

Résumé

En raison de leurs valeurs nutritionnelle et économique élevées, l'amandier cultivé (*Prunus dulcis* [Mill.] D.A. Webb) est l'un des arbres fruitiers à noyau les plus importants à l'échelle mondiale. Au Maroc, cette espèce est la plus importante parmi les rosacées fruitières. La production marocaine (environ 102085 tonnes d'amandes non décortiquées) est la quatrième à l'échelle mondiale mais elle oscille considérablement d'une année à l'autre et reste relativement faible par rapport à celles des États-Unis et l'Espagne. Les vergers marocains sont principalement basés sur certains cultivars commerciaux originaires de France, d'Espagne et d'Italie. La survenue des gelées printanières provoque de graves dommages aux fleurs et jeunes fruits, ce qui menace la production. Les travaux de recherche effectués dans le cadre de cette thèse se sont articulés autour de trois axes principaux : La caractérisation phénologique, (ii) l'évaluation des caractéristiques physiques des fruits et (iii) l'évaluation de la qualité des huiles et des tourteaux d'amandons. Notre étude a porté sur les principaux cultivars plantés au Maroc, à savoir : 'Marcona', 'Fournat de Brézenaud', 'Ferragnès', 'Ferraduel' et 'Tuono'. Afin d'évaluer les effets des conditions environnementales sur la phénologie et la qualité des fruits, notre étude a été conduite dans cinq sites différents dans le nord (Aknoul, Bni Hadifa et Tahar Souk) et l'est du Maroc (Rislane et Sidi Bouhria) pendant trois campagnes agricoles successives.

Dans le premier chapitre consacré à la caractérisation phénologique, nous avons développé une échelle phénologique selon le système BBCH. Différents stades de développement ont été identifiés, codifiés et décrits. Huit des dix principaux stades (0 à 9) de l'échelle BBCH ont été identifiés et divisés en phénologies végétative et reproductrice. La phénologie végétative comprend le développement des bourgeons (stade 0), des feuilles (stade 1), des pousses (stade 3), et la sénescence et le début de la période de repos (stade 9). La phénologie reproductrice englobe les quatre stades suivants : Emergence de l'inflorescence (stade 5), floraison (stade 6), développement du fruit (stade 7), et maturité du fruit (stade 8). Le calendrier phénologique de nos cultivars a été établi suivant les conditions climatiques du nord du Maroc. Dans la deuxième partie de ce chapitre et sur la base de visites périodiques et de relevés météorologiques dans les cinq sites d'étude, nous avons déterminé les besoins en froid (Unités de froid, UF) et en chaleur à l'aide de modèles degrés-jours de croissance (DJC) et degrés-heures de croissance (DHC) pour la floraison et la maturité. Les UF ont été faibles pour les cultivars à floraison précoce ('Marcona') et intermédiaire ('Fournat de Brézenaud') et élevées pour les cultivars à floraison tardive ('Ferragnès', 'Ferraduel' et 'Tuono'). Les DJC et DHC ont différé également d'une manière significative entre les cultivars, les sites et les campagnes agricoles. La troisième partie de ce chapitre a été consacrée à l'évaluation de la sensibilité au gel des boutons floraux par la technique de la fluorescence chlorophyllienne (Fv/Fm). Les résultats de cette partie indiquent une diminution linéaire du rapport Fv/Fm en fonction de la température d'incubation traduisant une sensibilité au gel pour les cultivars 'Ferragnès' et 'Ferraduel' à floraison tardive. Une diminution de type quadratique du rapport Fv/Fm avec un point d'inflexion à -1°C a été révélé pour 'Tuono' et les cultivars à floraison précoce ('Marcona') et intermédiaire ('Fournat de Brézenaud') indiquant une tolérance au froid chez ces cultivars. Cependant, 'Ferragnès' et 'Ferraduel' (à floraison tardive) ne seront probablement pas affectés par les basses températures puisqu'ils échapperont au risque de gel.

Dans le deuxième chapitre de cette thèse, nous avons évalué certaines propriétés physiques des amandes et amandons. Les déterminations géométriques ont été effectuées à la fois sur les amandes et amandons et ont consisté en neuf paramètres : la longueur (L), la largeur (l), l'épaisseur (E), le diamètre arithmétique moyen (D_a), le diamètre géométrique moyen (D_g), la sphéricité (Φ), le volume (V), la surface (S_a) et l'aire projetée (P_a). Les analyses ANOVA ont montré que le cultivar, le site, la campagne agricole, et la plupart de leurs interactions ont affecté significativement tous les paramètres étudiés. L et Φ ont été génétiquement contrôlées, alors que E a été dépendante de l'environnement pour les amandes et les amandons ainsi que D_g , V, S_a , P_a pour les amandes. Les autres traits ont été déterminés conjointement par les effets génotypiques et environnementaux. Les comparaisons des moyennes entre cultivars ont montré que 'Marcona' et 'Fournat de Brézenaud' ont affiché les valeurs les plus élevées pour toutes les propriétés géométriques. Les mesures gravimétriques ont consisté en : Le poids des fruits avec mésocarpe (PM), poids des amandes (PA), poids des amandons (P_{am}), le pourcentage du mésocarpe (P_m), le rendement au concassage (RC), la densité réelle (ρ_t), la densité en vrac (ρ_b) et la porosité (ϵ). Les résultats de l'ANOVA ont montré que le cultivar, le site, la campagne agricole et leurs interactions ont affecté significativement la plupart des traits gravimétriques. En fait, P_m , ρ_b des amandons et ρ_t et ρ_b des amandes ont été principalement sous dépendance génotypique, tandis que la campagne agricole (facteur climatique) a été la principale source de variabilité de P_{am} . De plus, le site (facteur édaphique) a été le facteur le plus important pour PM, PA et ρ_t des amandes, tandis que RC et ϵ des amandes et amandons ont été contrôlés conjointement par des facteurs génétiques et édaphiques. Les amandons de nos cultivars ont été moyennes ('Tuono', 'Ferraduel', 'Ferragnès' et 'Marcona') et grandes ('Fournat de Brézenaud'). En outre, les amandes correspondantes ont été de coques dures ('Fournat de Brézenaud', 'Tuono' et 'Ferragnès') à très dures ('Ferraduel' et 'Marcona'). Parmi les sites, les fruits récoltés des sites de l'est du Maroc ont affiché les valeurs les plus élevées en termes de PM, PA, P_{am} , ρ_t et ρ_b . Aknoul et Tahar

Souk (nord du Maroc) ont présenté les valeurs les plus élevées en termes de P_m et ε des amandes et amandons. Les indices de couleur des amandons ont été également évalués, à savoir : L'indice de luminosité (L^*), l'indice de rouge (a^*), l'indice de jaune (b^*), la chroma (C^*), l'angle de teinte (H^*) et la saturation métrique (S^*). Les résultats de l'ANOVA ont mis en évidence des effets significatifs de tous les facteurs (le cultivar, le site et la campagne agricole) ainsi que la majorité de leurs interactions sur les indices de couleur des amandons. Cependant, la majorité de ces propriétés ont été contrôlées génétiquement. 'Marcona' a présenté le L^* le plus élevé, tandis que 'Ferragnès' et son pollinisateur 'Ferraduel' ont affiché les scores les plus élevés pour a^* , b^* , C^* et S^* . Entre les sites, Sidi Bouhria a présenté les valeurs de L^* les plus basses et les plus élevées pour a^* , H^* et S^* . De plus, Bni Hadifa a affiché des valeurs plus élevées de L^* , b^* et C^* . Pour les campagnes agricoles, 2016 a présenté les valeurs les plus élevées de la plupart des indices de couleur.

Le troisième chapitre a été consacré à l'évaluation de certains paramètres de qualité de l'huile et des tourteaux d'amandons. Après extraction par presse mécanique, la teneur en huile (TO) a été calculé. Les déterminations de la qualité de l'huile ont concerné l'indice d'acide (IA), l'indice de peroxyde (IP), les coefficients d'absorption UV (K_{232} et K_{270}) et la teneur en polyphénols (PP). La composition en acides gras a été déterminée à l'aide de la technique CPG pour des échantillons collectés durant la campagne agricole 2017 à Aknoul et Sidi Bouhria. Les acides gras saturés (AGS), monoinsaturés (AGMI), polyinsaturés (AGPI) et le rapport acide oléique / acide linoléique (O/L) ont été calculés. Les résultats de l'ANOVA ont montré que tous les facteurs (le cultivar, le site et la campagne agricole) et la plupart de leurs interactions ont affecté significativement les caractéristiques physico-chimiques étudiées, étant le cultivar la principale source de variabilité. 'Marcona' a montré sa supériorité pour TO (57,70% de MS), tandis que 'Fournat de Brézenaud' a présenté les valeurs les plus élevées des PP (0,84 mg AG / g d'huile), de IA (0,90% d'acide oléique) et de IP (0,42 méqO₂/kg d'huile). Les valeurs les plus élevées de K_{232} (1,99) et K_{270} (0,20) ont été enregistrées respectivement chez 'Ferragnès' et 'Ferraduel'. Entre les sites, Sidi Bouhria a présenté les valeurs les plus élevées de TO (54,57), PP (0,81), K_{232} (1,71) et K_{270} (0,17). En ce qui concerne les campagnes agricoles, 2016 a été caractérisée par ses scores les plus élevés pour tous les paramètres étudiés. Nos résultats pour les acides gras ont révélé la présence de 11 acides gras avec de grandes variabilités entre les cultivars et les sites. Cependant, les principaux acides gras ont été : L'acide oléique (C18:1), l'acide linoléique (C18:2), l'acide palmitique (C16:0), l'acide stéarique (C18:0) et l'acide palmitoléique (C16:1). Les AGMI (principalement C18:1) ont été les plus importants parmi les acides gras, suivis par les AGPI (principalement C18:2) et des AGS (principalement C16:0). Le rapport O/L est un bon critère de qualité des amandons car des valeurs élevées indiquent une plus grande stabilité de l'huile et une meilleure qualité des amandons. Dans nos résultats, le rapport O/L a varié significativement entre les cultivars, la valeur la plus élevée a été trouvée chez 'Ferraduel' (4,55) et la plus faible chez 'Fournat de Brézenaud' (3,20). Nos résultats ont démontré que les échantillons d'huile obtenus ont été généralement d'excellente qualité avec des faibles valeurs de IA, IP, K_{232} et K_{270} d'une part et des valeurs élevées des PP et de O/L d'autre part. Afin de caractériser les tourteaux des amandons en tant que sous-produit de l'extraction d'huile, nous avons évalué les teneurs des différents constituants tels que les protéines, l'humidité, les cendres, les huiles résiduelles, les glucides, ainsi que la valeur énergétique et le pH. Les analyses ANOVA ont montré des effets significatifs du cultivar, du site et de la campagne agricole ainsi que de la plupart des interactions. Pour les cultivars, 'Marcona' a montré la valeur la plus élevée de l'huile résiduelle et de la valeur énergétique, 'Fournat de Brézenaud' a présenté la plus grande teneur en protéines, et 'Ferragnès' a présenté les teneurs les plus élevées en cendres et en glucides. En ce qui concerne les sites, ceux de l'est ont affiché les valeurs les plus élevées en protéines, huile résiduelle, cendres, et valeur énergétique mais les teneurs plus faibles en humidité et glucides. En ce qui concerne les campagnes agricoles, 2018 (qui a été une année pluvieuse) a affiché la teneur la plus élevée en humidité et des faibles teneurs en protéines, cendres, huile résiduelle et valeur énergétique.

Mots-clés : Phénologie, échelle BBCH, besoins en froid et en chaleur, qualité du fruit, caractéristiques pomologiques, huile d'amandons, tourteaux d'amandons, effets génotypiques et environnementaux, analyses statistiques multivariées.