with no N fertilizer, it was earlier (June 8) and more intense in N treatments (the number of shoots per cladode increased by +0.2 in T4 and +0.4 in T5). The shoot number per cladode was globally higher for T4 and T5, with more than 0.30 and 0.60, respectively, in comparison with 0.15 for T1 (control). This trait was the only one significantly affected by N-P fertilization in 2011. In 2012 the emission of shoots (Figure 4b) began earlier (March 21) and finished later (September 21). As in 2011, N fertilization increased very significantly (four times) the number of shoots compared to the control. This effect has been reported by several authors (Mimouni *et al.*, 2013; Arba *et al.*, 2015).

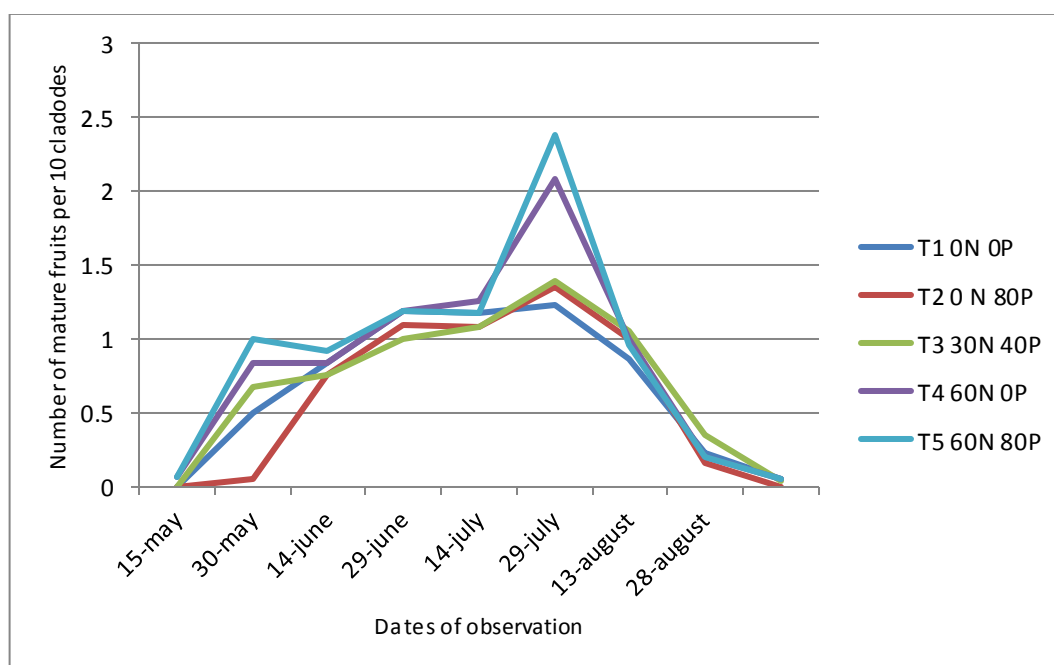


Figure 3. Dynamics of cactus pear cv. Moussa fruit ripening according to N-P fertilization (T1 to T5) in 2012. Values are expressed in number of mature fruits per 10 cladodes and per day.

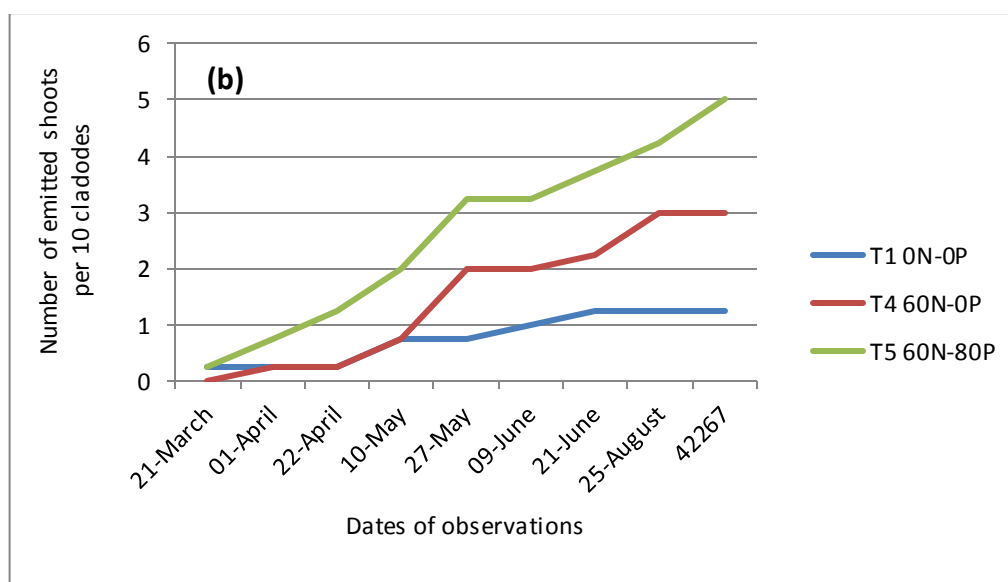
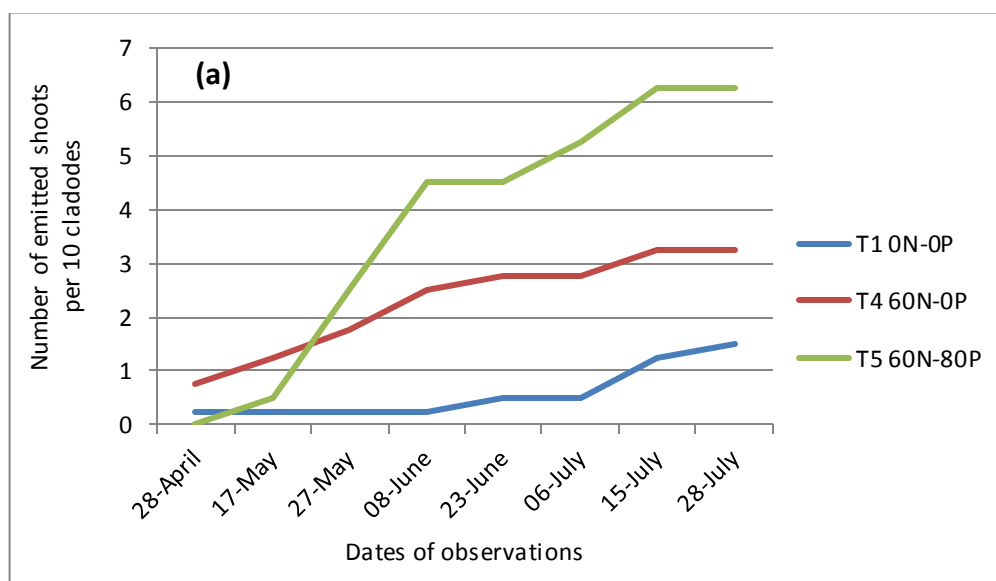


Figure 4. Phenology of shoot emission in cactus pear cv. Moussa according to N-P dressings for 2011 (a) and 2012 (b). Values are the numbers of formed shoots per ten cladodes for each treatment.

Conclusion

The use of nitrogenous and phosphoric fertilizers on the prickly pear cactus crop was proved to be effective since it improved yield and fruit quality, mainly the fruit size which is an important criterion in the marketing of fruit on the national or international market. During the season of production in Morocco, the selling price of a prickly pear

fruit case (30 kg) of small caliber can reach 30 DH MAD, whereas a fruit case of great caliber can value more than 150 DH MAD.

The improvement of yield and fruit quality and the market value of prickly pears should contribute to improve grower's income. The use of N fertilization and its application on prickly pear cactus should be better known in Morocco, so that its introduction in the best production practices would stimulate the development of this crop in Morocco.

N-P dressings also stimulated the formation of a greater number of organs, notably flower buds, flowers and vegetative shoots per cladode. The N-P fertilization did not deteriorate any parameters of physical or chemical fruit quality. N-P dressings did not have significant effects on the earliness or duration of the successive phases of the plant development. However, some sensitive responses to nitrogen make this element to be considered a monitoring tool of the physiological development of the plants. The response to phosphate dressing, well known to be slower to appear, deserves further observations.

Acknowledgments: *The authors wish to thank the Belgian Development Cooperation (BTC) and Agrotech Souss Massa Draa for their financial support and all the people who contributed to the realization of this study.*

References

- AOAC (2002). Official Methods of Analysis of AOAC International, 17th ed. (Gaithersburg, Md.).
- Arba, M., and Sharoua, E. (2013). 'Mles' and 'Draibina' wild populations of cactus pear in Khouribga area. *Acta Hort.* 995, 63– 68. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.995.7>.
- Arba, M., Falisse, A., Choukr-Allah, R., and Paul, R. (2015). Phenology of flowering and fruiting of cactus pear and effect of NP fertilising. *Acta Hort.* 1067, 31–38. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1067.3>.
- Barritt, B.H. (2001). Apple quality for consumers. *Compact Fruit Tree* 34(2), 54–56.
- Bekir, E.A. (2006). Cactus pear (*Opuntia ficus-indica* Mill.) in Turkey: growing regions and pomological traits of cactus pear fruit. *Acta Hort.* 728, 51–54. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.728.5>.
- Callahan, A.N. (2003). Breeding for fruit quality. *Acta Hort.* 622, 295–302. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.622.27>.
- Chessa, I., and Nieddu, G. (1997). Descriptors for cactus pear (*Opuntia* spp.). *Cactusnet Newsletter* (Sassari, Italy: Tipografia Moderna).

- Claassens, A.S., and Wessels, A.B. (1997). The fertilizer requirements of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) under summer rainfall conditions in South Africa. *Acta Hort.* 438, 83–96. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1997.438.10>.
- De Wit, M., Nel, P., Osthooff, G., and Labuschagne, M.T. (2010). The effect of variety and location on cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) fruit quality. *Plant Foods Hum. Nutr.* 65(2), 136–145. <https://doi.org/10.1007/s11130-010-0163-7>.
- FAO (2013). *Agro-Industrial Utilization of Cactus Pear* (Rome: Rural Infrastructure and Agro Industrial Division, FAO).
- Felker, P., Soulier, C., Leguizamon, G., and Ochoa, J.A. (2002). Comparison of the fruit parameters of 12 *Opuntia* clones grown in Argentina and the United States. *J. Arid Environ.* 52, 361–370. <https://doi.org/10.1006/jare.2002.1001>.
- Galizzi, F.A., Felker, P., Gonzales, C., and Gardiner, D. (2004). Correlation between soil and cladode nutrient concentrations and fruit yield and quality in cactus pears *Opuntia ficus-indica* in a traditional farm setting in Argentina. *J. Arid Environ.* 59, 115–132. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2004.01.015>.
- Inglese, P. (2010). Cactus pear *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. for fruit production: an overview. In *Improved Utilization of Cactus Pear for Food, Feed, Soil and Water Conservation and Other Products in Africa*, A. Nefzaoui, P. Inglese, and T. Belay, eds. *Cactusnet Newsletter, special issue 12*.
- Jorge Zegbe, A., Serna Perez, A., and Mena Covarrubias, J. (2014). Mineral nutrition enhances yield and affects fruit quality of ‘Cristalina’ cactus pear. *Sci. Hortic. (Amsterdam)* 167, 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.12.023>.
- Karababa, E., Coskumer, Y., and Aksay, S. (2004). Some physical properties of cactus pear (*Opuntia* spp.) that grows wild in the Eastern Mediterranean region of Turkey. *J. Prof. Ass. for Cactus Dev.* 6, 1–8.
- Karim, M.R., Felker, P., and Bingham, R.L. (1998). Correlations between cactus pear (*Opuntia* spp.) cladode nutrient concentrations and fruit yield and quality. *Ann. Arid Zone* 37, 159–171.
- Maataoui-Belabbes, S., and Hilali, S. (2004). Caractérisation physicochimique de jus de deux types de fruits de figuier de barbarie (*Opuntia ficus-indica*) cultivés au Maroc. *Rev. in Biol. and Biotechnol.* 3(2), 8–13.
- Mashope, B.K. (2007). *Characterization of cactus pear germplasm in South Africa*. Thesis (Free State, South Africa: University of the Free State), 149 pp.
- Mimouni, A., Ait Lhaj, A., and Ghazi, M. (2013). Mineral nutrition effect on cactus pear (*Opuntia ficus-indica* spp.) growth and development. *Acta Hort.* 995, 213–220. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.995.24>.
- Mokoboki, K., Kgama, T., and Mmbi, N. (2009). Evaluation of cactus pear fruit quality at Mara ADL, South Africa. *Afr. J. Agric. Res.* 4(1), 28–32.
- Nerd, A., and Mizrahi, Y. (2010). Reproductive biology of cactus fruit crops. *Hortic. Rev. (Am. Soc. Hortic. Sci.)* 18, 321–346.
- Ochoa, M.J., and Uhart, S.A. (2006). Nitrogen availability and fruit yield generation in cactus pear (*Opuntia ficus-indica*): III. Effects on fruit yield and dry matter allocation to reproductive sinks. *Acta Hort.* 728, 131–136. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.728.17>.
- Ochoa, M.J., Leguizamon, G., and Uhart, S.A. (2006). Nitrogen availability and fruit yield generation in cactus pear (*Opuntia ficus-indica*): IV. Effects on fruit quality. *Acta Hort.* 728, 137–144. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.728.18>.

Potgieter, J.P. (2007). The influence of environmental factors on spineless cactus pear (*Opuntia* spp.) fruit yield in Limpopo Province, South Africa. Magister Scientiae Agriculturae (Bloemfontein, South Africa: University of the Free State), 121 pp.

Reyes-Aguero, J.A., Aguirre, J.R., and Valiente-Banuet, A. (2006). Reproductive biology of *Opuntia*: a review. *J. Arid Environ.* 64, 549– 585. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.06.018>.

Segantini, D.M., Torres, L.A., Boliari, A.C., and Leonel, S. (2010). Phenology of cactus pear in Selviria – MS State, Brazil. *Rev. Bras. Frutic.* 32(2), 630–636. <https://doi.org/10.1590/S010029452010005000049>.

Valdez-Cepeda, R.D., Magallanes-Quintanar, R., Blanco-Macías, F., Hernández-Caraballo, E.A., and García-Hernández, J.L. (2013). Comparison among boltzmann and cubic polynomial models for estimation of compositional nutrient diagnosis standards: *Opuntia ficus-indica* L. case. *J. Plant Nutr.* 36(6), 895–910. <https://doi.org/10.1080/01904167.2013.770020>.



Chapitre 8

Discussion générale



Les résultats de nos observations sur les trois variétés Aissa, Moussa et Achefri en conditions naturelles ont montré que **l'émission des bourgeons végétatifs et floraux et la floraison** de ces variétés sont importantes au printemps, aux mois de mars, avril et mai. Plusieurs auteurs (Pimienta-Barrios et Del Castillo, 2002; Reyes-Aguerro et al., 2006; Nerd & Mizrahi, 2010; USDA, 2014; Valdez-Cepeda et al., 2014) ont également rapporté que les opuntias fleurissent au printemps, moment où les conditions climatiques sont favorables à la floraison (augmentation de la température et de la longueur du jour). Les périodes d'émission des bourgeons végétatifs et floraux et de la floraison varient peu d'une variété à l'autre et d'une année à l'autre. Durant les deux années d'observations, la durée des périodes d'émission des bourgeons végétatifs et floraux et de la formation des bourgeons floraux chez les trois variétés a varié de 76 à 98 jours chacune. Il en est de même pour la phase de floraison qui a présenté des durées différentes entre les variétés: de 65 à 70 jours chez 'Achefri', de 78 à 85 jours chez 'Moussa' et de 85 à 89 jours chez 'Aissa'.

Récemment, El Kharrassi et al. (2016a) et Mabrouk et al. (2016) ont également montré que les écotypes et les accessions d'opuntias qu'ils ont étudiés dans la région de Chaouia Ouardigha au Maroc ne présentent pas le même comportement phénologique. Ces variations dans les périodes d'émission et de formation des bourgeons floraux et dans la phase de floraison se reflètent également sur les autres phases phénologiques de la plante, notamment sur les phases de fructification et de récolte des fruits. Elles constituent un caractère variétal et sont peu influencées par les conditions climatiques de l'année. Plusieurs auteurs ont également rapporté que les conditions climatiques ont un effet sur la phénologie de la floraison des opuntias (Bendhifi *et al.*, 2013; Carl *et al.*, 2013; Cota-Sanchez *et al.*, 2013; Chalak et al. 2014; Dehbi *et al.*, 2014; Albano *et al.* 2015; Roghelia et Panchal, 2016). El Kharrassi *et al.* (2016a et b) et Mabrouk *et al.* (2016) ont également montré que des écotypes d'opuntias provenant de huit régions du Maroc et plantés dans une même localité ont un comportement phénologique qui est très hétérogène. Certains écotypes ont produit plus de bourgeons que d'autres.

La durée de la phase de maturation des fruits varie entre variétés: en première année par exemple, elle était de 63 jours chez 'Achefri', 72 jours chez 'Moussa' et 79 jours chez 'Aissa'. Elle a peu varié entre les années, de 63 à 79 jours chez les trois variétés en première année et de 61 jours (chez 'Achefri') à 84 jours (chez 'Moussa') en deuxième

année. Plusieurs auteurs ont également rapporté que la durée de la phase de maturation des fruits varie d'une variété à l'autre, d'un pays à l'autre et d'une région à l'autre (Reyes-Aguero et al., 2006; Barbara, 2007; Nerd et Mizrahi, 2010; Segantini et al., 2010; Valdez-Cepeda et al., 2013). Par exemple, elle s'est étendue de 80 jours au Brésil (Segantini et al., 2010) à plusieurs semaines dans d'autres pays (Nerd & Mizrahi, 2010). D'autres auteurs ont rapporté que même pour une variété, une variation dans les conditions de l'environnement entraîne aussi une variation dans la période de maturation des fruits (Valdez-Cepeda et al., 2013). Dans nos essais, la fin de la maturation des fruits des trois variétés au cours des deux années se situe entre le 6 et le 15 septembre, mais la fin de récolte d'une production qui peut faire l'objet d'une commercialisation se situe autour du début septembre.

La période de développement des fruits ou PDF varie entre variétés, que ce soit en 1^{ère} année (145 jours pour Aissa, 156 pour Moussa et 164 pour Achefri) ou en 2^{ème} année (180 jours pour Aissa et Moussa et 172 jours pour Achefri). Mais elle est plus longue chez les trois variétés en 2^{ème} année par rapport à la 1^{ère} année du fait de la précocité de la formation des bourgeons floraux en 2^{ème} année (entre le 02 et le 10 février) par rapport à la 1^{ère} année (entre le 24 février et le 03 mars). Dans un autre essai dans la même région, la PDF de la variété 'Moussa' a été de 152 jours en 1^{ère} année et 188 jours en 2^{ème} année (Arba et al, 2015). Un grand nombre d'auteurs ont également rapporté que la PDF varie d'une variété à l'autre, d'une région à l'autre et d'une année à l'autre, selon les conditions du milieu et les conditions climatiques de l'année (Barbara, 2007; Nerd & Mizrahi, 2010; Segantini et al., 2010) et que les variétés qui ont une émission précoce de bourgeons floraux ont une longue PDF (Barbara, 2007). Ce dernier auteur a rapporté que la PDF de la majorité des variétés d'Afrique du sud au cours de deux saisons varie entre 120 et 130 jours et que la PDF des variétés qui ont une émission précoce des bourgeons floraux au cours des deux saisons varie de 148 à 162 jours. La PDF de l'*O. ficus-indica* est de 96 jours au Brésil (Segantini et al., 2010) et 122 jours environ en Italie (Nerd & Mizrahi, 2010).

En première année des expérimentations, **les irrigations** ont eu un effet faible et négligeable sur la phénologie de floraison et de fructification des trois variétés car elles coïncidaient avec des pluies importantes en mars-avril. L'émission des bourgeons végétatifs et floraux et la formation des bourgeons floraux chez les trois variétés sont

importantes fin mars-début avril et l'importance de cette émission et de cette formation en cette période est due aux conditions climatiques qui sont favorables (pluviosité, augmentation des températures et de la longueur du jour). En 1^{ère} année, l'irrigation n'a pas eu d'effet ni sur la floraison, ni sur la durée de la phase de floraison des variétés inermes. Elle n'a également pas eu d'effet sur la PDF des trois variétés et la variabilité dans la PDF de ces variétés est due aux différences dans les dates de formation de leurs bourgeons floraux et de maturation de leurs fruits (50% de fruits à maturité). Le seul effet de l'irrigation en 1^{ère} année a été l'augmentation du nombre de fleurs et de la durée de floraison de la variété épineuse 'Achefri'. Les nombres de bourgeons émis et formés sont plus élevés chez cette variété épineuse que chez les inermes (plus de 6 bourgeons formés par cladode contre moins de 4,5 chez les variétés inermes) et la différence est significative entre variétés ($p < 0,05$). L'irrigation a également allongé de 16 jours la période de floraison de la variété épineuse et augmenté le nombre de bourgeons fleuris chez les traitements irrigués de cette variété. Il a atteint 12 bourgeons fleuris/cladode, alors qu'il n'a pas dépassé 6,5 bourgeons/cladode chez le traitement non irrigué. Cela met en évidence une meilleure réponse à l'eau de la variété 'Achefri' par rapport aux inermes, du fait peut être de ses caractères éco-physiologiques ou génétiques. L'irrigation a également eu un effet positif sur l'allongement de la durée de la phase de maturation des fruits des variétés 'Moussa' et 'Achefri', mais la fin de récolte "commerciale" (d'une quantité suffisante que pour rentabiliser le coût d'un passage pour récolte) chez les trois variétés se situe aux environs de la fin août-début septembre.

En deuxième année, les irrigations ont un effet positif sur l'émission des bourgeons pour les trois variétés, en augmentant le nombre de bourgeons émis, ainsi que sur l'intensité de la floraison et sa durée. L'émission des bourgeons est importante au mois de mars chez les trois variétés et les trois traitements d'irrigation. Elle est souvent plus élevée chez les traitements irrigués où elle a atteint plus de 7 bourgeons/cladode chez certaines variétés, alors qu'elle n'a pas dépassé 5 bourgeons/cladode chez les traitements non irrigués des trois variétés. Les irrigations T2 et T3 ont peu d'effet sur les durées de formation des bourgeons floraux: aucun effet sur 'Aissa' et allongement d'une semaine sur 'Moussa' et 'Achefri'. L'irrigation a également un effet positif sur le nombre de bourgeons fleuris qui est de plus de 6 bourgeons fleuris/cladode chez les traitements irrigués contre pas plus que 5 par cladode chez les traitements non irrigués. Un grand nombre d'auteurs ont également confirmé que l'irrigation augmente l'émission et la

formation des organes de la plante, notamment les bourgeons végétatifs et floraux (Mulas et D'hallewin, 1997; Inglese, 2010; Nerd et Mizrahi, 2010). Cota-Sanchez et al. (2013) ont également indiqué que le nombre de fleurs par cladode dépend de la surface du cladode, et que cette dernière dépend de l'irrigation du cactus. L'irrigation a aussi un effet sur la durée de la phase de floraison, plus longue chez les traitements irrigués (99 jours chez la variété 'Aissa', 92 jours chez 'Moussa' et 77 chez 'Achefri') que chez les non irrigués (85 jours chez Aissa, 78 chez Moussa et 70 jours chez Achefri). La durée de la phase de maturation des fruits est aussi plus longue chez les traitements irrigués des variétés 'Aissa' et 'Achefri', mais la fin de récolte "rentable" se situe vers la fin d'août pour les plantes non irriguées comme pour les irriguées.

Les phases de floraison et de maturation des fruits se recouvrent de une à deux semaines chez les variétés inermes 'Aissa' et 'Moussa', alors qu'elles sont bien distinctes, sans recouvrement chez la variété épineuse 'Achefri'. Les irrigations T2 et T3 ont provoqué une légère augmentation de la durée de floraison (augmentation de 7 jours pour 'Achefri' et 14 jours pour 'Aissa' et 'Moussa': 7 jours de précocité et 7 de tardivité) et un allongement de la durée de la phase de maturation de deux semaines chez 'Aissa' et de une à deux semaines chez 'Achefri'. Mais ces allongements ne sont dus qu'à quelques floraisons ou maturations concernant un nombre faible de fleurs ou de fruits par rapport au nombre total de fleurs formées ou de fruits muris. Pour les trois traitements d'irrigation, la quantité de fruits produits en saison (17 juillet-15 août) représente la part la plus importante de la production totale chez les trois variétés (58% de la production totale chez 'Aissa', 64% chez 'Moussa' et 76% chez Achefri) et les irrigations n'ont pas modifié la part de la production précoce (21% de la production totale chez Aissa, 23% chez Moussa et 17% chez Achefri) ou tardive (20% de la production totale chez Aissa, 12% chez Moussa et 6% chez Achefri) chez les trois variétés. Les parts de ces productions tardives et précoces ne présentent pas un intérêt économique suffisant car elles sont faibles par rapport à la production totale d'un traitement d'irrigation chez les trois variétés.

Pour ce qui est de la PDF, il n'y a pas de différence entre variétés et traitements d'irrigation, elle varie de 172 à 180 jours chez les trois variétés et les trois traitements d'irrigation. Elle dépasse de loin celles qui sont rapportées pour d'autres variétés, en Afrique du sud (120 à 130 jours) ou en Italie (122 jours), y compris celles qui ont une

émission précoce des bourgeons floraux (148 jours) (Barbara, 2007; Nerd et Mizrahi, 2010).

En 1^{ère} année des expérimentations, la PDF des trois variétés sous les trois traitements d'irrigation (145 à 165 jours) est plus longue que celle qui est rapportée pour les variétés de l'Afrique du sud et de l'Italie, alors qu'elle est similaire ou un peu plus longue que celle des variétés qui ont une émission précoce des bourgeons floraux en Afrique du sud.

Les irrigations limitées, de l'ordre de 30 à 120 mm telles que testées, ont peu modifié les longueurs des phases de développement, généralement augmentées de quelques jours. Les irrigations ont le plus souvent avancé ou retardé les dates d'apparition ou de maturation de seulement quelques rares fruits ou fleurs. On sait par ailleurs que ces irrigations ont augmenté les rendements, entre autres en augmentant le nombre de fruits. Ce nombre de fruits plus élevé arrive à maturité au cours des mêmes périodes dans des proportions non significativement modifiées par les apports d'eau d'irrigation. On peut donc conclure que, dans nos conditions l'irrigation n'a pas permis d'étaler significativement les périodes de maturité, ni en précocité, ni en tardivité. L'irrigation n'a pas laissé apparaître des possibilités éventuelles de meilleure valorisation commerciale par un décalage significatif et surtout économiquement pertinent des dates de maturation des fruits.

L'effet bénéfique de l'irrigation sur **l'émission des pousses** chez les trois variétés a été mis en évidence en deuxième année où le nombre de pousses émises par cladode a été plus élevé chez les plantes irriguées des trois variétés (0,15 à 0,50 pousses/cladode d'une année) que chez les plantes non irriguées (0,07 à 0,10 pousses/cladode). Cette émission est encore plus importante chez les cladodes de deux ans et plus que chez ceux d'un an (le nombre de pousses émises/cladode de deux ans et plus des plantes irriguées de Achefri est de 0,75 à 1 contre 0,35 à 0,50 pousses/cladode de 1 an). Plusieurs auteurs ont également rapporté que l'irrigation a un effet bénéfique sur le cactus (Ghasemi et al., 2013; Liguori et al., 2013). En plus de l'émission des pousses, cet effet réside aussi dans l'augmentation de l'absorption du CO₂ par les plantes qui deviennent plus grandes et de leur rendement en biomasse par l'augmentation du contenu en eau des cladodes et de leurs dimensions (longueur, largeur et épaisseur). En première année, l'irrigation n'a pas modifié l'émission des pousses chez les trois variétés car elle coïncidait avec des pluies durant les mois de mars à mai, moment où l'émission des pousses est importante chez ces variétés.

Pour ce qui est du rendement, il y a une interaction entre les variétés et les irrigations en première année des expérimentations. L'irrigation a un effet négatif sur les rendements des variétés inermes 'Aissa' et 'Moussa', et un effet positif hautement significatif sur le rendement de la variété épineuse 'Achefri'. Cette variété épineuse irriguée a donné le rendement le plus élevé. Les irrigations ont un effet négligeable sur les caractères physico-chimiques des fruits, car elles coïncidaient avec des pluies importantes en mars, avril et mai. Les poids des fruits et de la pulpe et les longueurs et diamètres des fruits ne sont pas affectés par l'irrigation, ils ne sont différents qu'en fonction de la variété.

En deuxième année des expérimentations, concernant le rendement, l'interaction entre variétés et irrigations est très significative ($p < 0,01$). Bien sûr, l'effet positif "moyen" des irrigations a été de 32 à 45 % par rapport aux témoins non irrigués. Mais les réponses variétales à l'irrigation ont été d'intensités très différentes. Les irrigations ont significativement augmenté les rendements de 30 à 65% chez Moussa, de 30 à 55% chez Aissa et de 16 à 30% chez Achefri. L'irrigation de 60 mm au moment du grossissement des fruits a donné les meilleurs résultats et celle au stade boutons floraux n'a pas eu d'impact sur le rendement. Les irrigations ont augmenté le poids des fruits et de la pulpe et les dimensions des fruits (longueur et diamètre). Le poids moyen du fruit est en corrélation avec le rendement en fruits, mais il n'explique pas à lui seul les augmentations de rendement qui sont aussi causées par l'augmentation du nombre de fruits par plante. A cet égard, il est manifeste que le nombre de fruits calculé (le coefficient de détermination du rendement est de 89%) décrit mieux les variations de rendement que le nombre de fruits observés (le coefficient est de 38%), indiquant par là que les comptages sur pieds ont été peu précis. Des résultats similaires sont également rapportés par plusieurs auteurs dans d'autres pays, notamment au Mexique (Varela-Gamez et al., 2014), en Afrique du sud (Van Der Merwe et al., 1997) et en Italie (Mulas et D'hallewin, 1997; Gugliuzza et al., 2002). En ce qui concerne les caractères organoleptiques des fruits, le taux en jus des fruits est plus élevé chez les traitements irrigués et la teneur en sucres totaux des fruits et leur acidité titrable sont plus faibles. Le °Brix et le pH du jus ne sont pas affectés par l'irrigation durant les deux années.

Nos résultats sur les rendements en fruits peuvent être mis en relation avec les données concernant l'économie en eau, à savoir les données climatiques (ET_0 et précipitations) et

techniques (apports des irrigations). Nous avons considéré que le cycle annuel de l'opuntia s'étendait du 01 octobre au 30 septembre (36 décades numérotées), nous n'avons pas tenu compte de l'état hydrique du sol à la fin du cycle précédent et nous avons fait l'hypothèse que les irrigations et les précipitations du cycle annuel en cours participent complètement au bilan hydrique, en négligeant ainsi les pertes par ruissellement ou par drainage. Nous avons essayé de trouver un coefficient cultural (kc) pour les opuntias dans la région et pour la saison en question, en consultant plusieurs sources bibliographiques, notamment la FAO (1998), Lazzara et Rana (2009), Consoli et al. (2013), sans résultat satisfaisant. Mais en nous basant sur des indications concernant des plantations fruitières dans des conditions de type méditerranéennes, nous avons retenu une valeur de 0,7 pour le kc. Conscients des approximations et du fait que notre objectif n'était pas une étude approfondie des relations hydriques, nous avons osé rechercher une relation. Les cumulés des ETR (= $ET_0 \times 0,7$), et des précipitations (ou des précipitations + irrigations), ont indiqué que les périodes de risque significatif d'un déficit hydrique sans irrigation se situent à la fin du cycle, à partir de la 22^{ème} décade (autour du 10 mai) pour la première saison 2010/2011 et à partir de la 19^{ème} décade (autour du 10 avril) pour la deuxième saison 2011/2012. Il apparaît aussi que la période comprise entre la 9^{ème} décade et la 15^{ème} (de fin décembre à fin mars) était, pour le cactus, excédentaire en eau. Ceci explique de manière plus que satisfaisante l'efficacité variable des irrigations apportées en 2011 et 2012.

Concernant la qualité des récoltes, nos résultats vont largement dans le sens de ceux rapportés par la plupart des auteurs (Mulas et D'hallewin, 1997; Van Der Merwe *et al.*, 1997; Gugliuzza *et al.*, 2002; Varela-Gamez et al., 2014). Les irrigations appliquées ont eu des effets positifs sur le calibre des fruits (poids, longueur et diamètre des fruits). Elles n'ont pas eu d'effet significatif sur les autres critères de qualité, ce qui rejoint les observations faites par Mulas et D'hallewin (1997) et par Gugliuzza *et al.* (2002) pour qui les irrigations n'ont pas affecté significativement les critères de qualité, et elles pourraient rejoindre celles de Barbera (2003) et Varela-Gamez et al. (2014), pour qui le degré Brix est abaissé par l'irrigation.

En première année, **les fertilisations minérales NP** ont eu un effet faible sur les *rendements en fruits* du figuier de Barbarie. Cela peut s'expliquer d'une part par la relative tardivité des apports qui sont faits au mois d'avril et d'autre part par le

développement végétatif important des plantes âgées de 14 ans. L'absence d'effet significatif des fertilisations phosphatées s'explique aisément. D'abord, parce que le phosphore même apporté sous forme soluble dans l'eau via irrigation rejoint dans un premier temps le pool de phosphore assimilable dans le sol et est ensuite lentement absorbé par le système racinaire. Ensuite, parce que le phosphore n'est transloqué que lentement dans les vaisseaux de la plante, d'autant plus lentement que les opuntias concernés sont déjà âgés de 14 ans, que les vaisseaux sont très lignifiés et que le parcours est long pour atteindre les organes – principalement les bourgeons et les fleurs – où les premières manifestations des effets peuvent être attendus. En fait, l'effet des apports de P de première année ne peut raisonnablement être espéré qu'en deuxième année voire même plus tard. L'absence d'effets des apports d'azote s'explique largement par les mêmes causes, même si l'azote apporté sous les formes nitriques et ammoniacales est connu pour la rapidité de ses effets. En première année, il a été apporté trop tardivement pour pouvoir manifester des effets tant sur les parties végétatives que sur les organes génératifs à cause de la lenteur des effets du phosphore.

En deuxième année, les fertilisations ont un effet positif sur les rendements, notamment celles qui apportent N seul ou N avec P (NP). Cet effet positif sur les rendements est également favorisé par l'action résiduelle des fertilisations de première année et par la précocité des apports qui sont réalisés au mois de février au lieu d'avril en première année. L'interaction entre les deux éléments N et P est positive et significative: l'application d'une fertilisation qui apporte les deux éléments azote et phosphore (apport de 60N + 80 P₂O₅) augmente significativement le rendement de 15 kg/plante soit une augmentation plus élevée que la somme des effets de l'apport de l'un des deux fertilisants (3 kg/plante pour 80 kgP/ha et 6 kg/plante pour 60 kgN/ha). L'effet de N se manifeste plus intensément que celui de P, ce qui est habituel. En effet, l'azote apporté sous ses formes les plus assimilables a une absorption et une translocation plus rapides, et il possède une aptitude à agir à la fois sur les organes végétatifs (cladodes, surfaces photosynthétisantes, ...), sur les organes génératifs (floraison, fructification) et par là sur les rendements. Le phosphore a généralement une activité plus lente, se manifestant plus tard et sans doute de plus longue durée surtout chez les espèces pérennes ligneuses. On peut même faire l'hypothèse que les effets observés cette deuxième année sont à attribuer très largement aux fertilisations phosphatées de l'année précédente. Des résultats similaires sont rapportés par plusieurs auteurs qui ont montré que la fertilisation

minérale, notamment azotée et phosphatée, a un effet positif sur le rendement en fruits du figuier de Barbarie (Claassens et Wessels, 1997; Ochoa et Uhart, 2006; Inglese, 2010; Mimouni et al., 2013; Chenna Kesava et al., 2014; Jorge Zegbe et al., 2014). L'existence d'une interaction positive entre N et P - du moins aux niveaux faibles des apports de chacun tels qu'ils ont été comparés ici - ouvre les portes à une étude plus fine de l'optimisation de la fumure en ces deux éléments. Jorge Zegbe et al. (2012) ont indiqué que dans un essai réalisé au Mexique, le maximum du rendement (27 t/ha) a été obtenu avec la dose de 80 kgN/ha et 50 kgP₂O₅/ha.

Les traitements de fertilisation ont également un effet positif sur **le poids moyen des fruits et sur les dimensions des fruits**, ce qui explique largement les augmentations dans les rendements, d'autant plus que le nombre de fruits muris est en corrélation significative avec le rendement de la production. En première année, les fertilisations n'ont pas d'effet significatif sur le poids moyen des fruits ni sur ses dimensions. Pour tous les traitements de fertilisation et pour les deux années d'essais, la proportion de pulpe dans le poids total du fruit est remarquablement stable à 54 ou 55 %, et supérieure ou équivalente à ce qui est considéré comme étant un critère de qualité (De Wit et al., 2010; Jiminez Aguilar et al., 2014). L'épaisseur de l'écorce est toujours comprise entre 1,8 et 2,2 mm, ce qui correspond aux normes d'une évaluation variétale pour une production commerciale en Afrique du Sud (Potgieter et Mkhari, 2002; Potgieter, 2007). Et selon la classification italienne (Chessa et Nieddu, 1997), de l'Afrique du sud (De Wit et al., 2010) ou de l'Argentine (Jiminez Aguilar et al., 2014), les fruits des parcelles fertilisées peuvent être considérés de grand calibre (151 à 200 g) ou de calibre extra large (supérieur à 160 g).

Les analyses chimiques des fruits ont montré que les traitements de fertilisation n'ont pas d'effet significatif sur les *composantes chimiques de la qualité* des fruits. Pour les cinq traitements de fertilisation et pour les deux années des expérimentations, le taux en jus des fruits (70 à 73 %) n'a pas varié beaucoup entre traitements ni d'une année à l'autre. Les teneurs en matière sèche du jus apparaissent un peu plus élevées en première année qu'en deuxième année. Le pH du jus est significativement plus faible en deuxième année, alors que l'acidité titrable est plus élevée. Les sucres totaux sont plus élevés en première année alors que les °Brix sont plus faibles. Ces grandeurs ont été principalement affectées par l'année et pas par l'application des fertilisations, qui du

moins, ne les a pas dégradées. Nos résultats vont dans le même sens que ceux rapportés par Galizi et al. (2004) et Jorge Zegbe et al. (2014) qui ont rapporté que ces caractéristiques organoleptiques ne sont pas affectées par la fertilisation, alors que d'autres auteurs (Chenna Kesava et al., 2014) ont indiqué que la fertilisation minérale a un effet positif sur ces critères de qualité. Selon l'évaluation variétale pour une production commerciale en Afrique du Sud (Potgieter et Mkhari, 2002; Potgieter, 2007; De Wit, 2010) ou en Argentine (Jimenez Aguilar, 2014), la teneur des fruits en solides solubles totaux (SST) durant les deux années (> 13 °Brix) répond aux critères de qualité commerciale.

La fertilisation n'a pas eu d'effet sur le déroulement de la *phénologie* de la floraison et de la fructification des plantes en première année des expérimentations du fait qu'elle est appliquée tard en avril. Les observations ont donc été agrégées pour l'ensemble des traitements et des répétitions. Elles constituent une sorte de référence pour la variété 'Moussa', sans intervention d'aucune fertilisation minérale. La phase de floraison a été longue (plus de trois mois et demi). Plusieurs auteurs ont également confirmé la non synchronisation de la floraison chez les opuntias (Reyes-Aguero et al., 2006; Nerd et Mizrahi, 2010; Segantini et al., 2010; FAO, 2013; Arba et al., 2015). La fertilisation NP n'a pas eu d'effet significatif sur les dates de maturation des fruits des différents traitements. Il n'a pas été observé un éventuel effet de la fertilisation, notamment azotée, sur l'émission d'une deuxième série de fleurs qui pourrait donner une fructification tardive en automne, effet qui a été constaté par certains auteurs (Inglese, 2010; Nerd et Mizrahi, 2010) en appliquant la fertilisation après la récolte d'été, ce qui n'a pas été réalisé ici. La PDF de tous les traitements a été de 142 jours et la fertilisation n'a pas eu d'effet sur cette phase.

En deuxième année, les durées des phases d'émission des bourgeons végétatifs et floraux et de la formation des bourgeons floraux ont été similaires et se superposaient parfaitement entre traitements de fertilisation. Le nombre de bourgeons émis a été significativement plus élevé chez les traitements fertilisés en azote (1,7 bourgeons par cladode pour T4 et 1,4 pour T5) que chez les non ou les moins fertilisés en cet élément (moins d'un bourgeon par cladode pour T1, T2 et T3). Les fertilisations ont également un effet significatif sur le nombre de fleurs et de fruits formés, mais elles n'ont pas eu d'effet sur les dates de début et de fin des phases de floraison et de maturation, ni en

précocité, ni en tardivité pour la phase de maturation. La PDF a été de 180 jours pour tous les traitements de fertilisation, elle a été plus longue et plus précoce (elle a commencé le 1^{er} février) qu'en première année (durée 142 jours et début le 11 mars).

Avec toutes les précautions d'usage, sans vouloir généraliser ni extrapoler à d'autres situations (régions, variétés, années, ...), nous avons estimé les efficacités physiologiques des éléments N et P (sur les rendements) et les efficacités économiques par la détermination d'une sorte de marge brute se limitant à déduire de la valeur de la production le seul coût des engrais. On peut alors dresser le tableau 1 dans lequel les rendements par plante ont été traduits en rendements par hectare sur base de la densité de nos parcelles correspondant à 3000 plantes à l'ha; les effets sur le rendement des apports d'éléments N et P ont été déduits par les différences entre apports de chacun des deux éléments en absence ou en présence de l'autre; ce qui au passage illustre bien l'importance de l'interaction entre N et P aux niveaux d'apports étudiés; l'efficacité « physiologique » de l'élément a été obtenue par division des écarts de rendement par le nombre d'unités apportées de l'élément; puis on en déduit une sorte d'écart de marge brute « partielle » pour chacune des fumures par rapport à la fumure 0-0 en déduisant de la valeur de la production /ha (au prix moyen de 5 DH par kg de fruit, observé sur les marchés) le coût de la fumure correspondante (aux prix observés de 8,7 DH par kg de P₂O₅ et de 3,5 DH par kg de N).

Tableau 1. Approches sur l'efficacité physiologique (a) et sur l'efficacité économique (b) des apports de fertilisants NP (sur base des résultats de 2012).

(a)

Fumure NP		Rendement en fruits		Efficacité des éléments sur le rendement			
kg N	kg P ₂ O ₅	kg/plant	kg/ha (1)	Effet de 80P (kg/ha)	Effet de 60N (kg/ha)	Effet/kg P ₂ O ₅ (kg P ₂ O ₅ /ha)	Effet/kg N (kg N/ha)
0	0	16,49	49 470				
0	80	19,44	58 320	8 850		110,63	
40	40	21,19	63 570				
60	0	22,54	67 620		18 150		302,50
60	80	31,26	93 780	26 160	35 460	327,00	591,00

(b)

Fumure NP		Rendement en fruits		Efficacité économique des éléments fertilisants hors coûts d'équipement				M. B. dégagées par les fumures, coûts d'équipement compris	
kg N	kg P ₂ O ₅	kg/plant	kg/ha (1)	Coût fumure DH/ha (2)	V.P par kg P ₂ O ₅ DH/kg P ₂ O ₅ (3)	V.P par kg N DH/kg N (3)	Δ M.B. par rapport à la fumure 0-0 (DH/ha)	Coût de la fertilisation (DH/ha)	Δ M.B. par rapport à la fumure 0-0 (DH/ha)
0	0	16,49	49 470	0				0	
0	80	19,44	58 320	696	553		43 554	1 996	42 554
40	40	21,19	63 570	484			70 016	1 484	69 016
60	0	22,54	67 620	204		1 513	90 546	1 204	89 546
60	80	31,26	93 780	900	1 635	2 955	176 400	1 900	175 400

(1) sur base d'une densité de 3000 plants/ha

(2) sur base d'un coût de 3,4 DH pour 1 kg de N et de 8,7 DH pour 1 kg de P₂O₅

(3) sur base d'un prix de vente moyen de 5 DH par kg de fruit de bon calibre

V.P. : valeur de la production; M.B. : marge brute; Δ M.B. : différence de marge brute

On observe que les efficacités physiologiques sont très élevées, plus élevées pour N que pour P, et les plus élevées pour N et P apportés simultanément, ce qui traduit bien la positivité de l'interaction entre ces deux éléments aux doses étudiées. On constate également une très grande efficacité économique des apports de fumure, le supplément de « valeur de la production » étant de l'ordre de 60 fois (pour P apporté seul) à deux cents fois (pour N seul ou N et P ensemble) le supplément de coûts dus aux fertilisants.

Si on tient compte des coûts liés à l'investissement en équipement, sur base de 3,3 km de tuyau par ha à 2000 DH le km soit 6.600 DH; d'un injecteur d'engrais soluble à 2500 DH et d'un débitmètre à 900 DH (ces deux derniers pouvant être valorisés sur plus de un hectare et pour la fertilisation et l'irrigation simultanément), l'investissement maximal est de 10.000 DH par hectare. Avec un amortissement sur 10 ans, la charge annuelle est de l'ordre de 1000 DH.

Pareils résultats ne sont pas étonnants lorsqu'on compare des effets d'apports de fertilisants par rapport à des témoins manifestement en situation de carence légère en éléments apportés, ce qui était bien le cas dans notre expérimentation. Dès lors que la situation du témoin serait améliorée, il est évident que ces efficacités apparentes seront moins élevées, mais elles le resteront longtemps, compte tenu de la très haute valeur de la production par hectare en comparaison avec le coût des engrais. Ceci ne signifie pas du tout que l'on puisse augmenter fortement les doses d'engrais apportées, mais que les doses étudiées ici dans un premier temps peuvent raisonnablement être augmentées, en particulier les doses d'azote.

Dans les années qui ont suivi la réalisation de cet essai, nous avons réalisé des observations occasionnelles dans la parcelle restée intacte depuis 2012. Ainsi, nos dernières observations sur l'émission des bourgeons végétatifs et floraux durant les mois de février à avril de cette année 2017 (tableau 2) ont montré que l'émission des bourgeons est plus importante chez les traitements fertilisés en phosphore en 2011 et 2012 (9,7 bourgeons /cladode pour T2 (0N-80P), 9,2 pour T3 (40N-40P) et 10,1 pour T5 (60N-80P) que chez les non ou les moins fertilisés en cet élément (8,1 bourgeons /cladode pour T1 (0N-0P) et 7,8 pour T4 (60N-0P)), la différence est significative ($p < 0,05$) entre ces deux groupes de traitements.

A nouveau, ceci peut s'expliquer par le fait que les effets du phosphore se manifestent relativement lentement surtout chez les espèces pérennes ligneuses. Ceci confirme aussi à l'évidence, l'intérêt de la fertilisation phosphatée et le fait que, apportée sur une plantation adulte, ses effets ne se manifestent qu'après un délai d'au moins deux années, et peuvent se perpétuer pendant au moins cinq années. La conséquence pratique est donc que, là où ils sont justifiés, les apports de phosphore peuvent être réalisés dès la plantation par incorporation de P sous forme plus ou moins assimilable, puis périodiquement, soit régulièrement via irrigation, soit avec une fréquence de 2 ou 3 années sous forme soluble en surface.

Tableau 2: Emission des bourgeons végétatifs et floraux en mars-avril 2017 chez les plantes qui ont reçu les traitements de fertilisation T1, T2, T3, T4 et T5 durant les années 2011 et 2012.

Dates des observations	Traitements de fertilisation				
	T1 (0N-0P)	T2 (0N-80P)	T3 (40N-40P)	T4 (60N-0P)	T5 (60N-80P)
	Nombre de bourgeons émis par cladode				
05/03/2017	0±0.2	0.3±0.2	0.4±0.4	0±0.2	0.2±0.2
12/03/017	0.8±0.2	1.1±0.2	0.9±0.2	0.7±0.2	1.0±0.2
20/03/017	1.3±0.2	1.3±0.2	1.2±0.2	1.1±0.2	1.5±0.3
27/03/017	1.4±0.2	1.4±0.2	1.3±0.2	1.4±0.2	1.7±0.3
05/04/017	1.2±0.2	1.9±0.2	1.7±0.2	1.3±0.2	1.6±0.3
12/04/017	1.4±0.2	1.7±0.2	1.5±0.2	1.6±0.2	2.1±0.2
20/04/017	1.6±0.2	2.0±0.2	2.2±0.2	1.7±0.2	2.0±0.2
Total au 20/04/017	8.1±0.4	9.7±0.4*	9.2±0.3*	7.8±0.3ns	10.1±0.4*

(*) différence significative à $p < 0.05$; (ns) différence non significative

L'émission des pousses (0,2 à 0,4 pousses/cladode chez les traitements fertilisés en N contre 0,025 chez les traitements non fertilisés en cet élément) a été la seule propriété à être significativement influencée par la fertilisation qui apporte l'azote en première

année (2011). En deuxième année (2012), ces fertilisations ont fortement augmenté l'émission des pousses qui a été jusqu'à quatre fois plus importante que chez les traitements non fertilisés en N, ce qui est également rapporté par plusieurs auteurs (Mimouni et al., 2013; Arba et al., 2015; Da Silva et al., 2016). Le tout traduit bien d'une part, un effet rapide, dès la première année, sur les organes végétatifs en formations; d'autre part, un effet constant et intense à la mesure des quantités d'azote apportées.

L'existence d'une interaction positive entre N et P aux doses étudiées, interaction qui se manifeste dès la deuxième année, illustre bien l'intérêt de concevoir la « fertilisation » d'une manière globale: s'assurer d'abord de l'absence de carences ou de toxicités manifestes, y remédier si nécessaire; assurer une alimentation en éléments majeurs limitants, ici manifestation N et P; gérer au cours du temps; s'assurer que ces fertilisations n'induisent pas par rebond des éventuelles carences en d'autres éléments devenus limitants du fait des exportations croissantes liées à l'augmentation des rendements.

Références

- Albano C, Negro C, Tommasi N, Gerardi C, Mita G, Miceli A, De Bellis L et Blando F 2015. Betalains, phenols and antioxidant capacity in cactus pear [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.] fruits from Apulia (South Italy) genotypes. *Antioxidants*, 4(2), 269-280.
- Arba M, Falisse A, Choukr-Allah R et Paul R 2015. Phenology of flowering and fruiting of cactus pear and effect of NP fertilizing. *Acta Horticulturae*, 1067, 31-38.
- Barbara KM 2007. Characterization of cactus pear germplasm in South Africa. A thesis of Philosophiae Doctor. Faculty of Natural and Agricultural Sciences, University of the Free State, South Africa.
- Barbera G 2003. I sistemi frutticoli tradizionali nella valorizzazione del paesaggio. *Italus Hortus*, numero speciale sul 50° anniversario della SOI, 10(5), 40-45.
- Bendhifi M, Baraket G, Zourgui L, Souid S et Salhi-Hannachi A 2013. Assessment of genetic diversity of Tunisian Barbary fig (*Opuntia ficus-indica*) cultivars by RAPD markers and morphological traits. *Scientia Horticulturae*, 158, 1-7.
- Carl G, Doktor D, Koslowsky D et Kuhn I 2013. Phase difference analysis of temperature and vegetation phenology for beech forest: a wavelet approach. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 27, 1221-1230.
- Chalak L, Younes J, Roupheal S et Hamadeh B. 2014. Morphological characterization of prickly pears (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) cultivated in Lebanon. *International Journal of Science and Research*, 3(6), 2541-2553.

- Chenna Kesava RS, Sucharitha KV, Venkata Ramana DK, Raveendra RM et Syamala B 2014. Medicated prickly pear (*Opuntia ficus-indica*)-the new emerging agricultural crop in arid and semi-arid regions of India. *International Journal of Applied Biology and Pharmaceutical Technology*, 5(4), 264-270.
- Chessa I et Nieddu G 1997. Descriptors for cactus pear (*Opuntia* spp.). *FAO Cactusnet Newsletter special issue*. Tipografia moderna. Sassari, Italy.
- Claassens AS et Wessels AB 1997. The fertilizer requirements of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) under summer rainfall conditions in South Africa, *Acta Horticulturae*, 438, 83-96.
- Consoli S, Inglese G et Inglese P 2013. Determination of evapotranspiration and annual biomass productivity of a cactus pear [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.] orchard in a semi-arid environment. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(8), 680-690.
- Cota-Sánchez JH, Almeida OJG, Falconer DJ, Choi HJ et Bevan L 2013. Intriguing thigmonastic (sensitive) stamens in the plains prickly pear *Opuntia polyacantha* (Cactaceae). *Flora*, 208, 381-389.
- Da Silva JA, Donato SLR, Donato PER, Souza ES, Júnior MCP et Junior AAS 2016. Yield and vegetative growth of cactus pear at different spacings and under chemical fertilization. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(6), 564-569.
- Dehbi F, Hasib A, Ouattmane A, Elbatal H et Jaouad A 2014. Physicochemical characteristics of Moroccan prickly pear juice (*Opuntia ficus-indica* L.). *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4(4), 300-306.
- De Wit M, Nel P, Osthooff G et Labuschagne MT 2010. The effect of variety and location on cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) fruit quality. *Plant Foods for Human Nutrition* 65(2), 136-145.
- El Kharrassi Y, Mazri MA, Mabrouk A, Nasser B et El Mzouri E 2016a. Flowering and fruiting phenology, and physico-chemical characteristics of 2-year-old plants of six species of *Opuntia* from eight regions of Morocco. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 90(6), 682-688.
- El Kharrassi Y, Mazri MA, Benyahia H, Benaouda H, Nasser B et El Mzouri E 2016b. Fruit and juice characteristics of 30 accessions of two cactus pear species (*Opuntia ficus-indica* and *Opuntia megacantha*) from different regions of Morocco. *Food Science and Technology*, 65, 610-617.
- FAO 1998. The state of food and agriculture. Rural non-farm income in developing countries. FAO, Rome.
- FAO 2013. Agro-industrial utilization of cactus pear. Rural Infrastructure and Agro Industrial Division. FAO, Rome.
- Galizzi FA, Felker P, Gonzales C et Gardiner D 2004. Correlation between soil and cladode nutrient concentrations and fruit yield and quality in cactus pears *Opuntia ficus-indica* in a traditional farm setting in Argentina, *Journal of Arid Environments*, 59, 115-132.
- Ghasemi S, Ramezani M et Mirmiran SM 2013. The effect of various water application strategies on cladode development of *Opuntia ficus-indica*. *Journal of Agriculture and Food Technology*, 3(7), 1-4.
- Gugliuzza G, Inglese P et Farina V 2002. Relationship between fruit thinning and irrigation on determining fruit quality of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) fruits. *Acta Horticulturae*, 581, 205-209.
- Inglese P 2010. Cactus pear *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. for fruit production: An overview. *FAO Cactusnet Newsletter special issue*.

- Jiménez-Aguilar DM, Mújica-Paz H et Welti-Chanes J 2014. Phytochemical characterization of prickly pear (*Opuntia* spp.) and of its nutritional and functional properties: A review. *Current Nutrition & Food Science*, 10, 57-69.
- Jorge Zegbe A, Sánchez-Toledano BI, Serna-Pérez A et Mena-Covarrubias J 2014. Economic analysis of the application of mineral fertilizers on the yield of prickly pear. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(3), 449-461.
- Jorge Zegbe A, Mena-Covarrubias J et Serna-Pérez A 2012. La fertilización mineral mejora el rendimiento y tamaño de la tuna variedad 'Cristalina'. Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Universidad Autónoma de Zacatecas, 11-16 noviembre, México. pp. 277-282.
- Lazzara P et Rana G 2010. The crop coefficient (K_c) values of the major crops grown under Mediterranean climate. *Mediterranean dialogue on integrated water management, Inco-Med Project*.
- Liguori G, Inglese G, Pernice F, Sortino G et Inglese P 2013. CO₂ uptake of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. whole trees and single cladodes, in relation to plant water status and cladode age. *Italian Journal of Agronomy*, 8(3), 14-20.
- Mabrouk A, Abbas Y, Fakiri M, Benchekroun M, El Kharrassi Y, El Antry-Tazi S et El Mzouri E 2016. Phenological characterization among Moroccan ecotypes of cactus (*Opuntia* spp.) under soil and climatic conditions of the Chaouia-Ouardigha region. *Journal of Materials and Environmental Science*, 7(4), 1396-1405.
- Mimouni A, Ait Lhaj A et Ghazi M 2013. Mineral nutrition effect on cactus pear (*Opuntia ficu-sindica*) growth and development, *Acta Horticulturae*, 995, 213-220.
- Mulas M et D'hallewin G 1997. Fruit quality of four cactus pear (*Opuntia ficus-indica* Mill.) cultivars as influenced by irrigation. *Acta Horticulturae*, 438, 115-122.
- Ochoa MJ et Uhart SA 2006. Nitrogen availability and fruit yield generation in cactus pear (*Opuntia ficus-indica*): III. Effects on fruit yield and dry matter allocation to reproductive sinks. *Acta Horticulturae*, 728, 131-136.
- Pimienta-Barrios E et Del Castillo RF 2002. Reproductive Biology. In: Nobel PS (ed.). *Cacti: Biology and uses*. University of California Press. p. 75-90.
- Potgieter JP 2007. The influence of environmental factors on spineless cactus pear (*Opuntia* spp.) fruit yield in Limpopo Province, South Africa, *Magister scientiae agriculturae*, University of the Free State, Bloemfontein, South Africa. 121p.
- Potgieter JP and Mkhari JJ 2002. Evaluation of cactus pear (*Opuntia* spp.) germplasm for fruit production purposes. Combined Congress, Pietermaritzburg, Natal, 15-17 January 2002.
- Reyes-Aguero JA, Aguirre JR et Valiente-Banuet A 2006. Reproductive biology of *Opuntia*: A review. *Journal of Arid Environments*, 64, 549-585.
- Roghelia V et Panchal J 2016. Physicochemical characteristics of cactus pear fruits. *Journal of Pharmaceutical, Chemical and Biological Sciences*, 4(1), 119-125.
- Segantini DM, Torres LA, Boliani AC et Leonel S 2010. Phenology of cactus pear in Selviria-MS State, Brazil. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 32(2), 630-636.

USDA 2014. Field guide for managing prickly pear in the Southwest. Forest service, Southwest region, 7p.

Valdez-Cepeda RD, Blanco-Macias F, Magallanes-Quintanar R, Vasquez-Alvarado R et Mendez-Gallegos JS 2013. Fruit weight and number of fruits per cladode depend on fruiting cladode fresh and dry weight in *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. variety 'rojo pelon'. *Scientia Horticulturae*, 161, 165-169.

Valdez-Cepeda RD, Méndez-Gallegos SJ, Magallanes-Quintanar R, Ojeda-Barrios DL et Blanco-Macías F 2014. Fruit yield per cladode depends on its physical attributes in *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller variety 'rojo pelón'. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 20(2), 131-146.

Van Der Merwe LL, Wessels AB et Ferreira DI 1997. Supplementary irrigation for spineless cactus pear. *Acta Horticulturae*, 438, 77-82.

Varela-Gómez Y, Caldera-Arellano AN, Jorge Zegbe A, Serna-Pérez A et Mena-Covarrubias J 2014. Irrigation in nopal influences the storage and packaging of tuna. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(8), 1377-1390.



Chapitre 9

Conclusions et perspectives



9.1. CONCLUSIONS

La filière de production des opuntias s'est développée dans les régions arides et semi-arides et leur culture pour une production commerciale est actuellement pratiquée dans plusieurs pays du monde. Il en est ainsi au Maroc, notamment dans la région sud et les zones centrales internes, où la superficie occupée par cette espèce est passée de 60 000 ha autour des années 2000 à plus de 150 000 ha actuellement. Les plantations traditionnelles en haies autour des parcelles cultivées sont en train de disparaître tandis que sont installées de nouvelles plantations alignées avec densité élevée de plantation, avec irrigation goutte à goutte localisée et fertigation. Ces plantations nouvelles sont réalisées dans le cadre du Plan Maroc Vert (PMV), des programmes de lutte contre les effets de la sécheresse ou de la mise en valeur des terres marginales dans les zones arides et semi-arides.

Sur le plan de la phénologie, les opuntias fleurissent au printemps, moment où les conditions climatiques sont favorables à la floraison (augmentation de la température et de la longueur du jour), mais la période d'émission des bourgeons végétatifs et floraux et de la floraison peut être un peu plus précoce ou plus tardive, selon les variétés, d'une part (composante génétique), selon la région de culture et les conditions climatiques de l'année (composante environnement), d'autre part.

Nos observations ont montré que les durées de la plupart des phases phénologiques de floraison et de fructification des trois variétés sous les conditions naturelles du milieu ont été plus courtes et plus précoces en deuxième année qu'en première année. Ceci a pu être expliqué par les conditions climatiques de la deuxième année qui ont été marquées par un printemps avec faible pluviosité (0 mm en mars, 4,2 en avril et 0,6 en mai contre 67,6; 65,6 et 137,8 mm en première année) et par un hiver avec un faible ensoleillement (439 MWh/m² en janvier et 518 MWh/m² en février contre 473 et 546 MWh/m² respectivement pour janvier et février de la 1^{ère} année) et des températures basses (12,8 °C en janvier et 12,5 °C en février contre 13,9 et 13,2 °C respectivement pour janvier et février de la 1^{ère} année). Ces conditions auraient entraîné une initiation précoce des bourgeons floraux et la réduction de la durée des phases phénologiques. Aussi, la pluviométrie plus importante durant les mois de décembre et janvier en deuxième année (99,4 mm en décembre et 151,4 en janvier) qu'en première année (124 mm en décembre

et 47,2 en janvier) a pu entraîner une émission et une formation plus précoces des bourgeons floraux.

La fin de la maturation des fruits des trois variétés durant les deux années se situe entre le 6 et le 15 septembre, mais la fin de récolte d'une production qui peut faire l'objet d'une commercialisation se situe vers le début de septembre. Ce qui indique également qu'il y a une variation dans la période de maturation des fruits entre variétés. Durant les deux années, la PDF est variable entre les trois variétés, mais elle est plus longue chez les trois variétés en 2^{ème} année par rapport à la 1^{ère} année du fait de la précocité de la formation des bourgeons floraux en 2^{ème} année (entre le 02 et le 10 février) par rapport à la 1^{ère} année (entre le 24 février et le 03 mars).

Les travaux sur la phénologie de la floraison et de la fructification des opuntias ne sont pas nombreux et des études plus précises sur ce thème permettraient de relier des différences de comportement phénologique entre les variétés et la production de fruits en quantité (rendement) et en timing (période de maturation), en fonction des conditions de l'environnement.

Parce qu'il n'est pas possible de maîtriser les conditions d'environnement, en particulier le climat de l'année, il est manifeste qu'un des outils permettant l'allongement de la période de production de fruits matures reste le choix variétal. Une étude plus large des comportements variétaux au niveau régional devrait permettre d'améliorer le choix des variétés cultivées et d'influencer l'amélioration génétique de l'espèce en vue par exemple d'une meilleure exploitation des ressources tant naturelles (rayonnement, température, sol, précipitations) qu'exogènes (fertilisants, eau d'irrigation, etc.).

L'effet des irrigations sur la phénologie de floraison et de fructification des trois variétés a été négligeable en première année des expérimentations car elles coïncidaient avec des pluies importantes en mars-avril. L'importance de l'émission des bourgeons et de la formation des boutons floraux en mars-avril est due aux conditions climatiques qui sont favorables (pluviosité, augmentation des températures et de la longueur du jour). En deuxième année des expérimentations, les irrigations ont un effet positif sur l'émission des bourgeons chez les trois variétés et sur la floraison et la durée de floraison de ces variétés. Les irrigations T2 et T3 ont provoqué un allongement de la durée de la phase de maturation de deux semaines chez 'Aissa' et de une à deux semaines chez 'Achefri'. Mais

ces allongements n'ont donné qu'un nombre très faible de fruits par rapport à la production de saison (17 juillet-15 août) qui représente la part la plus importante de la production totale chez les trois variétés. Alors qu'elles n'ont pas eu d'effet sur la PDF, cette dernière varie de 145 à 165 jours entre variétés et traitements d'irrigations en première année et de 172 à 180 jours en deuxième année. En première année, elle est plus longue que celle qui est rapportée pour les variétés de l'Afrique du sud (120 à 130 jours) et de l'Italie (122 jours), et en deuxième année elle dépasse de loin la PDF des variétés de ces pays.

Alors qu'en première année des expérimentations, l'irrigation n'a pas modifié l'émission des pousses chez les trois variétés car elle coïncidait avec des pluies au moment où l'émission des pousses est importante chez ces variétés (mars à mai), en deuxième année, les irrigations ont eu, chez les trois variétés, un effet bénéfique sur l'émission des pousses et le nombre de pousses émises par cladode a été plus élevé chez les plantes irriguées des trois variétés que chez les non irriguées.

Pour ce qui est du rendement, il y a eu une interaction significative entre variétés et irrigations durant les deux années. En première année, l'effet variété est hautement significatif et la variété épineuse 'Achefri' a donné le rendement le plus élevé. Le calibre des fruits n'a pas été affecté par l'irrigation. En deuxième année, les irrigations ont significativement augmenté la production, le poids du fruit et de la pulpe et les dimensions des fruits (longueur et diamètre), avec des intensités différentes pour chaque variété. En ce qui concerne les caractères organoleptiques des fruits, le taux en jus des fruits est plus élevé chez les traitements irrigués et le contenu des fruits en sucres totaux et l'acidité titrable sont plus faibles. Le °Brix et le pH du jus ne sont pas affectés par l'irrigation durant les deux années.

Les fertilisations minérales NP ont un effet positif sur les rendements en deuxième année des expérimentations. Cet effet positif sur les rendements est également favorisé par l'action résiduelle des fertilisations de première année et par la précocité des apports qui sont réalisés au mois de février au lieu d'avril en première année. Alors qu'en première année, les fertilisations n'avaient eu un effet faible sur les rendements du fait, d'une part, de la tardivité des apports effectués au mois d'avril et, d'autre part, du développement végétatif important des plantes âgées de 14 ans. En deuxième année, les fertilisations ont également eu un effet positif sur le poids moyen des fruits et sur les

dimensions des fruits, ce qui participe à expliquer les augmentations dans les rendements. Alors qu'en première année, les fertilisations n'avaient pas eu d'effet significatif sur le poids moyen des fruits ni sur leurs dimensions. Les fertilisations n'ont pas eu d'effet significatif sur les composantes chimiques de la qualité des fruits durant les deux années, c'est-à-dire qu'elles n'ont pas diminué la qualité. En deuxième année, les fertilisations apportant l'azote n'ont augmenté le nombre de bourgeons émis que chez les traitements non fertilisés ou les moins fertilisés en cet élément. Elles ont eu également un effet significatif sur le nombre de fleurs et de fruits formés, mais elles n'ont pas eu d'effet sur les dates de début et de fin des phases de floraison et de maturation des fruits ni sur la PDF, que ce soit en 1^{ère} année ou en 2^{ème} année. En première année, la fertilisation n'a pas eu d'effet sur le déroulement de la floraison et de la fructification des plantes du fait qu'elle a été appliquée tard en avril. L'émission des pousses a été significativement augmentée par la fertilisation apportant l'azote, que ce soit en première année ou en deuxième année.

Une approche des efficacités physiologique (rendement en fruits) et économique (en DH, valeur de la production et coûts des engrais) a permis de quantifier l'intérêt de la fertilisation.

Si l'intérêt de la fertilisation minérale et de l'irrigation a été démontré quant au rendement et la qualité de la récolte, il n'est pas apparu que ces deux facteurs – dans les limites de leur mise en œuvre dans nos essais, *i.e.* volumes d'eau réduits et faibles, doses de fertilisants N et P - modifiaient les dates de maturation des fruits de manière significative et avec un intérêt économique.

9.2. RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

Nos expérimentations se sont déroulées dans un verger adulte de plus de 15 ans à l'Institut Agronomique et vétérinaire Hassan II, Complexe Horticole d'Agadir, qui contient un certain nombre de variétés qui sont récoltées de différentes régions du Maroc et qui sont plantées dans une parcelle à la ferme expérimentale du Complexe d'Agadir. Ce verger pourrait faire l'objet d'un capital variétal sur lequel on pourrait mener des expérimentations sur un verger adulte assez représentatif de ce qui existe déjà dans la région et étendre les études à une gamme plus large de variétés.

Suite à notre travail, il est possible de *formuler quelques premières recommandations à destination des agriculteurs producteurs* de fruits de figuier de Barbarie. Sur des plantations adultes on pourra recourir à une irrigation mesurée, en utilisant un système d'irrigation localisée au goutte à goutte pour l'économie de l'eau et l'amélioration de la production et de la qualité des fruits, d'autant plus que le financement du système d'irrigation localisée au Maroc est encore assuré en totalité ou en partie (selon la superficie plantée) par l'état et supporté complètement dans le cadre du plan PMV (Plan Maroc Vert) pour les agriculteurs des zones arides qui sont des petits agriculteurs.

Il apparaît qu'un apport en élément potassium n'est pas nécessaire dans notre cas car, d'une part, le sol des essais est riche en cet élément et, d'autre part, un grand nombre d'auteurs ont indiqué que le cactus ne répond pas bien à la fertilisation potassique. La mise en œuvre d'une fertilisation phosphatée s'avère nécessaire du fait que nos résultats ont montré qu'il y a une amélioration dans le rendement de la production et la qualité des fruits à partir de la deuxième année des essais et que les sols de la région ont la même structure que celle des sols de la parcelle des essais. Elle sera idéalement basée sur les résultats d'analyse des sols permettant de bien évaluer les quantités de phosphore disponible pour la plante. En ce qui concerne la fertilisation en azote, suite aux réponses positives sur le rendement et la qualité des fruits enregistrées, il est manifeste que des apports de minimum 40 à maximum 120 kg N à l'hectare sur des vergers adultes et en pleine production peuvent être recommandés. L'irrigation des plantes au moment de la fertilisation a un effet très efficace sur l'absorption des éléments minéraux et leur circulation dans la sève et l'effet des fertilisants sur la plante devient plus important avec l'apport des irrigations. Il paraît aussi important de tenir compte de la composante restitution en matières organiques. Soit les cladodes et parties exploitables sont exportées comme fourrage par exemple; soit elles sont séchées dans un lieu à l'air libre, hors du verger, et restituées par la suite au sol du verger; soit des apports allochtones (apports de fumier, compost fabriqué à partir des raquettes ou autres matières organiques) sont réalisés. Ces variantes seront prises en compte dans le calcul raisonné des besoins en fertilisants de la plante.

On ne saurait terminer sans *évoquer quelques perspectives* adressées d'une part aux acteurs du secteur de la production – commercialisation des fruits d'opuntias afin

d'intégrer nos constatations dans leurs méthodes de culture, d'autre part aux chercheurs souhaitant approfondir, confirmer ou préciser nos expérimentations.

(i) en matière de production de fruits de figuier de Barbarie pour les vergers modernes installés ou pour les plantations traditionnelles existantes et dispersées. Pour les nouvelles plantations intensives, il serait bon de prévoir dès leur création l'installation de systèmes permettant à la fois l'irrigation localisée et la fertilisation minérale. Les goutteurs peuvent être en goutte à goutte ou en micro-aspersion. Ils ne seront pas trop densément répartis, compte tenu d'abord des écartements entre plantes mais surtout afin d'assurer avec de faibles volumes d'eau un apport suffisant en fertilisants sans risque de bouchage des orifices des goutteurs. La question des apports d'eau d'irrigation et des fertilisations minérales pour les jeunes plantations en début de croissance et développement n'a pas été traitée. Les recommandations faites ici concernent des plantations ayant au minimum cinq années et où la production fruitière a significativement commencé. Elles ont besoin d'investigations complémentaires.

(ii) pour l'orientation de futures recherches, il nous paraît utile de poursuivre des essais régionaux (au sens de "zone agro écologique"), sur des plantations installées pouvant être considérées comme "adulte en production" et sur deux ou trois cultivars bien identifiés – par exemple le cultivar local le plus représenté, le cultivar le plus représenté dans la région au sens plus large que local comme le cultivar Moussa dans la région sud, un des cultivars les plus cultivés dans le pays, notamment un cultivar inerte d'*O. ficus-indica*.

Il sera utile de bien préciser les propriétés des sols, du climat et de suivre la phénologie et ses éventuelles variantes, et surtout d'enregistrer les rendements, les caractéristiques extérieures de la qualité commerciale et la dynamique de la maturation (quantités récoltées au cours du temps tout au long de la période de maturation).

Il s'avère important de répéter nos essais dans la région de Souss, avec des apports plus élevés en azote, jusqu'à 100 et 120 kg à l'hectare et avec des traitements apportant simultanément des fumures organique et minérale. Des essais semblables devront être réalisés (i) dans les régions situées plus au sud (Guelmim, Ait Baâmrane à Sidi Ifni) où des variétés de cactus (variétés 'Aissa' et 'Moussa') ou localités de production (localités de Mesti et de Sboya dans la région d'Ait Baâmrane) sont plus tardives que d'autres, et

(ii) dans les régions nord du pays, comme les régions de Chaouia Ouardigha et de Doukkala, où l'effet des fertilisants peut être plus important du fait d'une pluviométrie plus élevée dans ces régions.

Une autre thématique d'expérimentation devrait avoir pour objectif de déterminer les effets de diverses fumures organiques, puisque certains auteurs ont rapporté que la fumure organique a un effet positif sur le rendement de la production (Chenna Kesava et al. 2014). Ces essais sur la fumure organique peuvent être également intéressants si on vise une production biologique pour les consommateurs à la recherche de produits sans engrais chimiques ni pesticides.

Il semble quasi-évident que la fertilisation NP ne s'avérera positive que si l'on dispose des moyens d'assurer une irrigation mesurée au cours des éventuelles périodes de sécheresse à partir de la floraison et jusque la formation complète des fruits. Ceci est surtout valable pour l'élément N. L'élément P manifesterait lentement ses effets au cours de plusieurs années postérieures à son apport. Il ne semble pas devoir constituer nécessairement un facteur variable de l'expérimentation, on privilégiera plutôt le couple N x irrigation. Un apport de 60 à 80 kg de P₂O₅ peut être recommandé pour une plantation adulte en production. Les exportations de la culture du figuier de Barbarie en P peuvent varier de 10 kg/ha en culture non fertilisée à 20-30 kg/ha en culture qui reçoit une fertilisation (Da Silva et al., 2016)

Il nous paraît aussi utile de mener le même type d'expérimentation sur des plantations jeunes ou en cours d'installation. Ici, la question d'un apport raisonné de P en localisé au niveau du système racinaire apparaît non dénuée d'intérêt.

Références

Chenna Kesava RS, Sucharitha KV, Venkata Ramana DK, Raveendra RM et Syamala B 2014. Medicated prickly pear (*Opuntia ficus indica*)-the new emerging agricultural crop in arid and semi-arid regions of India. International Journal of Applied Biology and Pharmaceutical Technology, 5(4), 264-270.

Da Silva JA, Donato SRL, Donato PER, Sousa ES, Padilha Junior MC et Silva Junior AA 2016. Extraction/export of nutrients in *Opuntia ficus-indica* under different spacings and chemical fertilizers. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 20(3), 236-242.