

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONNALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE

THESE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE DOCTEUR EN SCIENCES

AGRONOMIQUES

OPTION : PRODUCTION VEGETALE

**Impacts du réchauffement climatique
sur la phénologie du pommier et de la
vigne en Algérie.**

Présentée par

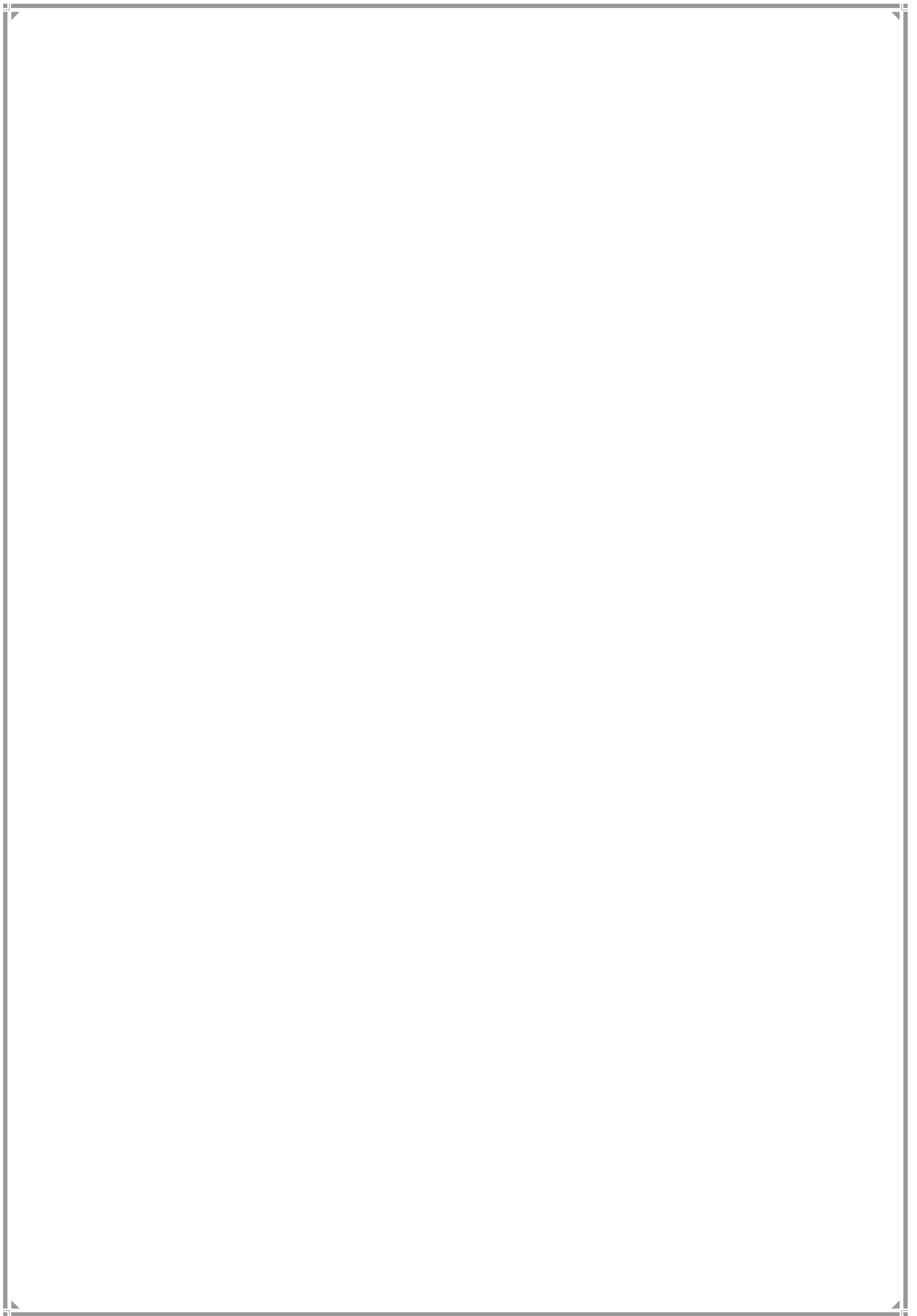
ABED AICHA

Devant le jury composé de :

Présidente	S. Benhouhou	Professeur	ENSA El-Harrach
Directeur de thèse	D. Baali-Cherif	Professeur	ENSA El-Harrach
Conseiller scientifique	G. Bourgeois	Professeur	Centre de recherche agronomique, Québec, Canada
Examineurs	A. ELYaacoubi	Professeur	Ecole supérieure de technologie de khénifra, Maroc
	R. Djebbar	Professeur	FSB-USTHB Bab-Ezzouar
	N. Lassouane	Maitre de conférences	ENSA El-Harrach

Année universitaire

2021 / 2022



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mon défunt père, qu'il trouve ici mon témoignage d'amour, pour ses sacrifices et ses encouragements.

A la mémoire de ma sœur Salima

A ma très chère mère, que Dieu la protège

A ma sœur Hassiba, mon beau-frère Mohamed et leurs enfants

Ma sœur Amel

A mes frères, leurs femmes et leurs enfants

A mes oncles Ahmed et Abed

A ma tante Khadidja, ma cousine Khira et ses enfants

Remerciements

Tout d'abord je remercie le bon dieu tout puissant de m'avoir aidé et donné courage et patience afin d'accomplir cette tâche.

Je tiens à remercier mon directeur de thèse Pr. Baali Cherif Djamel de m'avoir fait confiance, en me sollicitant à ce thème que je le considère comme un vrai challenge, qu'il trouve ici ma sincère reconnaissance pour ses orientations, ses conseils et ses remarques.

Mes chaleureux remerciements vont à mon Conseiller de thèse Pr. Gaétan Bourgeois, directeur de recherche au centre de recherche agronomique et agro-alimentaire du Québec, Canada, d'avoir accepté mon encadrement et pour le temps qui m'a accordé malgré ses préoccupations, sans oublier ses conseils et ses orientations dans la rédaction de mon article et la correction de la thèse. Ses remarques m'ont aidé à améliorer ce travail.

Ma profonde gratitude est destinée au Dr Marc Bonhomme ingénieur de recherche à l'INRA de Clermont Ferrand et sa femme Anne-marie Bonhomme, leur assistance presque continue, leurs conseils, et leur soutien morale m'ont profondément ému et marqué. C'est grâce à eux que j'ai pu aller en avant. Je ne saurais remercier Mr Bonhomme pour son aide précieuse dans la rédaction de l'article.

J'exprime aussi au terme de ce travail ma gratitude et reconnaissance à mon collègue chercheur, Dr Adnane El Yaacoubi Professeur à l'Ecole Supérieure de Technologie de Khénifra, d'avoir accepté d'être parmi les membres du jury, de m'avoir aidé à faire les analyses statistiques et pour ses idées qui ont été d'une grande utilité, vous m'avez porté de l'aide dans les moments difficiles de la réalisation de cette thèse. Merci beaucoup Adnane.

Je remercie Mme S. Benhouhou, professeur à l'ENSA d'El Harrach de m'avoir honoré en acceptant de présider le jury, ses remarques vont sûrement enrichir le travail.

Tous mes remerciements sont adressés aussi à Mr R. Djebbar professeur à FSB-USTHB Bab-Ezzouar et Mme N. Lassouane maître de conférences A à l'ENSA d'El-Harrach d'avoir accepté d'examiner le travail, leurs remarques me seront d'une grande importance afin d'améliorer la qualité de ce document.

Je ne pourrais aussi oublier l'assistance et l'aide de Mr André Lacoïnte directeur de recherche à l'INRA de Clermont-Ferrand, je lui adresse mes sincères remerciements.

Je tiens à témoigner ma profonde reconnaissance au DR Inaki Garcia De Cortázar-Atauri, chercheur au laboratoire de l'INRA d'Avignon pour son dévouement et sa patience avec moi lors de mon séjour et d'avoir mis du temps pour m'apprendre à travailler sur le logiciel PMP.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Jean-Michel Legave pour sa compréhension et sa confiance. Son rôle était très important depuis la conception du sujet.

Je remercie autant les institutions, l'unité de recherche UMR-PIAF de l'INRA de Clermont Ferrand, l'unité Agroclim de l'INRA d'Avignon, l'ITAFV de Benchicao, sous la direction de Mme Benyoucef Khira et le laboratoire de l'institut régional de la protection des végétaux sous la direction de Mr Boualem Mghaneg, pour leur aide précieuse et de m'avoir ouvert leurs portes, que tous leurs personnels trouveront ici ma profonde gratitude.

Les défis rencontrés au cours de cette étude ont été surmontés par la motivation quotidienne de mes chères amies, Fatima Hadj Benali, Ouda Djabri, et Fatima Nabad, Thoraya Dahmane et Zakia kaci.

Mes sincères remerciements à tous ceux qui, de près ou de loin, ont apporté une touche à cette étude et qui n'ont pas été cités.

Avant-propos

Ce travail a été proposé et considéré comme étant le premier noyau d'une éventuelle collaboration qui n'a pas vu la lumière entre l'INRA de Montpellier (France) et les institutions algériennes comme l'institut national de recherche agronomique, l'institut technique des arbres fruitiers et de la vigne et l'office national de la météorologie.

A défaut des stations expérimentales pilotes où on peut avoir des notations climatiques et phénologiques anciennes archivées et récentes, notre première démarche était de réaliser des collectes de séries chronologiques de températures, de pluviométrie et de deux stades phénologiques clés (le débourrement et la floraison) utilisées dans l'identification de toutes variations climatiques, allant de 1980 à 2016.

L'objectif était de construire une base de données fiable qui nous a servi dans nos expérimentations du déterminisme de réchauffement climatique, et qui sera peut-être enrichi par d'autres travaux au fur et à mesure.

Deux espèces ont été choisies, le pommier et la vigne. Elles sont considérées comme deux espèces indicatrices de réchauffement climatique, et ce à travers les conclusions faites suites à plusieurs travaux de recherche dans le monde entier, à côté de leur importance économique sur le marché algérien et les surfaces agricoles dont elles occupent.

La majeure partie des analyses expérimentales en plus de la modélisation phénologiques du pommier via la plateforme phénologique PMP 5.5 ont été effectuées à l'INRA de Clermont-Ferrand (France), en plus des analyses réalisées sur la vigne. Cela nous a permis d'approfondir nos connaissances scientifiques sur les effets des changements climatiques sur l'évolution des processus phénologiques dans des régions à climat contrasté au Nord de l'Algérie.

Résumé

Le réchauffement climatique est une réalité fortement ressentie depuis quelques années en Algérie. L'arboriculture fruitière se trouve particulièrement exposée aux impacts de ce réchauffement, notamment le pommier et la vigne. L'effet de la variabilité climatique sur le comportement de ces deux espèces a été étudié grâce à une analyse comparative entre une série chronologique de températures journalières, allant de 1980 à 2016, et une série d'observations phénologiques (débourrement et floraison), allant de 2000 à 2016, et de 1988 à 2016 dans trois régions à climats contrastés, dans le Nord de l'Algérie, Benchicao, wilaya de Médéa (le pommier, 'Golden Delicious' et la vigne, 'Muscat Italia'), Sidi Lakhdar et Boumedfaa, wilaya d'Ain Defla ('Golden Delicious' et 'Muscat Italia' respectivement). Trois approches ont été entreprises : statistique, biologique et modélisation. L'approche statistique a été effectuée sur les données climatiques des trois régions à climats contrastés. L'approche biologique a consisté à déterminer les périodes majeures d'accumulation des besoins en unités de froid et en chaleur coïncidant avec le début de débourrement et le début de floraison des espèces étudiées. Les données climatiques et phénologiques de chaque espèce ont été utilisées dans la modélisation pour prédire les dates futures de débourrement et de floraison. Des tendances contrastées selon les sites et la période ont été démontrées : un réchauffement très prononcé à Sidi Lakhdar et Boumedfaa à l'automne et au printemps, notamment aux mois d'octobre et d'avril, perturbant ainsi l'entrée en dormance des bourgeons du pommier. Il en résulte une action tardive du cumul en unités de froid jusqu'au mois de février qui s'est avérée insuffisante. En outre, une tendance à la précocité des dates de débourrement des bourgeons de la variété 'Muscat Italia' de la vigne a été signalée à Boumedfaa. Aucun réchauffement moyen n'a été mis en évidence à Benchicao, où les températures de la période s'étalant entre novembre et janvier et celles du mois de janvier se sont avérées plus importantes pour satisfaire les besoins en unités de froid et lever la dormance de la variété 'Golden Delicious'. Cependant, une tardivité a marqué le débourrement de la vigne, il semble que la baisse continue des températures pendant la période février à mars a entravé la levée de dormance des bourgeons. La non satisfaction des besoins en unités de froid dans le site de Sidi Lakhdar et Boumedfaa a fortement affecté les efficacités d'ajustement des modèles classiques de la phénologie, confirmant indirectement l'existence de non prise en compte par ces modèles, de processus physiologiques plus complexes qui se manifestent dans des zones limites comme Sidi Lakhdar et Boumedfaa.

Mots clés : réchauffement climatique, pommier, vigne, débourrement, floraison, modélisation.

Abstract

Global warming has been a reality that has been strongly felt for several years in Algeria. Fruit tree growing is particularly exposed to the impacts of this warming, especially apple trees and vines. The effect of climatic variations on the behavior of these two species was elucidated by a comparative study between a time series of daily temperatures ranging from 1980 to 2016 and a series of phenological data (bud break and flowering) ranging from 2000 to 2016 and from 1988 to 2016 in three regions with contrasting climates, in the North of Algeria; Benchicao, town of Médéa (apple tree, Golden Délicious and vine, Muscat Italia), Sidi Lakhdar (Golden Delicious) and Boumedfaa (Muscat Italia), town of Ain Defla. Three approaches have been taken; statistics, biological and modeling. The statistical approach was carried out on climatic data from the three regions with contrasting climates. The biological approach consisted in determining the major periods of accumulation of cold and heat requirements coinciding with the start of bud break and the start of flowering of the species studied. Climatic and phenological data for each species were used in the modeling to predict future budding and flowering dates. Contrasting trends according to the sites and the period were demonstrated: very significant warming at Sidi Lakhdar and Boumedfaa site in autumn and spring, in particular in October and April, disturbing thus the entrance of the buds in the endodormancy and ecodormancy of apple buds. The result is a late action of the cold until February, which proved to be insufficient. In addition, a tendency for early bud break dates on the vines was reported in Boumedfaa. No average warming has been demonstrated at the Benchicao site, where the temperatures between November and January were cold enough to satisfy the need of cold units and raise the endodormancy of the Golden Delicious variety. However, the budding of the vines came late, it seems that the continuous drop in temperatures during the period February to March hampered the breaking of dormancy in the buds. The non-satisfaction of the needs for cooling units at the Sidi Lakhdar and Boumedfaa site has strongly affected the adjustment efficiencies of the classical models of phenology, indirectly confirming the existence, not taken into account by these models, of more physiological processes complexes that manifest themselves in borderline areas such as Sidi Lakhdar and Boumedfaa.

Key words: Global warming, apple tree, vine, bud break, flowering, modeling.

ملخص:

أصبحت ظاهرة الاحتباس الحراري واقع محسوس في هاته السنوات الاخيرة في الجزائر . تعتبر الاشجار المثمرة من بين النباتات الاكثر تعرضا لظاهرة الاحتباس الحراري خاصة نوعي التفاح والكروم. إن تأثير التغيرات المناخية على هاذين النوعين كان الهدف الرئيسي لهذا البحث . تمثلت هذه الدراسة في مقارنة سلسلة من درجات الحرارة الممتدة من 1980 إلى 2016 مع التغير في تواريخ التبرعم والإزهار لصنفين من التفاح والعنب على التوالي : Golden Delicious و Muscat Italia الممتدة من 2000 إلى 2016 ومن 1980 إلى 2016 في ثلاث مناطق من شمال الجزائر مختلفة بمناخاتها وتضاريسها على التوالي بن شكاو (التفاح والكروم) سيدي لخضر (التفاح) وبومدفع (الكروم) اعتمدت ثلاث آليات بحث للوصول الى الاهداف:

- آلية إحصائية: على المعطيات المناخية (درجة الحرارة) في المناطق الثلاث؛
- آلية بيولوجية: تمثلت في تحديد فترات تراكم كميات البرودة والحرارة المصادفة لعملية التبرعم والازهار لكلا النوعين؛
- آلية التصاميم: تم استعمال المعطيات المناخية وتواريخ التبرعم والإزهار في التصاميم من أجل ايجاد تواريخ مستقبلية لدورتي التبرعم والإزهار .

على ضوء هذه الدراسة واعتمادا على المناطق والفترات الزمنية ظهر منحى للاحتباس الحراري في كل من سيدي لخضر وبومدفع في فصلي الخريف والربيع لارتفاع درجة حرارة شهري أكتوبر وأفريل مما أدى الى التعطيل في الدخول في عملية السبات لبراعم التفاح نتيجة لعدم تشبع هاته الاخيرة من كميات البرودة التي كانت غير كافية. في حين وجد منحى نحو التقدم في تواريخ التبرعم والإزهار لبراعم الكروم في منطقة بومدفع. لم يسجل أي احتباس حراري لمنطقة بن شكاو اين كانت لدرجة الحرارة الممتدة بين شهري نوفمبر وجانفي أهمية قصوى في تراكم البرودة اللازمة، التي سمحت بالدخول المبكر في عملية السبات لبراعم التفاح وبالتالي تبرعمها في وقت مناسب. الا أنه سجل تأخر تبرعم الكروم نظرا للانخفاض المحسوس في درجات الحرارة في الفترة الممتدة بين فيفري ومارس الذي لم يتوافق مع فيزيولوجية النبات.

ان عدم التشبع من كميات البرودة في منطقتي سيدي لخضر وبومدفع أحدث خلافا في فعالية التصاميم المستعملة في دورتي التبرعم والإزهار وهذا يدل على وجود عوامل بيئية أخرى لها تأثير على فيزيولوجية النبات، لم تأخذ بعين الاعتبار في منطقتين حاريتين كسيدي لخضر وبومدفع .

الكلمات المفتاحية : الاحتباس الحراري، التفاح، الكروم، التبرعم، الإزهار، التصميم

Liste des tableaux

Tableaux		Pages
1	Projections du réchauffement global moyen en surface et de l'élévation du niveau de la mer à la fin du XXI ^e siècle.	28
2	Principaux stades de développement selon l'échelle BBCH.	39
3	Besoin en froid de quelques espèces fruitières (Childers, 1978).	51
4	Composition texturale de sol à Benchicao.	77
5	Analyse physique de sol (ITGC Khemis Miliana, 2007).	78
6	Analyse chimique de sol (ITGC Khemis Miliana, 2007)	78
7	Données de températures collectées et de phénologie et la localisation géographique des sites de Benchicao, Sidi Lakhdar et Boumedfaa.	80
8	Paramètres des modèles utilisés dans la modélisation	88
9	Moyennes annuelles minimales, maximales et moyennes dans les trois sites étudiés avec leurs coefficients de régression de Spearman.	102
10	Températures moyennes aux sites de Benchicao, Boumedfaa et Sidi Lakhdar pendant 36 ans (1980-2016).	105
11	Tendances et moyennes annuelles des quantités de froid et de chaleurs accumulées selon différents modèles à Benchicao, Sidi Lakhdar et Boumedfaa.	112
12	Tendances mensuelles des quantités en unités de froid et de chaleur accumulées selon différents modèles à Benchicao, Sidi Lakhdar et Boumedfaa.	116
13	Tendance de l'évolution des deux stades de débourrement et de floraison pour la variété 'Golden Delicious' du pommier de 2000 à 2016 et la variété 'Muscat Italia' de la vigne de 2000 à 2016 au site de Boumedfaa et de 1988 à 2016 au site de Benchicao.	127
14	Corrélation de Spearman entre les températures mensuelles et les deux stades phénologiques du pommier (débourrement et floraison) avec la période d'octobre à avril (deb : débourrement, flor : floraison).	132
15	Valeurs de corrélation de Spearman entre les quantités annuelles de froid et de chaleur et les deux stades phénologiques du pommier (débourrement et floraison) pendant la période d'octobre à avril (Weinb : Weinberger,	133

Dyn : Dynamique, C.N : Caroline du nord) pendant la période d'accumulation de froid et la période d'accumulation de chaleur respectivement, sur les deux sites d'étude ; Benchicao et Sidi Lakhdar.

16	Valeurs de corrélation de Spearman entre les quantités mensuelles de froid et de chaleur et les deux stades phénologiques (débourrement et floraison) du pommier et de la vigne (deb : débourrement, flor : floraison).	135
17	Corrélation de Spearman entre les températures mensuelles, moyennes, minimales et maximales et les deux stades phénologiques (débourrement et floraison) pendant la période d'octobre à mai chez la vigne (Deb : débourrement, Flor : floraison).	138
18	Valeurs de corrélation de Spearman entre les quantités annuelles d'unités de froid et de chaleur et les deux stades phénologiques de la vigne (débourrement et floraison) pendant la période d'octobre à mai (Weinb : Weinberger, Dyn : Dynamique, C.N : Caroline du Nord).	140
19	Résultats de modélisation à une phase des dates de débourrement et de floraison du pommier des deux sites ensemble.	155
20	Résultats de modélisation à deux phases des stades de débourrement et de floraison du pommier dans les deux sites ensemble.	157
21	Résultats de modélisation à une phase des dates du débourrement et de floraison du pommier au site de Benchicao.	159
22	Résultats de modélisation à deux phases des dates de débourrement et de floraison du pommier au site de Benchicao.	161
23	Résultats de modélisation à une phase des dates, de débourrement et de floraison du pommier au site de Sidi Lakhdar.	163
24	Résultats de modélisation à deux phases des dates de débourrement et de floraison avec toutes les années et sans les années où les besoins en unités de froid n'ont pas été satisfaits chez le pommier au site de Sidi Lakhdar	164
25	Résultats de modélisation à une phase des dates de débourrement et de floraison de la vigne dans les deux sites ensemble (Benchicao et Boumedfaa), Benchicao et Boumedfaa séparés.	167

26	Résultats de modélisation à deux phases des dates de débourrement et de floraison de la vigne dans les deux sites d'étude ensemble (Benchicao et Boumedfaa).	169
27	Résultats de modélisation à deux phases des dates de débourrement et de floraison de la vigne à Benchicao.	172
28	Résultats de modélisation à deux phases des dates de débourrement et de floraison de la vigne à Boumedfaa.	175

Liste des figures

Figures		Pages
1	Evolution de la température suivant la moyenne de 1960-1990 et de la constante solaire de 1611 à 1980.	6
2	Processus de l'effet de serre	7
3	Représentation schématique des quatre grandes catégories de scénarios d'émission d'aérosols et de gaz à effet de serre du SRES selon leur association aux facteurs économiques ou environnementaux globaux ou régionaux.	25
4	Concentration en CO ₂ selon les scénarios futurs.	27
5	La phénologie : élément de l'autécologie et marqueur des changements environnementaux.	37
6	Différentes phases de dormance élaborée par Legave (2011)	43
7	Evolution de la date F1 (10 % de fleurs épanouies) du pommier Golden Delicious dans trois sites représentatifs de la production.	50
8	Synthèse des effets attendus des changements climatiques sur les systèmes agricoles.	58
9	Trois catégories des modèles phénologiques et leurs subdivisions selon Cook et al, (2010).	65
10	Localisation géographique des deux wilayas, Ain Defla (Sidi Lakhdar, Boumedfaa) et Médéa (Benchicao) sur la carte d'Algérie.	73
11	Localisation géographique des sites d'étude Benchicao, Sidi Lakhdar et Boumedfaa	75
12	Représentation schématique de l'ajustement mathématique de l'estimation des températures horaires journalières. (1) heure de la température minimale du jour j ; (2) heure de la température maximale au jour j ; (3) heure de la température minimale au j+1 (El Yaacoubi, 2016).	81
13	Logiciel de conversion « daily to hourly temperature convetor ».	82
14	Attribution des unités de froid pour une température donnée selon les modèles Weinberger (0-7.2°C), Utah, Caroline du Nord et Dynamique.	83
15	Plate-forme PMP 5.5 de modélisation phénologique	90
16	Fonction <i>f Chuine</i> avec a = 0,1 et c = -10 et b = 0,1 sur le panneau de gauche, b = -5 sur le panneau du milieu.	92

17	Fonction de <i>f GDD</i> avec $Qb=10$.	93
18	Fonction <i>f Richardson</i> avec $T_{high} = 20$, $T_{low} = 5$.	94
19	Fonction <i>f Richardson_inverse</i> avec $T_{high}=20$, $T_{low}=5$.	94
20	Fonction <i>f Sigmoide</i> avec $b = 10$ et $a = -0,2$ sur le panneau de gauche et $b = -5$ sur le panneau de droite.	95
21	Fonction <i>f SmoothUtah</i> avec $T_{opt} = 5$, $T_{m1} = -50$, $T_{n2} = 10$ et $\min = 0$ sur le panneau de gauche, -1 sur le panneau de droite.	96
22	Fonction <i>f Wang</i> avec $T_{opt} = 0.1$, $T_{min} = -15$, $T_{max} = 10$.	97
23	Moyennes annuelles des températures (minimales, moyennes, maximales) des trois sites, Sidi Lakhdar (SD), Boumedfaa (BM) et Benchicao (MD) de 1980 à 2016. (*indique le niveau de signification des corrélations (*P < 0.05; ** P < 0.01).	103
24	Evolution des températures moyennes mensuelles sur les 3 sites pour les mois où la tendance est significative, a) Sidi Lakhdar pour les mois d'octobre et d'avril, b) Boumedfaa pour les mois d'octobre, d'avril et de mai, c) Benchicao pour les mois de novembre et février. Les *indiquent le niveau de signification de la corrélation (* p < 0.05 ; ** p < 0,01).	107
25	Cumuls moyens annuels des précipitations, a) Sidi Lakhdar, b) Boumedfaa durant la période 1980 à 2016 et c) Benchicao durant la période 1987 à 2016	109
26	Cumuls moyens mensuels des précipitations, a) Sidi Lakhdar, b) Boumedfaa durant les deux périodes 1980 à 1998 et 1999 à 2016 et c) Benchicao durant les deux périodes 1987 à 1998 et 1999 à 2016.	110
27	Évolution des quantités annuelles des unités de froids calculées avec quatre modèles (Weinberger, Utah, Dynamique et Caroline du Nord) dans les trois sites d'étude, a) Benchicao, b) Sidi Lakhdar, c) Boumedfaa.	113
28	Évolution des quantités mensuelles des unités de froids calculées avec quatre modèles (Weinberger, Utah, Dynamique et Caroline du Nord) dans les trois sites d'étude, a) Benchicao, b) Sidi Lakhdar et c) Boumedfaa.	115
29	Évolution des quantités en unités de chaleur annuelles dans les trois sites d'étude, a) Benchicao, b) Sidi Lakhdar, c) Boumedfaa, calculées par le modèle GDH (tb 4,5).	118
30	Evolution des quantités mensuelles en unités de chaleur dans les trois sites d'étude, calculées par le modèle GDH.	119

31	Evolution des dates de débourrement et de floraison de la variété 'Golden Delicious' du pommier aux sites de Sidi Lakhdar et de Benchicao pendant la période 2000 - 2016.	128
32	Evolution des dates de débourrement et de floraison de la variété 'Muscat Italia' de la vigne aux sites de Boumedfaa de 2000 à 2016 et de Benchicao de 1989 à 2016.	130
33	Autocorrélation par PLS entre la moyenne mobile de 11 jours des températures moyennes journalières de la période octobre- mai et les dates de début de floraison de la variété 'Golden Delicious' du pommier, a) Benchicao et b) Sidi Lakhdar.	143
34	Autocorrélation par PLS entre la moyenne mobile de 11 jours des températures moyennes journalières de la période octobre- mai et les dates de début de floraison de la variété 'Muscat Italia' de la vigne, a) Benchicao et b) Boumedfaa.	144
35	Comparaison entre les dates observées de débourrement et de floraison et les dates prédites pour le pommier, a) dates de débourrement par le modèle Smoothed Utah dans les deux sites, b) dates de floraison par le modèle Wang (abscisse : dates observées, ordonnée : dates prédites).	156
36	Comparaison entre les dates observées de débourrement et les dates prédites pour le pommier. Par le modèle Chuine / Wang, a) dans les deux sites pour toutes les années, b) dans les deux sites sans les années où le cumul des unités de froid n'est pas satisfait (abscisse : dates observées ; ordonnée : dates prédites).	158
37	Comparaison entre les dates observées de floraison et les dates prédites pour le pommier, a) dans les deux sites pour toutes les années par le modèle Chuine / Sigmoid, b) dans les deux sites sans les années où le cumul des unités de froid n'est pas satisfait par le modèle Smooth Utah / Sigmoid (abscisse : dates observées ; ordonnée : dates prédites).	158
38	Comparaison entre les dates observées de floraison et les dates prédites par, a) le modèle Parabolic, b) le modèle Smoothed Utah au site de Benchicao (Médéa) (axe des abscisses ; dates observées, axe des ordonnées ; dates prédites).	160
39	Comparaison entre les dates observées de débourrement et les dates prédites dupommier au site de Benchicao par, a) le modèle Smoothed Utah /Wang, b) le modèle Chuine /Wang (abscisse : dates observées ; ordonnée : dates prédites). modèle Smooth Utah / Sigmoid (abscisse : dates observées ; ordonnée : dates prédites).	161
40	Comparaison entre les dates observées et les dates prédites de	162

	floraison du pommier au site de Benchicao par le modèle Chuine /Sigmoid (abscisse : date relevée ; ordonnée : date prédite).	
41	Comparaison entre les dates observées et les dates prédites de floraison du pommier au site de Sidi Lakhdar par le modèle à une phase Smoothed Utah (abscisse : dates observées ; ordonnée : dates prédites).	163
42	Comparaison entre les dates observées et les dates prédites par le modèle Chuine/ Sigmoid au site de Sidi Lakhdar avec toutes les années : a) débourrement et b) floraison (axe des abscisses ; dates observées, axe des ordonnées ; dates prédites).	165
43	Comparaison entre les dates observées et prédites de débourrement du pommier au site de Sidi Lakhdar sans les années où le cumul en unités de froid n'a pas été satisfait par, a) le modèle Chuine / Sigmoid et b) le modèle Smoothed Utah /Sigmoid (abscisse : dates observées, ordonnée : dates prédites).	166
44	Comparaison entre les dates observées et prédites de la floraison du pommier au site de Sidi Lakhdar sans les années où le cumul en unités de froid n'a pas été satisfait par, a) le modèle Chuine / Sigmoid et b) le modèle Chuine / Wang (abscisse : dates observées ; ordonnée : dates prédites).	166
45	Comparaison entre les dates observées et prédites de débourrement et de floraison de la vigne dans les deux sites d'étude (Boumedfaa et Benchicao) par le modèle à une phase Sigmoid, a) débourrement et b) floraison (abscisse : dates observées ; ordonnée : dates prédites).	168
46	Comparaison entre les dates observées et prédites de débourrement et de floraison de la vigne pour les deux sites (Benchicao et Boumedfaa), a) débourrement par le modèle Smoothed Utha / Sigmoid et b) floraison par le modèle Chuine /Wang (abscisse : dates observées ; ordonnée : dates prédites).	169
47	Comparaison entre les dates observées et prédites du débourrement de la vigne au site de Benchicao par, a) le modèle Wang et b) le modèle Smoothed Utah (abscisse : dates observées ; ordonnée : dates prédites).	170
48	Comparaison entre les dates observées et prédites de floraison de la vigne au site de Benchicao par le modèle Parabolic (abscisse : dates observées ; ordonnée : dates prédites).	171
49	Comparaison entre les dates observées et prédites de débourrement de la vigne au site de Benchicao par, a) le modèle Chuine /Wang et b) le modèle Chuine / Sigmoid (abscisse : dates observées ; ordonnée : dates prédites).	172

50	Comparaison entre les dates observées et prédites de floraison de la vigne au site de Benchicao, par le modèle Chuine / Wang (abscisse : dates observées ; ordonnée : dates prédites).	173
51	Comparaison entre les dates observées et prédites de floraison au site de Boumedfaa par le modèle Smoothed Utah (abscisse : dates observées ; ordonnée : dates prédites).	174
52	Comparaison entre les dates observées et prédites de débourrement de la vigne au site de Boumedfaa par, a) le modèle Richardson inverse / Sigmoid et b) le modèle Chuine / Sigmoid (abscisse : dates observées ; ordonnée : dates prédites).	175
53	Comparaison entre les dates observées et prédites de floraison de la vigne au site de Boumedfaa par, a) le modèle Chuine / Wang et b) le modèle Richardson inverse / Wang (abscisse : dates observées ; ordonnée : dates prédites).	176

Liste des abréviations

BBCH :	Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt et Chemische
CCNUCC :	Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques
CDC :	Centers for Disease Control
CE	Conductivité électrique
C.N. :	Caroline du Nord
Déb :	Débourrement
DSA :	Direction des services agricoles
Dyn :	Dynamique
EEA :	Agence européenne de l'environnement
Eff :	Efficienc
EX-ACT :	Ex-ante Carbon balance Tool
Flor :	Floraison
GES :	Gaz à effet de serre
GDH :	Growing degree-hours
GERES :	Groupe Energies Renouvelables, Environnement et Solidarités
GIEC :	Groupe d'experts Intergouvernementale sur l'évolution du climat
ITAFV :	Institut technique des arbres fruitiers et de la vigne
ITGC :	Institut technique des grandes cultures
MO :	Matière organique
OMM :	Organisation météorologique mondiale
ONM :	Office national de la météorologie
PACC :	Plan d'action sur les changements climatiques
PMP :	Plateforme de modélisation phénologique
RMSE :	Root mean square error
SRES :	Special Report on Emission Scenarios
SSres :	Residual sum of squares
UE :	Union Européenne
UNU-EHS :	Université des Nations unies pour l'environnement et la sécurité humaine
VIP :	Variable important dans la projection

Dédicaces

Remerciements

Avant-propos

Résumé

Abstract

ملخص

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Table des matières

Introduction 1

Revue bibliographique

Chapitre I Changements globaux

I.1. Climat 5

I.2. Evolutions climatiques naturelles 5

I.2.1. Causes astronomiques 5

I.2.2. Causes géologiques 6

I.2.3. Effet de serre, un phénomène physique naturel 7

I.3. Changements climatiques 8

I.3.1. Causes et conséquences 10

I.3.2. Changements climatiques régionaux 19

I.3.3. Projections futurs de climat 24

I.3.4. Maitriser et limiter les facteurs de changements climatiques 28

Chapitre II Impacts des changements climatiques sur les arbres fruitiers

II.1. Notion de la phénologie 34

II.2. Intérêt de la phénologie 35

II.3. Stades phénologiques des arbres fruitiers 38

II.3.1.Dormance.....	40
II.3.2.Débourrement.....	44
II.3.3.Floraison.....	47
II.4.Effets du réchauffement climatique sur les besoins en froid et en chaleur.....	50
II.4.1.Notion de chilling et forcing.....	50
II.4.2. Impacts du réchauffement climatique sur les besoins en froid..... et en chaleur	53
II.5. Conséquences agronomiques des changements climatiques.....	54
II.5.1.sur la production végétale.....	54
II.5.2. Sur le rendement.....	54
II.5.3. Sur le fruit.....	55
II.5.4 Autres impacts sur l'arbre et sur son environnement biotique.....	57
II.6.Tendances récentes et projections futures de la phénologie.....	58
II.6.1.Cultures annuelles.....	59
II.6.2.Cultures pérennes ; arbres fruitiers et la vigne.....	61
II.7.Modélisation et prédiction des stades phénologiques.....	64
II.7.1. Modèles utilisés en production fruitières.....	70

Chapitre III Matériels et méthodes

III.1.Caractérisation du réchauffement climatique en Algérie.....	72
III.1.1.Hypothèse.....	72
III.1.2.Objectif.....	72
III.1.3.Présentation des sites d'étude.....	72
III.1.4.Collectes des données Climatiques.....	79
III.1.5.Estimation des températures horaires.....	81
III.1.6.Calcul des besoins en froid et en chaleur.....	82
III.2. Impacts biologiques des changements climatiques sur le pommier	84

et la vigne, dans des régions à climats contrastés

<i>III.2.1.Hypothèse</i>	84
<i>III.2.2.Objectif</i>	84
<i>III.2.3.Collecte des données phénologiques</i>	84
<i>III.3.Modélisation phénologique du pommier et de la vigne</i>	86
<i>III.3.1.Hypothèse</i>	86
<i>III.3.2.Objectif</i>	86
<i>III.3.3.Données climatiques</i>	87
<i>III.3.4.Données phénologiques</i>	87
<i>III.3.4.1.Prédiction des dates de débourrement et de floraison à l'aide des modèles phénologiques.</i>	87
<i>III.3.4.2.Description des fonctions utilisées dans la modélisation</i>	92
<i>III.4. Analyses statistiques</i>	98
<i>III.4.1. Données climatiques</i>	98
<i>III.4.2 Données phénologiques</i>	98
<i>III.4.2.1. Recherche de corrélations entre les températures et les dates phénologiques</i>	98
<i>III.4.2.2. Analyse PLS</i>	99

Chapitre IV Résultats et discussions

<i>IV.1.Caractérisation de réchauffement climatique en Algérie</i>	101
<i>IV.1.1.Evolution spatiotemporelle des températures</i>	101
<i>IV.1.1.1.Tendances annuelles</i>	101
<i>IV.1.1.2.Tendances pour la période automne- printemps</i>	103
<i>IV.1.2.Précipitations</i>	107
<i>IV.1.3.Caractéristiques et tendances des quantités de froid et de chaleur</i>	111
<i>IV.1.3.1.Tendances des quantités de froid</i>	111
<i>IV.1.3.2.Tendances des quantités de chaleur</i>	117

IV.1.4. Discussion	120
IV.2. Impacts biologiques des changements climatiques sur le pommier et la vigne, dans des régions à climats contrastés	126
IV.2.1. Tendances phénologiques	126
IV.2.1.1. Pommier	126
IV.2.1.2. Vigne	128
IV.2.2. Déterminisme du temps de débourrement et de floraison	130
IV.2.2.1. Pommier	130
IV.2.2.1.1. Satisfaction en besoins de froid et en chaleur	130
IV.2.2.2. Vigne	137
IV.2.2.2.1. Satisfaction en besoins de froid et de chaleur	137
IV.2.3. Détermination des périodes affectant les dates de floraison	141
IV.2.4. Discussion	145
IV.3. Modélisation phénologique du pommier et de la vigne via PMP 5.5	154
IV.3.1. Modélisation phénologique du pommier	155
IV.3.1.1. Modélisation pour les sites confondus (deux sites ensemble)..... Benchicao (Médéa) et Sidi Lakhdar (Ain Defla).	155
IV.3.1.2. Modélisation à sites séparés, Benchicao (Médéa) et Sidi Lakhdar..... (Ain Defla)	159
IV.3.2. Modélisation phénologique de la variété 'Muscat Italia' de la vigne	167
IV.3.2.1. Modélisation pour les sites confondus (deux sites ensemble)..... Benchicao (Médéa) et Boumedfaa (Ain Defla).	167
IV.3.2.2. Modélisation pour les sites séparés, Benchicao (Médéa) et Boumedfaa (Ain Defla).	170
IV.3.3. Discussion	176
Conclusion générale et Perspectives	181
Références bibliographiques	186
Annexes	216

INTRODUCTION

Actuellement, la biodiversité est en perpétuelle mutation à l'échelle globale. Ceci est provoqué principalement par les activités anthropiques (ex : exploitation abusive des terres, introduction d'espèces invasives, pollution, changements climatiques, etc.). De ces causes, les préoccupations climatiques deviendront vraisemblablement la force de changement la plus importante au cours du prochain siècle (Peres-Neto et al, 2013).

Le 5^{ème} rapport du GIEC (2014) vient d'abord renforcer la certitude de la responsabilité des activités humaines dans le réchauffement de l'atmosphère et de l'océan. Le dérèglement climatique est déjà là et il affecte les écosystèmes, les espèces et les activités humaines. De 1880 à 2012, les mesures de température moyenne de la surface des océans et des continents montrent un réchauffement de 0,85°C. Sans effort supplémentaire de réduction de gaz à effet de serre (GES), nous sommes sur une hausse allant de 3,7 à 4,8°C. Les vagues de chaleur ont augmenté en Europe, en Asie et en Australie, tout comme la fréquence et l'intensité des événements de fortes précipitations en Europe et en Amérique du Nord.

Le bassin méditerranéen serait l'une des régions du monde qui accuserait l'augmentation de la température la plus importante. Cette augmentation serait accompagnée d'une variabilité plus marquée à savoir une fréquence plus accrue de vagues de chaleur. A l'horizon 2100, la valeur la plus probable de l'augmentation de la température moyenne annuelle serait de l'ordre de 3,5°C. Le réchauffement en Afrique est légèrement plus élevé par rapport à la tendance mondiale. Alors qu'il n'est responsable que de 4% des émissions mondiales de GES, le continent africain est la grande victime du réchauffement planétaire. Six des dix pays les plus affectés sont africains et on estime que les deux tiers des terres arables seront perdues d'ici à 2025 et ce, même si la hausse des températures restait limitée à 2°C (Abbundo, 2016).

L'Algérie figure parmi les pays à forts risques de changements climatiques. C'est ce que révèle le rapport de l'Université des Nations unies pour l'environnement et la sécurité humaine (UNU-EHS, 2014). Avec un indice de vulnérabilité (*World Risk Index - WRI*) de 7,6%, l'Algérie se situe parmi les 50 pays les plus à risque. Sur la base des résultats du 5^{ème} rapport d'évaluation du GIEC (2014) ainsi que des meilleures informations disponibles au niveau national, des projections d'un scénario de changements climatiques ont été obtenues pour l'Algérie à l'horizon 2030. Ces projections confirment les tendances climatiques déjà observées durant les dernières décennies à savoir : une augmentation de la température, une

légère diminution des précipitations et un climat plus variable avec des séquences sèches et pluvieuses plus fréquentes. Les changements attendus seraient modérés pour les régions côtières et s'accroîtraient vers les régions continentales. Ils seraient contrastés entre les saisons et seraient plus marqués en été.

La phénologie des plantes est très sensible aux changements climatiques (Menzel et al, 2006) qui peuvent affecter la structure et le fonctionnement de l'écosystème en prolongeant la durée de la saison de croissance (Cleland et al, 2007; Piao et al, 2008), en modifiant la composition des espèces et même en altérant l'interaction entre les plantes et leurs microclimats (Peñuelas et al, 2009). L'arboriculture fruitière est particulièrement exposée par sa nature pérenne et la relative complexité de l'interaction entre l'élaboration des productions à travers les différentes phases phénologiques et le climat. Dans un avenir proche, elles apparaissent susceptibles de connaître des difficultés d'adaptation pour certains cultivars. Selon Seguin (2010), le facteur primordial chez les arbres fruitiers et la vigne devrait être l'avancée des stades phénologiques, d'autant plus marquée que l'on s'éloigne en cours de saison de la levée de dormance, qui risque d'être plus tardive à cause d'une non satisfaction des besoins en froid. Une meilleure compréhension des processus phénologiques des plantes est nécessaire pour prédire la réponse des plantes aux changements climatiques futurs (Fu et al, 2015). Elle fournirait non seulement une évaluation de la performance et de l'adaptation des génotypes dans certaines zones de production, mais aussi des informations fiables pour les programmes de sélection et une meilleure planification des techniques culturales (Maulión et al, 2014).

Le pommier représente actuellement une espèce fruitière notable en Algérie dont la production est la plus importante des arbres fruitiers. De même, la viticulture occupe 12% de la surface agricole utile (SAU) de toutes les plantations. Elle constitue la 4^{ème} culture pérenne en termes de surface. La plus importante production est réalisée dans la région centre (75%), 25% à l'ouest et elle est très faible dans l'est du pays.

En Algérie, aucune étude sur les impacts touchant la phénologie de l'arboriculture fruitière, comme élément clé pour caractériser les effets des changements climatiques, n'a été entreprise. Les seuls travaux qui avaient pour objectif de prédire les changements climatiques sont issus à travers l'étude des séries chronologiques de températures et de pluviométrie. C'est le cas de la région constantinoise dans l'est du pays (Kherief et al, 2004; Zekri et

al, 2009; Tabet, 2008) et oranaise à l'ouest (Benabadji et Bouazza, 2000; Abderrahmani et al, 2006; Benabdeli et al, 2006). La caractérisation de l'impact de ces changements climatiques sur les cultures à travers ces paramètres (température et pluviométrie) est estimée uniquement par la connaissance de l'évolution des rendements.

A l'issu de ce constat, nous voulons donc combler cette lacune par cette contribution, qui a pour but de mieux connaître l'acclimatation de ces espèces face aux changements climatiques. Concrètement, l'objectif principal de notre étude constitue dans un premier temps, à analyser des séries chronologiques de température et des notations de dates de débourrement et de floraison du passé et à les comparer avec celles relevées au cours de notre travail afin de tester leur impact éventuel sur la phénologie du pommier et de la vigne. Donc, un travail de collecte de températures et de notations phénologiques auprès de divers organismes (Stations de recherche en arboriculture, Office de météo, etc.) a été nécessaire pour établir une base de données fiable. Dans un second temps, des modèles phénologiques classiques, tels que les modèles à une phase (Parabolic, Sigmoide, Wangetc.) et les modèles à deux phases (Chuine /Sigmoide, Smoothed Utah /Wang, Richardson inverse /Sigmoide....etc) ont été élaborés afin de déterminer les périodes critiques au regard de l'accumulation des unités de froid et de chaleur, nécessaire à la levée de dormance et conduisant au débourrement et à la floraison.

Trois zones contrastées du point de vue climatique ont été choisies : la 1^{ère} zone de plaine à climat chaud, située à Sidi Lakhdar (Ain Defla), la 2^{ème} zone d'altitude moyenne à Boumedfaa (Ain Defla) et la 3^{ème} zone plus fraîche en altitude à Benchicao (Médéa). En définitif, ce document de thèse traitera le sujet de ce travail comme suit :

- 1) Une recherche bibliographique bien détaillée sur le phénomène du réchauffement climatique et une esquisse de la région d'étude (situation, climat, pédologie, etc.),
- 2) Une caractérisation des évolutions de la température en Algérie dans les principales régions de culture du pommier et de la vigne, effectuée pour exprimer l'effet du réchauffement climatique,
- 3) Une deuxième caractérisation des évolutions de la phénologie du pommier et de la vigne dans les mêmes régions, avec pour objectif de détecter l'effet du réchauffement climatique sur la phénologie de ces deux espèces étudiées et construire une base de données, et 4) Une fois ces travaux de collecte réalisés, un établissement de relations statistiques entre les données de température et les données phénologiques des arbres fruitiers étudiés a été effectuée.

Ces données seront utilisées pour effectuer la modélisation des dates phénologiques afin de comprendre les évolutions phénologiques du passé et prévoir celles du futur de ces cultures. Finalement, à l'issue de ce travail de thèse, l'ensemble des résultats obtenus de cette recherche est discuté faisant ressortir une conclusion générale consolidé par des perspectives et des recommandations.

CHAPITRE I

CHANGEMENTS GLOBAUX

I.1. Climat

Météo ou climat !

La météo est l'expression du temps qu'il fait à un moment et à un endroit donné. Les prévisions météorologiques n'ont de validité que localement et pour une période courte (quelques jours). C'est pourquoi une période de froid prononcée localement, ne remet pas en cause la réalité du réchauffement planétaire. De même, une tempête inhabituellement violente n'est pas forcément une preuve de modification du climat. Pour l'affirmer, il faut pouvoir constater que la fréquence d'un événement climatique augmente de façon significative dans une région donnée et sur une longue période. Le climat désigne les valeurs moyennes des paramètres météorologiques (précipitations, températures, nébulosité...) mesurées sur de longues périodes et des secteurs géographiques vastes et bien définis (zones climatiques). Habituellement, 30 ans d'observations sont nécessaires pour définir des caractéristiques d'ordre climatique (Barros et al, 2014).

I.2. Evolutions climatiques naturelles

Les simulations climatiques fondées sur des événements naturels (éruptions volcaniques, activité solaire, etc.) peuvent expliquer des variations de températures jusqu'en 1950 environ, comme l'existence d'un « petit âge glaciaire » qui a duré du XIV^{ème} au XIX^{ème} siècle en Europe et en Amérique du Nord.

I.2.1. Causes astronomiques

Le soleil traverse des périodes de grande activité, qui se traduisent par une augmentation du nombre de taches solaires, ainsi que par un accroissement du rayonnement de l'activité magnétique et des flux de particules de haute énergie. Ces fluctuations de l'activité solaire s'effectuent à des échelles de temps qui peuvent varier de plusieurs millions d'années à quelques minutes (Tabet, 2008). Depuis 1911, la constante solaire ne cesse d'augmenter. D'après des analyses informatiques des différents cycles solaires, la constante solaire devrait augmenter jusqu'en 2030 pour chuter après (Ressources naturelles Canada, 2000).

La modification de la révolution de la Terre autour du soleil accroît la quantité d'énergie solaire qu'elle reçoit à certains moments de l'année. L'inclinaison de la Terre change légèrement (tous les 40 000 ans environ), ce qui peut modifier le contraste entre les saisons.

La quantité d'énergie que nous envoie le soleil varie régulièrement en fonction de ses périodes d'activité. Ces phénomènes expliquent l'alternance de périodes chaudes et de périodes glaciaires qui se succèdent sur de très longues durées (voir figure 1).

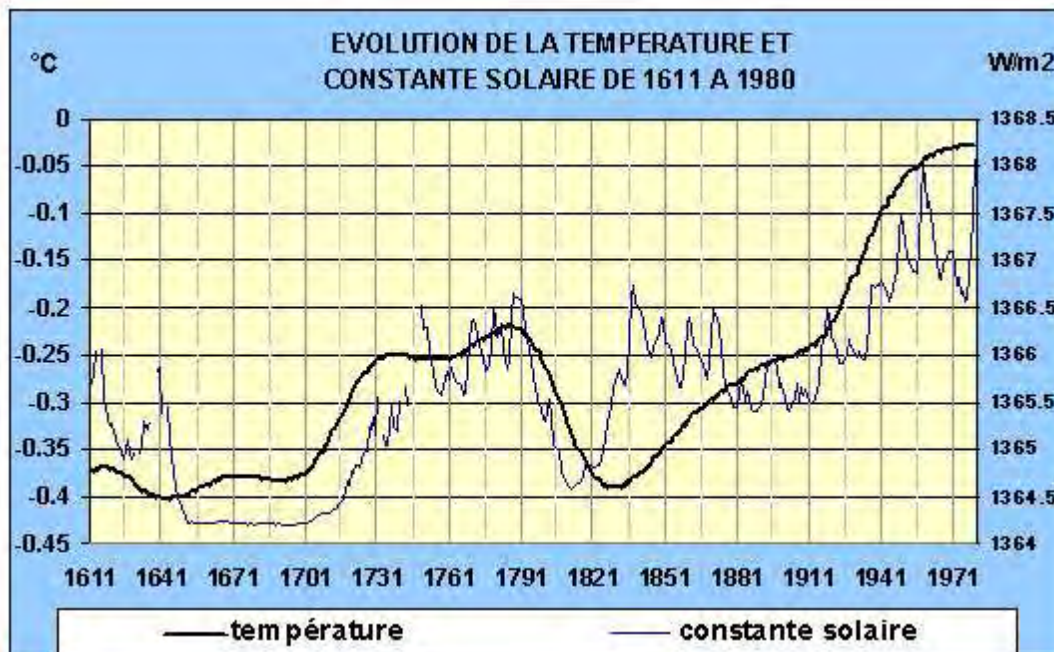


Figure 1: Evolution de la température suivant la moyenne de 1960 à 1990 et de la constante solaire de 1611 à 1980 (Ressources naturelles Canada, 2000)

I.2.2. Causes géologiques

Elles peuvent avoir un effet sensible comme le montre un exemple récent : l'éruption du volcan philippin Pinatubo (1991) a rejeté des volumes considérables de cendres et de particules. En obscurcissant l'atmosphère, elles ont réduit de 10 % la quantité d'énergie solaire absorbée par la Terre. Conséquence : la température moyenne planétaire a diminué de 0,5°C durant deux à trois ans, avant de retrouver son niveau antérieur.

I.2.3. Effet de serre, un phénomène physique naturel

Présents dans l'atmosphère, certains gaz retiennent une part de l'énergie solaire renvoyée vers l'espace par la Terre, sous forme de rayons infrarouges. Ils maintiennent ainsi la température sur Terre à une moyenne d'environ 15°C. Sans eux, cette moyenne descendrait à -18°C, interdisant le développement de la vie. Ces gaz à effet de serre (GES) peuvent être présents naturellement dans l'atmosphère, comme le gaz carbonique (CO₂), le méthane (CH₄) ou la vapeur d'eau (H₂O). Cette dernière est le gaz à effet de serre le plus abondant et occupe de 0,4 à 4 % du volume atmosphérique. Tous les autres GES occupent moins de 0,1 % de ce volume. Les gaz à effet de serre ne captent pas tous les rayons infrarouges de la même façon et leur durée de vie dans l'atmosphère peut varier de quelques heures à plusieurs milliers d'années : leur pouvoir de réchauffement global (c'est à dire leur influence sur l'effet de serre) peut ainsi varier dans une très large fourchette.

Un accroissement de la concentration de gaz à effet de serre entraîne une plus grande capacité de l'atmosphère au rayonnement infrarouge et un rayonnement effectif, un déséquilibre qui ne peut être compensé que par une hausse de la température du système surface-troposphère. C'est ce qu'on appelle l'effet de serre amplifié (voir Figure 2) (Patrice, 2005).

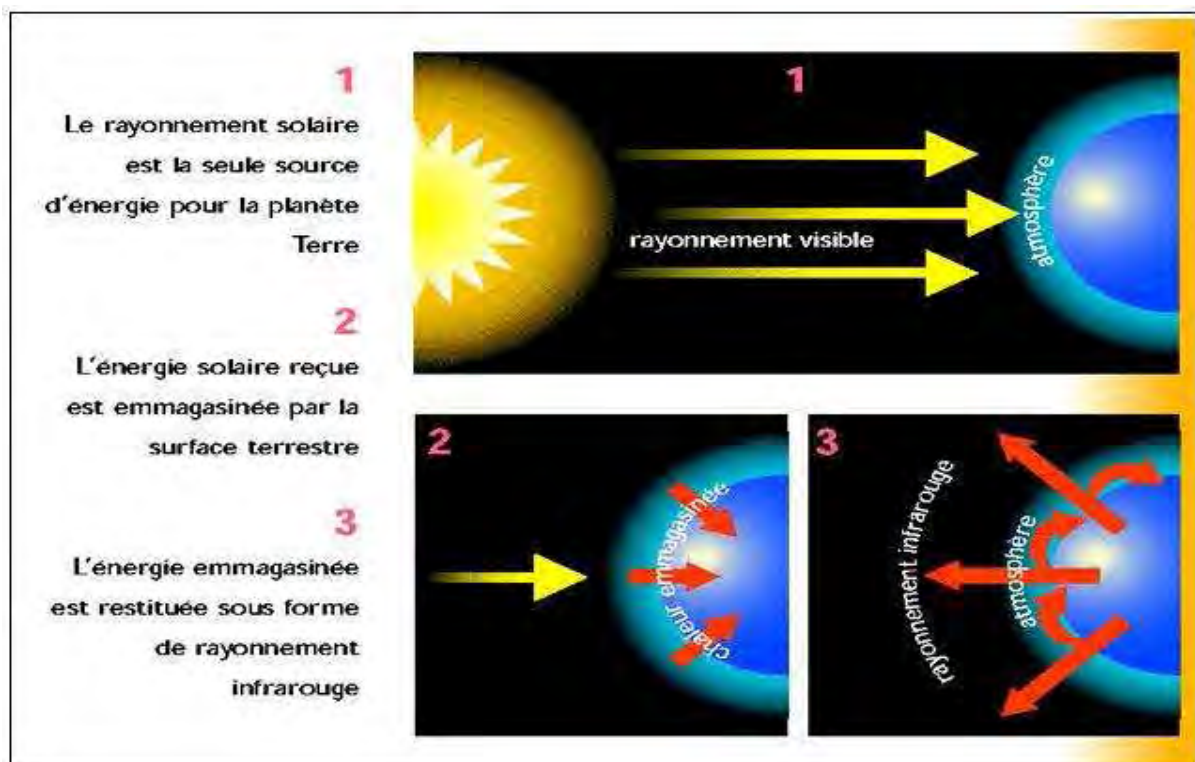


Figure 2 : Processus de l'effet de serre selon Patrice (2005).

I.3. Changements climatiques

Tout au long de son histoire, le climat a subi plusieurs changements et ce, de façon naturelle (GIEC, 2007b). L'activité volcanique et les variations du rayonnement solaire sont des causes naturelles et connues de variations climatiques. Malgré cela, il est peu probable que le réchauffement climatique du siècle dernier soit d'origine naturelle. En effet, l'augmentation de l'activité humaine a de fortes répercussions sur le bilan radiatif de l'atmosphère (Lepage et al, 2011). Le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), définit deux notions fondamentales : la variabilité du climat et le changement climatique.

A) Variabilité du climat

Ce sont les Variations de l'état moyen et d'autres variables statistiques (écarts types, extrêmes, etc.) du climat à toutes les échelles spatiales et temporelles au-delà de la variabilité propre à des phénomènes météorologiques particuliers. La variabilité peut être due à des processus internes naturels au sein du système climatique (variabilité interne) ou à des variations des forçages externes anthropiques ou naturels (variabilité externe) (Glossaire de GIEC, 2013).

B) Changements climatiques

C'est la variation statistiquement significative de l'état moyen du climat, persistant pendant une période prolongée. Les changements climatiques peuvent être dus à des processus internes naturels ou à des forçages externes, ou encore à la persistance de variations anthropiques de la composition de l'atmosphère ou de l'utilisation des sols. On notera que la convention- cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), dans son premier article, définit les changements climatiques comme « des changements qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale, qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables ».

Les changements climatiques correspondent à un changement du temps moyen observé dans une région donnée. Le temps moyen comprend tous les éléments que nous

associations habituellement au temps, à savoir la température, les caractéristiques des vents, les précipitations et la durée d'insolation. Lorsque nous parlons de changements climatiques à l'échelle de la planète, nous faisons référence aux modifications que connaît l'ensemble du climat de la terre. A long terme, la rapidité et l'ampleur des changements climatiques peuvent avoir de nombreuses conséquences sur les écosystèmes naturels (GERES, 2005, Groupe Energies Renouvelables, Environnement et Solidarités).

Réchauffement climatique ou changement climatique ?

L'effet de serre additionnel dû à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère se traduit par une augmentation de la température moyenne de l'atmosphère terrestre. Ce réchauffement de la planète, même modeste, modifie le comportement des masses d'air de l'atmosphère dans leur ensemble, ce qui provoque des changements climatiques (températures moyennes mais aussi régime des précipitations et des vents, fréquence des phénomènes extrêmes...) qui affectent toutes les régions du globe. Ces changements ont des conséquences sur le temps qu'il fait (la météo), mais aussi sur la taille des calottes glaciaires, la répartition des déserts, le niveau des mers, les courants marins... Il est plus juste de parler de réchauffement planétaire et de changement climatique.

Le GIEC est la principale source scientifique fiable sur le changement climatique et la certitude sur ce changement à travers les quatre rapports a progressé :

Rapport en 1990 : « Il nous semble qu'en général l'ampleur du réchauffement (planétaire) est conforme aux prévisions des modèles climatiques, mais que cette ampleur est comparable à celle de la variabilité naturelle du climat. »

Rapport en 1995 : « Dans l'ensemble, les observations portent à croire à une influence humaine sur le climat planétaire. »

Rapport en 2001 : « Des observations récentes plus convaincantes indiquent que le réchauffement constaté au cours des cinquante dernières années est attribuable à des activités humaines. »

Rapport en 2007 : « L'essentiel de l'augmentation observée des températures moyennes depuis la moitié du XX^{ème} siècle est, très probablement, dû à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre engendrées par l'homme ».

En 2014, le 5^{ème} rapport du GIEC vient d'abord renforcer la certitude de la responsabilité des activités humaines dans le réchauffement de l'atmosphère et de l'océan. Le dérèglement climatique est déjà là. Il affecte les écosystèmes, les espèces et les activités humaines. De 1880 à 2012, les mesures de température moyenne de la surface des océans et terrestre montrent un réchauffement de 0,85°C. Sans effort supplémentaire de réductions des gaz à effet de serre, nous sommes sur une hausse allant de 3,7°C à 4,8°C.

I.3.1. Causes et conséquences

I.3.1.1. Causes

Le GIEC juge extrêmement probable (à 95 %) l'impact de l'homme sur le réchauffement de la planète. Dans son dernier rapport (2014), il met en avant des hypothèses très probables concernant les effets de ce réchauffement : une hausse des températures moyennes supérieure à 2°C d'ici 2100, sauf à se tenir à un scénario très ambitieux de réduction des émissions de GES, à savoir 10 % de réduction tous les 10 ans; une hausse du niveau des mers plus importante que ce qui était prévu dans les analyses antérieures (en 2007, le GIEC prévoyait une hausse comprise entre 18 et 59 cm d'ici 2100, les projections de 2014 prévoient une hausse comprise entre 29 et 82 cm); des événements climatiques extrêmes (sécheresses, pluies diluviennes, tempêtes...) plus violents et plus fréquents. En revanche, les scientifiques du GIEC ont moins de certitudes quant à l'influence du changement climatique sur la répartition géographique des zones touchées par des sécheresses et le comportement des cyclones tropicaux.

Les émissions de gaz à effet de serre ont augmenté depuis l'ère préindustrielle, largement contrôlées par la croissance démographique et la croissance économique et sont aujourd'hui plus élevées que jamais. Ceci a conduit à des concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone, de méthane et d'oxyde nitreux sans précédent depuis au moins 800 000 ans. Leurs effets, conjugués à ceux d'autres facteurs anthropiques ont été détectés au sein du système climatique et sont avec une probabilité extrêmement élevée, la cause dominante du réchauffement observé depuis le milieu du XX^{ème} siècle (Rapport de synthèse de Pachauri et Meyer, GIEC, 2014).

La modification actuelle de l'effet de serre est à l'origine de l'augmentation très rapide de la température moyenne de la Terre. On n'a aujourd'hui trouvé aucun phénomène naturel (ou ensemble de phénomènes naturels) susceptible d'expliquer l'ampleur et la vitesse du changement climatique actuel. Par ailleurs, on constate que le mode de vie des sociétés occidentales a connu une évolution sans précédent depuis un siècle et demi. Des bouleversements ont été opérés dans l'urbanisme, les transports, les produits de consommation, la santé, etc. Ces progrès ont généré des impacts sur l'environnement et les sociétés humaines, entre autres ceux liés à l'émission de gaz à effet de serre, en premier lieu de CO₂. L'augmentation de la concentration de l'atmosphère en GES du fait des émissions liées à l'activité humaine est le seul phénomène qui puisse expliquer de façon satisfaisante le réchauffement planétaire actuel et sa rapidité. Les émissions totales de GES produites aujourd'hui ont augmenté de 80 % depuis 1970 et de 30 % depuis 1990. Elles ont été, entre 2000 et 2010, les plus importantes de l'histoire humaine (Barros et al, 2014)

Le charbon, puis le pétrole, sont les moteurs de notre prospérité depuis le début de la révolution industrielle, au XVIII^{ème} siècle. Aujourd'hui, plus de 80 % de l'énergie que nous consommons dans le monde est produite par le charbon, le pétrole et le gaz. Cette dépendance aux combustibles « fossiles » devrait durer encore plusieurs décennies. Nous en consommons d'ailleurs chaque année davantage. Les émissions annuelles de CO₂ issues de leur combustion sont passées de 200 millions de tonnes en 1850 à 31,7 milliards de tonnes en 2012 (soit une multiplication par 160). La consommation d'énergie n'est pas seule en cause. La déforestation, en supprimant des végétaux qui auraient absorbé le CO₂, est responsable d'environ 10 milliards de tonnes des émissions de GES dues à l'homme.

D'autres gaz à effet de serre sont en cause; Ils proviennent directement ou indirectement des activités humaines : le protoxyde d'azote (N₂O) et le méthane (CH₄) issus de l'usage d'engrais azotés en agriculture, du traitement, du stockage et de l'épandage des déjections animales, de la fermentation entérique des ruminants; les gaz fluorés développés par l'industrie et utilisés comme propulseurs, pour la fabrication de mousses ou de composants électroniques, etc. Ce sont de très puissants GES. Certains sont maintenant interdits ou réglementés, mais leur longue durée de vie dans l'atmosphère rend leurs effets sensibles pendant encore de nombreuses années. Dans l'atmosphère, le temps au bout duquel les gaz à effet de serre commencent à disparaître varie énormément : quelques jours pour la vapeur d'eau, une dizaine d'années pour le méthane, 120 ans pour le CO₂, jusqu'à 50 000 ans pour

certain gaz fluorés. L'influence mondiale des gaz à effet de serre (GES) est plutôt bien connue et a pour résultat un réchauffement moyen de la surface de la Terre. Il y a plus d'un siècle, le chercheur Suédois Svante Arrhenius a suggéré à juste titre, qu'une augmentation anthropogénique de la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère pourrait provoquer un réchauffement supplémentaire de notre planète. Le débat concernant les problèmes liés aux changements climatiques mondiaux pourrait être influencé par des intérêts politiques, industriels et commerciaux, et par l'opinion publique. Bien qu'un grand nombre de points de vue soient exprimés, les scientifiques ont la responsabilité majeure de traiter ces problèmes et d'évaluer avec précision les incertitudes qui y sont liées (Antipolis, 2008).

I.3.1.2. Conséquences

L'accroissement de l'effet de serre perturbe toute la machine climatique, avec des conséquences sur les milieux naturels et la biodiversité. Les sociétés humaines sont affectées à leur tour (espaces habitables, santé, agriculture, économie). Ainsi, le changement climatique concerne toutes les composantes de la vie sur Terre.

a) Des zones plus chaudes

Un réchauffement de l'ordre de 0,6°C est enregistré depuis 1860, la date la plus ancienne pour laquelle des données suffisantes existent à l'échelle du globe. Le réchauffement du XX^{ème} siècle est probablement le plus important de ceux constatés depuis les dernières mille années, et la décennie précédant 2004 était la plus chaude de toutes celles considérées : 9 des années les plus chaudes se situent entre 1995 et 2004 (la plus chaude étant 1998, avec 0,58°C au-dessus de la moyenne 1981-1990), avec la seule année 1996 remplacée par 1990 dans ce classement (Jones et Moberg, 2003). Il est à noter que depuis, 2005 et 2006 se sont ajoutées à ce palmarès, respectivement en 2^{ème} et 6^{ème} positions. Deux périodes de réchauffement apparaissent à partir de ces travaux : de 1910 à 1945, avec une augmentation de 0,14°C, puis 0,17°C pour 1976-1999.

Au niveau de la distribution spatiale, la première phase a vu un réchauffement plus marqué de l'hémisphère nord, contrairement à la phase suivante. Par contre, depuis 1976, le réchauffement est le plus net. Chacune des trois dernières décennies a été successivement plus chaude à la surface de la Terre que toutes les décennies précédentes depuis 1850. Les années

1983 à 2012 constituent probablement la période de 30 ans la plus chaude qu'ait connue l'hémisphère nord depuis 1 400 ans (degré de confiance moyen). La tendance linéaire de la moyenne globale des données de température de surface combinant les terres émergées et les océans indique un réchauffement de 0,85°C [0,65 à 1,06°C] au cours de la période 1880-2012. Il faut également noter que les températures minimales augmentent deux fois plus rapidement que les maximales aux latitudes moyennes de l'hémisphère nord, et sur les surfaces continentales, qui se réchauffent plus que les surfaces océaniques. Certaines zones se réchauffent plus rapidement que d'autres sur la planète. C'est le cas en particulier pour les zones polaires, avec des conséquences spectaculaires : la surface minimale (mesurée en septembre tous les ans) de la banquise arctique est passée de 8,5 millions de km² dans la période 1950- 1975 à 5,5 millions de km² en 2010, soit une décroissance moyenne de 11 % tous les 10 ans (GIEC – 5^{ème} rapports d'évaluation, 2014).

Alors qu'il était prévu que la température moyenne n'augmenterait que de 0,6°C (GIEC, 2008). Les prévisions pour 2100 sont encore plus alarmantes, avec une augmentation prévue de la température moyenne de 2 à 4,5°C (GIEC, 2008) (Camirand et Gingras, 2011). Au niveau des autres facteurs, il a surtout été détecté une baisse (de 4 à 6 %) du rayonnement solaire global sur la période 1950-1990 (Roderick et Farquahr, 2002), mais cette tendance paraît s'inverser avec une augmentation sur les 15 dernières années (Wild et al, 2005).

b) Cycle de l'eau perturbé

L'augmentation de la température moyenne globale accroît l'évaporation de l'eau à certaines latitudes. Cette évolution modifie les précipitations dans de nombreuses régions : le régime des pluies change. Entre 1900 et 2005, les précipitations ont augmenté dans les parties orientales d'Amérique du Nord et du Sud, en Europe du Nord et en Asie du Nord et Centrale. Les mêmes sources indiquent une tendance à la hausse de la pluviométrie annuelle à l'échelle globale, cependant très modérée (2 %) et surtout très variable dans le temps et l'espace : elle peut atteindre 7 à 12 % dans les latitudes élevées de l'hémisphère nord, surtout à l'automne et en hiver pour les régions boréales. La pluie a diminué sur la plupart des terres intertropicales (0,3 % par décennie), quoiqu'il y ait une reprise durant les dernières années.

Il est probable qu'une augmentation de la fréquence des événements de précipitations extrêmes s'est produite dans les latitudes moyennes et hautes de l'hémisphère nord. Les

épisodes chauds du phénomène « El Niño » ont été plus fréquents, plus durables et plus intenses depuis le milieu des années 1970 (Seguina et Soussana, 2008).

Dans beaucoup de régions, la modification du régime des précipitations ou de la fonte des neiges et des glaces perturbe les systèmes hydrologiques et influe sur la qualité et la quantité des ressources hydriques (degré de confiance moyen). Les glaciers continuent de reculer presque partout dans le monde à cause du changement climatique (degré de confiance élevé), influant sur le ruissellement et sur les ressources en eau en aval (degré de confiance moyen). Le changement climatique provoque le réchauffement et la fonte du pergélisol aux hautes latitudes comme dans les régions d'altitude élevée (degré de confiance élevé) (Field et al, 2014).

Concernant la cryosphère, une fonte accélérée, qui se traduit par un recul généralisé des glaciers, une augmentation du ruissellement et des débits dans les zones glaciaires ou nivales, ainsi que des avalanches de glaces et de rochers, le déplacement des mammifères dans l'Arctique et de la faune de l'Antarctique, la fonte du permafrost dans les hautes latitudes, le déplacement vers le haut de stations de ski, etc. Pour les eaux douces, les fleuves et les rivières se réchauffent, avec des conséquences bien établies sur la stratification thermique et la composition chimique, l'abondance et la productivité, la composition des communautés, la phénologie, la distribution et la migration des espèces végétales et animales (Seguin, 2008).

Le rythme de la fonte des glaces s'est accéléré depuis les 15 dernières années. La fonte massive des glaces augmente la masse d'eau, occasionnant une élévation du niveau de la mer. Les élévations prévues sont de 9 à 88 cm entre 1990 et 2100. Cette situation aura des conséquences néfastes sur les basses terres côtières où vit une très grande partie de la population mondiale. Déjà, en 2008, les désastres reliés au climat auraient causé le déplacement de 20 millions de personnes (Iocha et Idmc, 2009).

De plus, les ressources en eau potable seront affectées. Par exemple, l'augmentation des températures pourraient occasionner une baisse considérable du niveau d'eau des Grands Lacs au Canada, en raison d'une plus grande évaporation. Les Grands Lacs, en plus d'être l'un des principaux tributaires du fleuve Saint-Laurent, représentent la plus importante source d'eau douce au monde. Cette diminution de la quantité d'eau potable pourrait être problématique et s'avérer une cause majeure de conflits entre les nations (Environnement Canada, 2002). La

qualité de l'eau des lacs sera aussi à surveiller, car la prolifération des algues bleu-vert pourrait s'intensifier dans le contexte des changements climatiques (Camirand et Gingras, 2014). Entre 1901 et 2010, le niveau moyen des mers à l'échelle du globe s'est élevé de 19 cm [de 17 à 21 cm]. Depuis le milieu du XIX^{ème} siècle, le rythme d'élévation du niveau moyen des mers est supérieur au rythme moyen des deux derniers millénaires (degré de confiance élevé). Les mesures des océanographes montrent que le niveau des océans s'est élevé de 18 cm en moyenne dans le monde entre 1870 et 2000. Le phénomène s'accélère : la hausse a été de 6 cm au cours des 20 dernières années. Le réchauffement planétaire explique 25 % de l'élévation avant 1993, et 60 % depuis cette date. Le GIEC estime que le niveau moyen des mers et des océans pourrait s'élever jusqu'à 82 cm d'ici la fin du siècle si rien n'est fait pour limiter les émissions de GES. Si cette estimation se vérifie, cette élévation aura un impact sur certaines zones côtières françaises basses (Flandres, Vendée, Saintonge, Camargue...).

Les observations des changements de la salinité océanique suggèrent des changements touchant le cycle hydrique planétaire sur les océans (degré de confiance moyen). Il est très probable que les régions à salinité élevée (où l'évaporation domine le bilan d'eau en surface) sont devenues plus salées, tandis que les régions à faible salinité (où les précipitations dominent) sont devenues moins salées depuis les années 1950. Le réchauffement océanique constitue l'essentiel de la hausse de la quantité d'énergie emmagasinée au sein du système climatique et représente plus de 90 % de l'énergie accumulée entre 1971 et 2010 (degré de confiance élevé), environ 1 % seulement étant emmagasinée dans l'atmosphère (Seguin et Soussana, 2008).

c) Des mers plus acides

Depuis le début de l'ère industrielle, l'absorption de CO₂ par les océans entraîne une acidification de l'eau de mer dont le pH a diminué de 0,1 (degré de confiance élevé), soit une augmentation de 26 % de la concentration en ions hydrogène (Rapport de synthèse de Pachauri et Meyer, GIEC, 2014).

L'océan fixe de grandes quantités de carbone. En se chargeant de gaz carbonique (CO₂), l'eau de mer s'acidifie. Depuis le milieu du XVIII^{ème} siècle, le pH de l'océan est passé de 8,25 à 8,14. Cette acidification des océans n'est pas sans conséquences. De nombreux végétaux et animaux construisent leur coquille (huîtres) ou leur squelette (coraux) avec du carbonate de calcium. Ce minéral est particulièrement sensible à un environnement acide. Une acidification

trop importante des eaux marines pourrait provoquer la disparition de ces espèces et de toutes celles qui leur sont attachées (Jacobson, 2015).

d) Phénologie végétale perturbée

Du fait des températures plus élevées en moyenne sur la saison, les cycles des végétaux sauvages et des plantes cultivées connaissent des modifications. Pour les systèmes biologiques terrestres, des réponses bien établies dans l'hémisphère nord ont été soulevées, avec une avancée généralisée de la phénologie au printemps et une saison de végétation plus longue. Dans les zones tempérées, on constate ainsi de nombreux exemples de floraison, de mise à feuille et de maturation des fruits plus précoces, de chute des feuilles plus tardive pour les feuillus à l'automne. Pour l'agriculture et la forêt, une avancée similaire de la phénologie en Europe et en Amérique du Nord, avec une saison de végétation sans gel allongée (en partie sans doute à l'origine de l'augmentation de la productivité forestière, de l'ordre de 30 à 40 %, maintenant confirmée par des observations satellitaires) (Rosenzweig et al, 2008).

En dehors de l'observation d'une avancée systématique des dates de floraison des arbres fruitiers, l'illustration la plus nette se situe en viticulture, particulièrement sensible à ce réchauffement. L'ensemble des régions viticoles de ces mêmes zones (d'Europe et d'Amérique) montre une avancée des stades phénologiques, qui se répercute sur les dates de vendange, ainsi qu'une augmentation de la teneur en sucre et du degré alcoolique qui conduit pour les vingt dernières années à des vins généralement de haute qualité. Selon Bélanger (2002), les changements climatiques pourraient avoir des impacts autant négatifs que positifs sur l'agriculture. En général, une augmentation des températures moyennes et un allongement de la saison de croissance devraient occasionner un accroissement potentiel du rendement des cultures.

De même, ces modifications devraient rendre possible la production de cultures adaptées à des températures plus élevées. À l'inverse, la protection hivernale qu'offre la couverture neigeuse aux cultures pérennes pourrait être affectée par des hivers plus doux et moins enneigés. De plus, des automnes plus doux pourraient diminuer les conditions optimales à des températures plus élevées pour ces mêmes cultures. Au niveau global, les impacts observés étaient ainsi pratiquement absents dans les deux premiers rapports du GIEC, et sont apparus en tant qu'information significative seulement pour le 3^{ème} rapport (GIEC, 2001). On constate

déjà l'impact négatif des changements climatiques sur les rendements de plusieurs cultures : blé et maïs surtout, riz et soja dans une moindre mesure. On envisage une réduction des rendements de 2 % tous les 10 ans au XXI^{ème} siècle. Ils risquent également de fluctuer de façon beaucoup plus importante d'une année sur l'autre, avec des conséquences sur le prix des denrées alimentaires et la sécurité des approvisionnements. Certaines terres agricoles côtières ne seront plus cultivables du fait de la salinisation liée à la montée du niveau des océans (5^{ème} rapport du GIEC, 2014).

Les zones d'implantations de certaines espèces semblent s'étendre, risquant de fragiliser des écosystèmes déjà particulièrement touchés. C'est le cas par exemple des espèces thermophiles. On a ainsi pu observer l'implantation croissante d'espèces tropicales dans des zones à l'origine plus tempérées. Certaines d'entre elles peuvent être dangereuses pour l'homme ou ses cultures (prolifération de certains insectes ravageurs comme les mouches blanches).

Pour la forêt, on a observé également une avancée des dates de débourrement de l'ordre de 5 à 8 jours sur l'Eurasie, une migration vers le nord de la limite entre la forêt et la toundra et une augmentation des feux de forêt au Canada, ainsi qu'une extension de certains insectes aux États-Unis (Seguin et Soussana, 2008).

e) Espèces animales perturbées

La faune terrestre est sensible aux changements de températures. On observe, au cours du XX^{ème} siècle, un déplacement sensible vers le nord des aires de répartition d'une majorité des papillons britanniques. Il est probable que cela soit en réaction à des températures plus élevées. Certaines espèces ne semblent pas s'adapter à ces changements. On constate ainsi le déclin des populations néerlandaises de gobemouche noir, un passereau migrateur. Il est vraisemblable que ce soit dû à l'éclosion trop précoce aux Pays-Bas (avant son retour d'Afrique) des chenilles dont il se nourrit.

f) Détérioration de la santé

La plupart des scientifiques reconnaissent maintenant que les changements climatiques auront de graves conséquences sur la santé humaine. Au Canada, plusieurs impacts sur la santé ont été identifiés, dont l'augmentation des maladies respiratoires comme l'asthme, des

cancers de la peau, des malaises et des mortalités liées à des chaleurs intenses (Santé Canada, 2008). De plus, les changements climatiques peuvent amplifier le phénomène d'îlots de chaleur en milieu urbain (Giguère, 2009), un phénomène qui a des impacts sur la santé, allant des crampes de chaleur à la syncope de chaleur, et de l'épuisement par la chaleur au coup de chaleur.

On constate le déplacement d'aires de maladies « à vecteurs », c'est à dire transportées par des oiseaux et des insectes liés à certaines zones climatiques (ex. : malaria, chikungunya). Cependant, les impacts du réchauffement global sur la propagation des maladies sont encore mal connus.

Le changement climatique affecterait les risques d'émergence et de changements d'aire de distribution de nombreux agents pathogènes des plantes, des animaux et des. Ainsi, une augmentation d'un seul degré Celsius accroît considérablement les cas reportés de salmonellose humaine en Europe humains (de la Rocque et al, 2007; Semenza et Menne, 2009; McIntyre et al, 2010).

g) Augmentation des événements extrêmes

Des changements dans de nombreux phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes ont été observés depuis 1950 environ. Certains de ces changements ont été associés à des influences humaines, y compris une diminution des événements extrêmes de température froide, une augmentation des événements extrêmes de température chaude, une augmentation des événements extrêmes de hauts niveaux de la mer et une augmentation du nombre d'événements de fortes précipitations dans un certain nombre de régions. Les changements climatiques bouleversent déjà les patrons de précipitations.

Ces bouleversements seront accompagnés d'une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques extrêmes : sécheresses, inondations, canicules, pluies fortes et abondantes, tornades... Ces événements climatiques, souvent à l'origine de catastrophes, pourraient se produire plus fréquemment dans le futur (Camirand et Gingras 2011).

Les risques de phénomènes météorologiques extrêmes liés au changement climatique atteignent déjà un niveau modéré (degré de confiance élevé) et atteindraient un niveau élevé avec une augmentation supplémentaire de la température moyenne globale de 1°C (degré de confiance moyen). Les risques liés à certains types d'événements extrêmes (par exemple, chaleur extrême) augmentent encore sous l'effet de températures plus élevées (degré de confiance élevé) (Barros, 2014).

I.3.2. Changements climatiques régionaux

I.3.2.1. En Afrique

Il est prévu que la température moyenne mondiale augmente de 2°C au cours des deux prochaines décennies. L'Afrique connaîtra très probablement un réchauffement au cours de ce siècle et le réchauffement est susceptible d'être plus fort que le réchauffement global annuel moyen dans l'ensemble du continent et en toutes saisons, avec le réchauffement des régions sèches subtropicales plus humides. Le rapport d'évaluation de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) sur l'état du climat mondial a noté que les années 2001-2012 ont été parmi les treize années les plus chaudes (GIEC, 2007, OMM, 2013). Il a été noté que l'Afrique est le continent le plus vulnérable à la variabilité et au changement climatique, une situation qui est aggravée par l'interaction des « contraintes multiples », se produisant à différents niveaux couplés avec une faible capacité d'adaptation, mais l'Afrique est le continent qui contribue le moins aux émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES). D'après l'indice de vulnérabilité au changement climatique de 2015, sept des dix pays les plus menacés par le changement climatique sont en Afrique (AMCEN, 2014).

Les effets du changement climatique se font déjà sentir sur les populations d'Afrique. Les recherches effectuées montrent que le changement de température se répercute sur la santé, les moyens de subsistance, la production alimentaire, la disponibilité en eau et la sécurité globale des Africains. Les précipitations ont diminué dans une grande partie du Sahel et de l'Afrique australe, et ont augmenté dans certaines régions d'Afrique centrale. Au cours des 25 dernières années, le nombre de catastrophes météorologiques telles que les inondations et les sécheresses a été multiplié par deux. Cela explique pourquoi l'Afrique connaît le taux de mortalité dû aux sécheresses le plus élevé du monde. L'inondation est la catastrophe la plus courante en Afrique du Nord, elle arrive en deuxième position en Afrique de l'Est, australe et centrale et en troisième position en Afrique de l'Ouest (AWDR, 2006).

En Afrique du Nord, les inondations catastrophiques qui ont frappé le nord de l'Algérie en 2001 ont fait 800 morts et provoqué une perte économique d'environ 400 millions de dollars. Au Mozambique, les inondations de 2000 (aggravées par deux cyclones) ont causé 800 morts, bouleversé la vie de près de 2 millions de personnes, dont environ 1 million manquait de nourriture, déplacé 329 000 habitants et détruit des terres agricoles (AWDR, 2006). Entre

juillet 2011 et la mi-2012, une sécheresse intense considérée comme « la pire sécheresse depuis 60 ans » a touché l'ensemble de l'Afrique de l'Est.

Parmi les effets observables du changement climatique sur les ressources hydriques d'Afrique, on retrouve : inondations, sécheresses, modifications de la distribution des précipitations, assèchement des cours d'eau, fonte des glaciers et recul des masses d'eau. Des économies entières souffrent lorsque les niveaux d'eau des énormes fleuves africains diminuent. Le Ghana, par exemple, est devenu totalement dépendant de l'énergie hydroélectrique du barrage d'Akosombo sur le fleuve Volta. Le Mali dépend du fleuve Niger pour la nourriture, l'eau et le transport. De longs tronçons du fleuve sont cependant aujourd'hui menacés de dévastation environnementale à cause de la pollution. Au Nigéria, la moitié de la population est privée d'accès à l'eau propre. La disparition progressive, mais spectaculaire, des glaciers du Kilimandjaro est le résultat du changement climatique (GIEC, 2001).

I.3.2.2. En Europe

Le récent état des lieux effectué par l'Agence européenne de l'environnement (EEA, 2004) retient les tendances constatées sur une sélection d'indicateurs qui recoupe les systèmes et secteurs considérés par le GIEC : retrait des glaciers pour 8 sur 9 des régions concernées (avec un recul d'ensemble évalué à un tiers de la surface et la moitié de la masse entre 1850 et 1980, et 20 à 30 % de perte supplémentaire depuis, dont 10 % pour le seul été 2003), diminution de la période de couverture neigeuse de 8,8 jours par décennie entre 1971 et 1994 dans une zone entre 45° et 75° de latitude nord, augmentation de la saison de végétation de 10 jours entre 1962 et 1995 et de la productivité de la végétation de 12 %, migration vers le nord et vers le haut de plantes (diversité enrichie de l'Europe du nord-ouest et en montagne pour 21 de 30 sommets alpins), accroissement du taux de survie de populations d'oiseaux hivernant en Europe.

Selon le rapport intitulé «Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012», la température moyenne au-dessus des terres en Europe au cours de la dernière décennie (2002-2011) était de 1,3°C plus élevée que le niveau préindustriel, ce qui en fait la décennie la plus chaude jamais enregistrée (EAA, 2012).

Diverses projections de changements climatiques montrent que la température moyenne de l'Europe pourrait être de 2,5 à 4°C plus élevée dans la seconde moitié de ce siècle par rapport

à la moyenne enregistrée de 1961 à 1990. Les vagues de chaleur sont plus fréquentes et plus longues.

Si les précipitations diminuent dans les régions méridionales, il est établi dans le rapport qu'elles augmentent en Europe septentrionale. Ces tendances devraient se poursuivre. Le changement climatique devrait augmenter la fréquence des débordements des cours d'eau et rivières, surtout dans le nord de l'Europe, car l'augmentation des températures intensifie le cycle de l'eau. L'assèchement des cours d'eau et rivières semble être devenu plus sévère et fréquent en Europe méridionale. Le débit minimal devrait diminuer notablement en été en Europe du Sud, mais aussi dans d'autres régions de l'Europe, à divers degrés.

L'Arctique se réchauffe plus vite que les autres régions. En 2007, 2011 et 2012, une diminution très importante a été enregistrée des glaces de l'Océan Arctique, environ la moitié de l'étendue minimale constatée dans les années 1980. La fonte de la calotte glaciaire du Groenland a doublé depuis les années 1990, avec une perte annuelle moyenne de 250 milliards de tonnes de 2005 à 2009. Les glaciers des Alpes ont perdu environ les deux tiers de leur volume depuis 1850 et cette tendance devrait se poursuivre. Des températures moyennes plus élevées, ainsi qu'une diminution des précipitations dans les régions méridionales et une augmentation de ces dernières en Europe du Nord. La calotte glaciaire du Groenland fond, de même que les glaces de l'Océan Arctique et de nombreux glaciers en Europe.

Le manteau neigeux a diminué et une grande partie du permafrost s'est réchauffée. Ces dernières années, des événements climatiques extrêmes tels que vagues de chaleur, inondations et sécheresses ont entraîné des dommages de plus en plus coûteux en Europe. Il convient certes de disposer de davantage de preuves pour déterminer la part du changement climatique dans cette tendance, mais l'augmentation des activités humaines dans les zones à risque a été un facteur clé. L'évolution future du climat devrait augmenter cette vulnérabilité, car les événements extrêmes devraient devenir plus intenses et plus fréquents. Si les sociétés européennes ne s'adaptent pas, le coût des dommages devrait, selon le rapport, s'accroître (EAA, 2012). Le rapport souligne que certaines régions seront moins à même de pouvoir s'adapter au changement climatique que d'autres, en partie à cause des disparités économiques en Europe. Les effets du changement climatique pourraient renforcer ces inégalités.

En France, elle a ainsi atteint environ 1°C et la première décennie du XXI^{ème} siècle confirme cette tendance. Les projections climatiques basées sur les scénarios dits SRES (Special Report on Emissions Scenarios) établis par le GIEC prédisent pour la France une

augmentation moyenne des températures de 3°C (scénario B2) à 5°C (scénario A2) d'ici à 2100. Des modifications des régimes des précipitations sont également prévues. Au cours du XX^{ème} siècle, la température moyenne annuelle de la Terre s'est accrue d'environ 0,6°C; c'est sur les continents que cette augmentation a été plus forte (en France, elle a ainsi atteint environ 1°C). La décennie 1990 a été la plus chaude du XX^{ème} siècle et la première décennie du XXI^{ème} siècle confirme cette tendance. Pendant cette même période, la moyenne des précipitations en France a augmenté. La France a subi des hivers très pluvieux mais des étés très secs, la sécheresse de 2003 en est l'exemple le plus marquant. De façon générale, les événements extrêmes du passé récent, que les médias attribuent parfois hâtivement au changement climatique, ne peuvent pas l'être de façon claire. Une fréquence élevée de certains aléas, par exemple les tempêtes majeures de 1990, 1999 et 2009, n'apparaît pas forcément comme une fréquence exceptionnelle si on considère des périodes longues (le siècle) (Moisselin, 2002).

I.3.2.3. En Algérie

Comme bien des pays d'Afrique, les conséquences d'un temps extrême ou qui n'est pas de saison n'ont pas épargné l'Algérie. Connue pour son climat aride et semi-aride, la région est extrêmement sujette aux changements climatiques. Ces 50 dernières années, un accroissement d'événements dus au temps extrême a été observé. La 2^{ème} Communication Nationale de l'Algérie au titre de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), a mentionné :

- Une hausse des températures moyennes minimales et maximales enregistrée sur l'ensemble des stations de l'Algérie du Nord depuis les années 1970 et qui continue jusqu'à nos jours ;
- Les impacts des changements climatiques ont provoqué une sécheresse endémique depuis 1975, engendrant une désertification avec une dégradation de plus de 8 % de la forêt et une érosion éolienne et hydrique des sols ;
- Une tendance à la sécheresse observée durant les 30 dernières années.

Il y a lieu de noter par ailleurs que ces tendances sont conformes à celle observées au niveau mondial. Il traduit une manifestation au niveau du territoire algérien du réchauffement global qui a démarré depuis les années 1970 ainsi que les perturbations dans le cycle des précipitations observée un peu partout dans le monde (Projet MATE-PNUD-FEM, 2015). Le

modèle MAGICC estime pour l'Algérie un réchauffement de l'ordre de 1°C entre l'année 2000 et l'année 2020 accompagné d'une fluctuation de la pluviométrie avec une tendance à la baisse, de l'ordre de 5 à 10 % sur le court terme (Lakhdari, 2009). L'accroissement des températures et la fluctuation des régimes pluviométriques auront des conséquences néfastes et directes sur l'agriculture du pays. Parmi les phénomènes enregistrés dans des études climatologiques de la Météorologie nationale qui témoignent de ce changement, on compte un accroissement de la fréquence des pluies torrentielles, surtout sur les hauts plateaux (ex. : Ghardaïa et Béchar en 2009–2010), qui ont entraîné des inondations pour la première fois.

En 2020, les chutes de pluie quotidiennes dépasseront peut-être la moyenne annuelle normale au sud du pays. Autres phénomènes extrêmes qui se sont produits : cyclogénèse, sécheresse, vague de chaleur et tempêtes de sable. Les scientifiques ont estimé que les chutes de pluie vont diminuer d'environ 20 % dans les années à venir. Les experts de l'Institut hydrométéorologique de formation et de recherche prévoient un raccourcissement de la saison des pluies et une hausse des températures d'environ 1,0 à 1,5°C en 2020 (Bourchef, 2013), ce qui aurait des conséquences fatales pour 30 % des espèces animales. Ils estiment également que les températures vont augmenter de 3°C en 2050 à cause du réchauffement mondial.

Les chutes de neige ont baissé de 40 % dans plusieurs régions d'Algérie, comme à Tlemcen, Ouarsenis et Djurdjura. Une autre conséquence est la grande raréfaction des ressources en eau. Les hautes températures de la journée et la nuit et les vagues de chaleur. La flore et la faune terrestres et marines ont été grandement touchées par cette hausse. Le changement des conditions environnementales est favorable et/ou défavorable à certains facteurs écologiques par rapport à d'autres, ce qui entraîne un changement des environnements et les espèces de la flore et de la faune qui les constituent. Le changement s'exprime par la raréfaction et/ou la disparition des espèces au détriment d'autres, la désertification et la pollution, ce qui entraîne la dégradation de l'environnement (Caritas, 2011).

D'autres aspects des conséquences du réchauffement mondial sur les régions côtières de l'Algérie comprend le haut niveau de la mer et les vagues dangereuses (des tempêtes plus fortes et plus fréquentes en 1980, 1989, 1995 et 2001), provoquant l'érosion et même la disparition des plages (ex. : les plages à l'ouest d'Alger, la plage de Bejaia, de Boumerdes et d'Oran). De tels phénomènes provoquent la perte de plages (ex. : West Beach à Sidi Fredj, à

l'ouest d'Alger), et par conséquent une perte de l'écotourisme et de l'intérêt économique, de l'intrusion saline (salinisation des sols et de la nappe phréatique) et de l'inondation des régions côtières à basse altitude.

L'Algérie a été l'un des premiers pays d'Afrique à ratifier toutes les sections des accords internationaux sur la protection de l'environnement, y compris le Protocole de Kyoto et la Convention de Barcelone. Toutefois, leur mise en application et leur surveillance sont inadaptées. Par exemple, le ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Environnement et du Tourisme organise des conférences et des séminaires presque tous les ans pour parler des problèmes écologiques. Des accords, des lois et des projets sont prévus mais leur mise en application est très limitée en ce qui concerne l'espace (souvent seulement dans la capitale) et le temps. L'Algérie est grandement impliquée dans les problèmes du réchauffement mondial et écologiques sur les fronts politique et économique. Toutefois, les actions prises pour remédier à la situation sont presque non-existantes. D'après les experts en météorologie et environnement d'Algérie, il sera nécessaire à l'avenir de penser à développer des sources d'énergie renouvelable, de transport publique et de techniques d'isolation dans le secteur de la construction, ainsi que de mettre en place des systèmes de surveillance et d'alerte pour les sécheresses et les vagues de chaleur dans les villes vulnérables (Caritas, 2011).

I.3.3. Scénarios futurs du climat

Les scénarios climatiques sont considérés comme des descriptions plausibles du climat futur, et ce, sur la base d'une ou de plusieurs projections climatiques. Lorsque l'information est transmise sous forme de changements climatiques par rapport à une certaine période de référence, on parle alors de scénarios de changements climatiques. Les scénarios sont typiquement établis afin de déterminer les conséquences potentielles des changements climatiques d'origine humaine (GIEC, 2007a) et constituent une information pouvant être utilisée lors d'études d'impact comme intrant dans un modèle bioclimatique. Les concentrations d'aérosols et de GES dans l'atmosphère influencent directement le bilan radiatif de la planète et par conséquent le climat. Les chercheurs du GIEC ont donc élaboré une série de scénarios d'émission d'aérosols et de GES, en faisant varier de différents éléments (l'économie, la démographie humaine, les industries et la technologie). Ces scénarios d'émission sont connus sous le sigle « SRES » (Special Report on Emission

Scenarios) (Nakićenović et Swart, 2000) et appartiennent aux quatre grandes catégories illustrées dans la Figure 3.

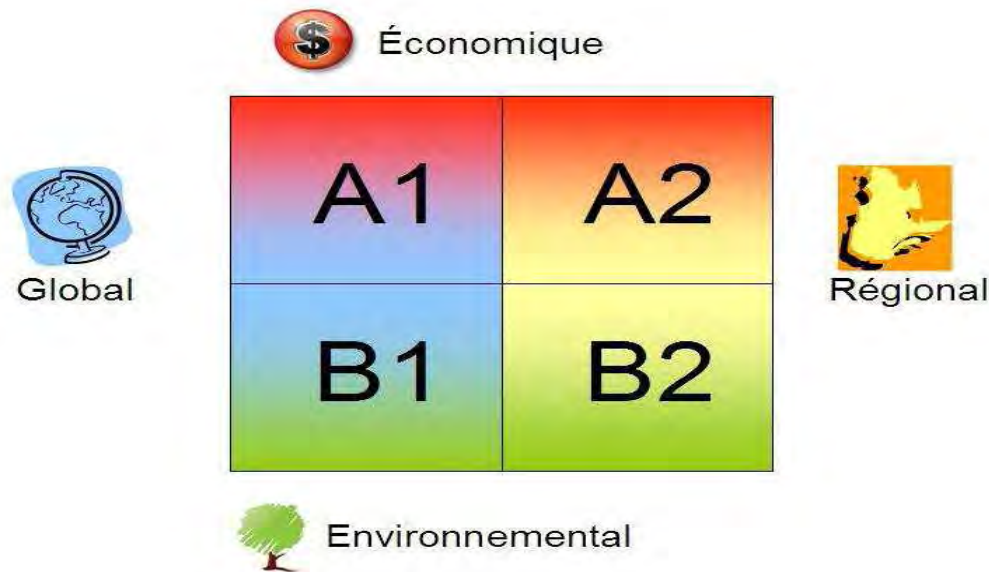


Figure 3: Représentation schématique des quatre grandes catégories de scénarios d'émission d'aérosols et de gaz à effet de serre du SRES selon leur association aux facteurs économiques ou environnementaux globaux ou régionaux (Nakićenović et Swart, 2000).

Les scénarios associés à la catégorie A1 sont axés sur une croissance économique rapide et un développement technologique des systèmes énergétiques. On y retrouve également une convergence sociale et culturelle au niveau des différents territoires, diminuant ainsi les différences entre elles. Ces scénarios reposent sur l'hypothèse d'une croissance économique rapide de l'économie mondiale associée à une croissance de la population mondiale jusqu'au milieu du XXI^{ème} siècle, suivie d'une légère baisse de celle-ci et de l'introduction rapide de nouvelles technologies énergétiques efficaces. Les économies régionales se développent fortement et la prospérité est répartie équitablement.

Les scénarios de la catégorie A1 se subdivisent en trois groupes :

- A1FI : Le monde continue principalement de fonctionner avec les combustibles fossiles ;
- A1T : Avec des combustibles non fossiles ;
- A1B : avec un mélange des deux.

Les scénarios de la catégorie A2 représentent plus particulièrement une croissance économique orientée sur l'autosuffisance locale. Ils décrivent un monde qui reste divisé. Dans

l'ensemble, il n'y a pas de redistribution des ressources naturelles disponibles, des connaissances technologiques et du bien-être entre les régions riches et pauvres.

Les scénarios de la catégorie B1 s'orientent vers une économie axée sur l'équité et sur une gestion efficace des ressources. Les activités de production y sont de moindre importance. Les scénarios de B1 suivent les scénarios de A1, mais le monde se tourne plus rapidement vers une économie axée sur les services avec une introduction rapide de technologies propres et durables.

Finalement, les scénarios de B2 mettent l'accent sur des solutions locales et sur la protection de l'environnement. Le développement de nouvelles technologies y est moins rapide. Les scénarios de B2 parlent d'un monde axé sur la préservation de l'environnement et de l'égalité sociale, mais qui part de solutions régionales en matière de durabilité économique, sociale et écologique. Pour ce qui est de la population humaine, les scénarios des catégories A1 et B1 décrivent une augmentation rapide suivie d'une diminution alors que pour les scénarios des catégories A2 et B2, la population augmente de façon plus lente, mais constante (GIEC, 2000). Le choix du scénario d'émission aura donc un effet sur les résultats de l'étude que l'on désire réaliser.

Dans certaines études sur l'évolution des GES, on mentionne que les scénarios plus extrêmes (catégories A1 et A2) seraient davantage envisageables que les scénarios plus conservateurs (catégories B1 et B2) (Lepage et al, 2011; Heymans et al, 2013).

La Figure 4 montre les projections des émissions des gaz à effet de serre et de la température de la Terre jusqu'en 2100 pour quelques scénarios du GIEC. Selon le Rapport spécial du GIEC sur les scénarios d'émissions (SRES, 2000), les émissions mondiales de GES (en équivalent-CO₂) augmenteront de 25 à 90 % entre 2000 et 2030. Les combustibles fossiles gardant une place prépondérante parmi les sources d'énergie jusqu'en 2030 et au-delà. Les scénarios n'incluent pas d'initiatives climatiques supplémentaires, ce qui signifie que l'on n'inclut aucun scénario qui suppose expressément l'application de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques ou des objectifs du Protocole de Kyoto pour les émissions. On obtient des fourchettes comparables avec les scénarios plus récents qui ne prévoient pas de mesures additionnelles de réduction des émissions (Figure 4 d'après Heymans et al, 2013).

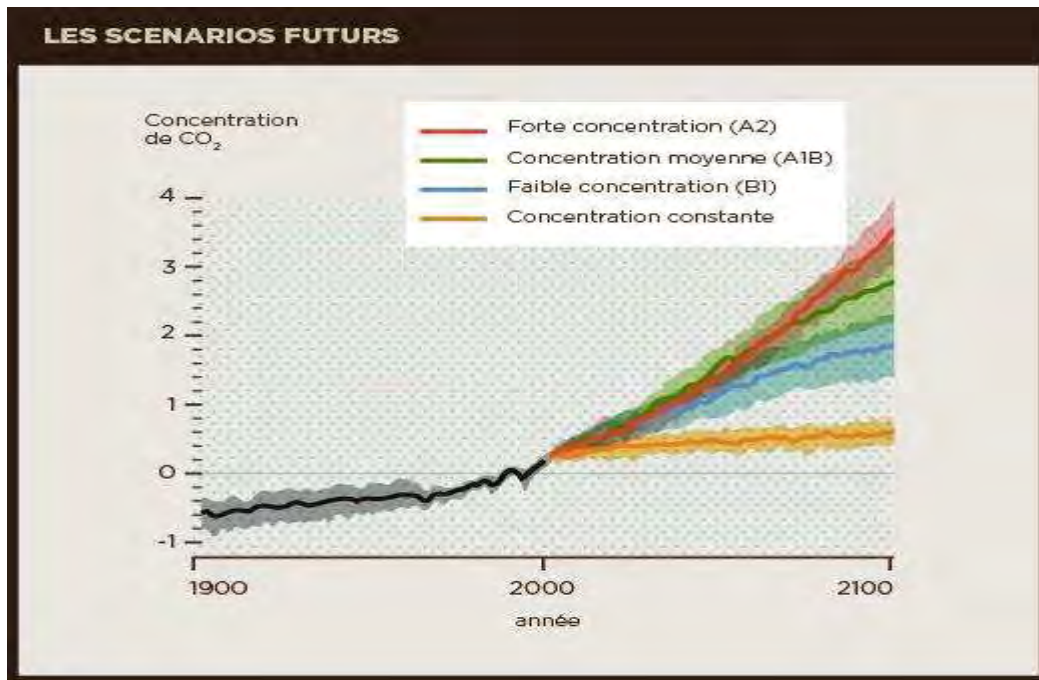


Figure 4 : Concentration en CO₂ selon les scénarios futurs selon (Heymans et al, 2013).

Selon le 4^{ème} rapport du GIEC, les meilleures estimations et les fourchettes probables pour le réchauffement global moyen de l'air en surface pour les six scénarios d'émissions du RSSE (Rapport spécial du GIEC sur les scénarios d'émissions) figurent au tableau 1. Par exemple, la meilleure estimation dans le cas du scénario le plus bas (B1) est 1,8°C (dans une fourchette probable de 1,1 à 2,9°C), tandis que la meilleure estimation pour le scénario le plus élevé (A1FI) est de 4,0°C (dans une fourchette probable de 2,4 à 6,4°C). Le 4^{ème} Rapport d'évaluation est plus avancé car il propose les meilleures estimations statistiques et estime des intervalles de confiance pour les scénarios de référence (GIEC, 2007). La nouvelle évaluation des fourchettes probables repose maintenant sur un plus grand nombre de modèles climatiques d'une complexité et d'un réalisme accrus, ainsi que sur de nouvelles informations relatives à la nature des rétroactions liées au cycle du carbone et aux limitations des réponses du climat, telles qu'elles ont été observées.

Tableau 1. Projection du réchauffement global moyen en surface et de l'élévation du niveau de la mer à la fin du XXI^{ème} siècle.

Cas	Changement de température (°C) en (2090-2099) par rapport à (1980-1999)		Elévation du niveau de la mer (m en 2090-2099 par rapport à (1980-1999))
	Meilleure estimation	Fourchette probable	Fourchette couverte par les modèles, ne tenant pas compte de futurs changements dynamiques rapides au niveau de l'écoulement des glaces
Concentration constante pour l'année 2000b	0,6	0,3 – 0,9	NA
Scénario B1	1,8	1,1 – 2,9	0,18 – 0,38
Scénario A1T	2,4	1,4 – 3,8	0,20 – 0,45
Scénario B2	2,4	1,4 – 3,8	0,20 – 0,43
Scénario A1B	2,8	1,7 – 4,4	0,21 – 0,48
Scénario A2	3,4	2,0 – 5,4	0,23 – 0,51
Scénario A1FI	4,0	2,4 – 6,4	0,26 – 0,59

I.3.4. Maitriser et limiter les facteurs du changement climatique

Deux types de mesures sont nécessaires pour faire face aux changements climatiques : des mesures d'atténuation et d'adaptation. Les mesures d'atténuation permettent de limiter les changements climatiques tandis que l'objectif des mesures d'adaptation est de réduire la vulnérabilité des systèmes naturels et socio-économiques et ainsi de faire face aux changements climatiques à moindre coût (Mansanet-Bataller, 2010).

Pour autant, il est important de souligner que ces deux stratégies sont intimement liées par deux éléments. D'abord, les mesures d'adaptation nécessitent la mise en œuvre de mesures d'atténuation pour éviter des situations dans lesquelles l'adaptation n'est même plus possible.

Sans mesure de réduction d'émissions, l'adaptation sera en effet impossible pour certains systèmes ou agents.

Aussi, dans une optique de limiter les coûts liés aux changements climatiques, il est préférable de s'attaquer à la source du problème (et donc réduire les émissions de gaz à effet de serre) plutôt qu'essayer en vain de s'adapter à tout changement climatique. D'autre part, certaines stratégies d'adaptation permettent aussi de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Par exemple, promouvoir le boisement pour maintenir les sols, comme dans les Landes, est une stratégie d'adaptation qui permet en parallèle de stocker du CO₂. Le point commun à toutes ces définitions néanmoins est que l'anticipation d'un climat futur différent de celui d'aujourd'hui doit conduire à modifier les comportements actuels des individus et des systèmes, sur la base de prévisions sur le climat futur (Mansanet-Bataller, 2010).

A) Atténuation des impacts de changement climatique

La définition de l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre est unique et claire : il s'agit de réduire les émissions ou de stimuler leurs stockages dans des réservoirs naturels tels que les forêts. Ces actions peuvent avoir lieu n'importe où sur la planète : leur impact sur la concentration moyenne de gaz à effet de serre de l'atmosphère sera le même.

L'agriculture engendre environ 23 % des émissions de gaz à effet de serre (GES). L'une des solutions préconisées pour limiter ces émissions est d'adopter des modes de cultures propices à la séquestration du carbone. Les chercheurs de l'institut de recherche pour le développement durable (IRD) quantifient l'émission et le stockage des GES dans les sols cultivés des régions tropicales. Ils ont développé, en partenariat avec la FAO, un outil de calcul et d'aide à la décision : EX-ACT (EX-Ante Carbon balance Tool). Il fournit une estimation des impacts de l'usage et du changement d'usage des sols sur les émissions de GES et la séquestration du carbone. EX-ACT permet ainsi d'évaluer des projets, des filières de production agricole ou des politiques environnementales.

Les données satellitaires d'observation de la Terre sont un outil essentiel pour faire face aux défis environnementaux, et plus particulièrement pour le suivi des émissions de GES liées à la déforestation et à la dégradation des forêts dans les pays en développement. La maîtrise de l'utilisation des données satellitaires d'observation de la Terre constitue un atout puissant

pour une gestion durable des ressources et des territoires (Rapport changement climatique les défis de la recherche avec le Sud, 2015).

B) Adaptation

Hormis très localement où elle était vitale (aux Pays-Bas, régulièrement menacés par la mer, où un vaste « Plan digue » a été relancé en 1953), l'adaptation est restée secondaire jusqu'à la fin des années 1990, malgré la prise de conscience de l'avancée des déserts (du Sahara et de Gobi notamment). L'adaptation venait en urgence ou dans les démarches de développement durable, derrière les mesures de lutte et d'atténuation. Cependant, dans un contexte de mondialisation, et de crise écologique et socio-économique, alors que le monde n'a pas réussi à diminuer ses émissions globales de gaz à effet de serre, et que les puits naturels de carbone ont continué à se dégrader, l'adaptation prend une importance croissante, y compris dans la négociation internationale, avec par exemple la question des réfugiés climatiques et des solidarités Nord-Sud et riches-pauvres (De Perthuis et al, 2010).

En revanche, plusieurs définitions existent pour les mesures d'adaptation. D'après le GIEC (2001), l'adaptation est l'ajustement des systèmes naturels ou humains pour répondre à des changements climatiques actuels ou attendus (ou à leurs effets), pour en modérer les conséquences négatives et tirer profit des opportunités. Les stratégies d'adaptation peuvent aussi être définies selon Mendelsohn (2006) comme les changements que les personnes, les entreprises ou les gouvernements encourent pour réduire les dommages (ou augmenter les bénéfiques) des changements climatiques. Plus récemment, l'Accord de Copenhague (2009) a élargi le concept d'adaptation en ajoutant à la définition communément admise jusqu'alors, celle de l'adaptation aux effets négatifs des changements climatiques, un nouveau volet, celui de l'adaptation aux impacts des actions d'atténuation.

S'adapter ne consiste donc pas seulement à analyser la vulnérabilité des territoires ou des acteurs aux évolutions climatiques attendues, mais aussi à mettre en place des actions adéquates. C'est pourquoi l'analyse des impacts des changements climatiques diffère considérablement de l'analyse de l'adaptation à ces impacts, à laquelle cette étude s'attache. Les actions d'adaptation auront lieu en partie de façon autonome ; les individus et les sociétés changeront les technologies utilisées et incorporeront de nouvelles pratiques, mais il sera aussi nécessaire de planifier certains changements, et cette responsabilité reviendra aux pouvoirs

publics. L'adaptation aux changements climatiques présente certaines caractéristiques notablement différentes de l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre :

- a) Les bénéfices des politiques d'adaptation ont un caractère local alors qu'ils sont globaux dans le cas de la réduction des émissions de gaz à effet de serre ;
- b) Une double incertitude, concernant le climat futur et les impacts de ses changements sur les systèmes, doit être prise en compte dans la mise en place des politiques d'adaptation ;
- c) Le maintien de l'utilisation de référentiels rendus potentiellement obsolètes dans un futur proche peut entraver le développement des mesures d'adaptation.

Malgré la complexité de la mise en place de politiques d'adaptation, plusieurs études (Stern, 2006 ; Parry et al, 2009) ont démontré qu'il était nécessaire d'agir dès aujourd'hui dans la mesure où les coûts des impacts des changements climatiques seront supérieurs sans mise en place de mesures d'adaptation. En pratique, trois critères peuvent guider la mise en place des mesures d'adaptation :

- La hiérarchisation des mesures : Il est fondamental de bien hiérarchiser les mesures d'adaptation en favorisant les mesures sans regret, en évitant les écueils de la mal adaptation, et appliquant des méthodes telles que la minimisation des coûts économiques futurs ou l'apprentissage par l'expérience ;
- L'implication des pouvoirs publics : Les pouvoirs publics doivent jouer un rôle moteur dans l'encouragement à la mise en place des mesures d'adaptation aussi bien par le secteur public que le privé et notamment en favorisant la mise à disposition de l'information et la réflexion sur le sujet, et en établissant des référentiels cohérents avec le climat futur ;
- L'adaptation des solutions de financement au cas par cas tout en créant les canaux nécessaires pour que le financement arrive à ceux qui en ont le plus besoin.

Deux grandes formes d'adaptation, complémentaires et nécessaires existent : L'adaptation réactive (réaction aux impacts adverses du changement climatique, lorsqu'ils se produisent) (Smit et al, 2000). L'adaptation anticipative, qui en réalité sont souvent traitées conjointement et parfois dans l'urgence; Par exemple, « le Plan Climat adopté en France après la canicule de 2003 peut être interprété à la fois comme une réaction à l'évènement de 2003, et comme une manière d'anticiper des évènements similaires dans le futur » (Athukorala et Resosudarmo. 2005).Hallegatte (2008) a montré que la gestion réactive des risques à la Nouvelle Orléans a

conduit à des catastrophes de plus en plus graves et coûteuses ; alors que la gestion proactive et anticipatoire des Néerlandais a permis une maîtrise des risques plus efficace.

C) Variantes géographiques de l'adaptation

C1) Afrique

Un programme NECTAR (Négociations Climat pour Toute l'Afrique Réussies) est soutenu par l'Initiative Climat et Développement de la Francophonie (ICDF) lancée en 2005 par l'Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie (IEPF) pour aider l'Afrique à intégrer l'adaptation au changement climatique dans ses projets de développement durable, pour la période post-Kyoto (après 2012). Six études sectorielles de l'IEPF ont été publiées en 2008 pour identifier des priorités sectorielles (bâtiments et urbanisme, agriculture, forêts, énergie, eau et assainissement, transport) pouvant servir de base aux négociations internationales (Chafil, 2009 et Riedacker, 2009).

C2) Amérique

En Amérique du Nord, quelques États ont mis en place des stratégies d'adaptation, et il a fallu attendre l'administration Obama pour lancer des travaux pluridisciplinaires et plus significatifs sur ce sujet. Un budget spécifique a été attribué en 2010 aux CDC (Centers for Disease Control) (Jouan et Magaud, 2009). Le Québec a mis en place son plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques et prépare actuellement le Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques (PACC 2013-2020). Le site Mon climat, ma santé (Site Mon climat, ma santé) a été mis en place pour faciliter l'adaptation et diminuer l'impact des changements climatiques sur la santé.

C3) Europe

Les cartes interactives disponibles en 2012 pour plus de 500 grandes villes européennes, et les études disponibles montrent une grande variation dans la vulnérabilité des régions et villes européennes face au changement climatique (EEA Briefing, 2005). Des esquisses ou propositions de réponses sont présentées dans le rapport ; Adaptation urbaine au changement climatique en Europe. Dans le cadre de son programme sur le changement climatique 36,

le 29 juin 2007, la Commission européenne a publié et mis en consultation un Livre vert (Eye on Earth information service) sur « L'adaptation au changement climatique en Europe (sous-titré : les possibilités d'action de l'UE) ». Il propose plusieurs possibilités d'action pour traiter les effets du changement climatique. L'étape de consultation s'est terminée en octobre 2007. Ces deux premières phases devant être le support de débats avant une prise de décision prévue en 2008. Il prône à la fois l'adaptation et l'atténuation. En 2007 la commission a annoncé prévoir la création d'un « groupe consultatif européen sur l'adaptation ». En février 2008, L'UE encourage tous les acteurs à se préparer à vivre avec le changement climatique, c'est-à-dire préparer leur adaptation au changement climatique (**ec.europa.eu**) avec une triple priorité concernant l'adaptation :

- Anticiper les effets du changement climatique.
- Prendre des mesures rentables pour réduire les impacts néfastes.
- Développer des stratégies aux niveaux local, régional, national et communautaire.

Les Pays-Bas préparent une dépoldérisation partielle. Des pays baltes (Estonie, Finlande, Allemagne, Lettonie, Lituanie et Pologne) mettent en œuvre un projet ASTRA41 (Interreg III B) visant à hiérarchiser et localiser les risques et anticiper les effets du changement climatique sur les zones littorales de la Baltique. En 2012, l'Agence européenne de l'environnement a publié un rapport « Urban adaptation to climate change in Europe Challenges and opportunities for cities together with supportive national and European policies » (EEA, 2004). Elle héberge également une plate-forme de partage de données et d'informations sur l'adaptation au changement climatique dite Climat-ADAPT, créée en coopération avec la Commission européenne. En avril 2013, la commission a publié sa « Stratégie européenne pour l'adaptation au changement climatique ».

CHAPITRE II

Impacts des changements climatiques sur les arbres fruitiers

II.1. Notion de la phénologie

Afin de pratiquer une gestion efficace, les intervenants en agriculture peuvent s'appuyer sur plusieurs notions liées à la physiologie des cultures, afin de les aider à sélectionner les meilleures opportunités qui s'offrent à eux. Parmi ces notions, la phénologie ou "Phainestai" qu'est un mot grec ancien, signifiant montrer ou apparaître, se trouve dans beaucoup de langues modernes reflétant l'originalité. Selon la définition de Lieth (1974), qui remonte à Schnelle (1955), la phénologie moderne est l'étude du moment des événements biologiques récurrents dans le monde animal et végétal, des causes de leur synchronisation avec les forces biotiques et abiotiques, et l'interrelation entre les phases d'une même espèce ou d'espèces différentes. Elle permet de mieux cibler les interventions au champ en déterminant les stades de développement critiques selon divers paramètres météorologiques.

Le développement des plantes et donc les phases phénologiques montrent une grande variabilité interannuelle et de grandes différences spatiales. Les individus (gènes, âge) et les facteurs environnementaux (conditions météorologiques et climatiques à l'échelle micro et macro, conditions du sol, approvisionnement en eau, maladies, compétition, etc.) influencent les plantes. Ils peuvent être considérés comme des dispositifs de mesure intégratifs pour l'environnement. Cependant, le cycle saisonnier des plantes est influencé par la température, la photopériode et la précipitation (Sarvas, 1972 et 1974, Morellato et Haddad, 2000, Keatley, 2000). En particulier, le développement au printemps sous les latitudes moyennes dépend surtout de la température en hiver et au printemps, dans les régions tropicales et subtropicales, le régime des pluies est prédominant.

Le terme «phénologie» décrit l'apparition de stades importants dans le développement d'une espèce végétale. Cette phénologie est prédéterminée par son bagage génétique et modulée par les conditions de l'environnement. La vitesse de l'apparition des différents stades de développement est influencée par les conditions météorologiques ambiantes, la photopériode et la conduite de la culture. Chaque stade représente une phase de développement spécifique marquant les épisodes phénologiques d'une culture, tels que la germination, la levée ou l'élongation de l'hypocotyle, l'apparition des feuilles, la floraison, la fructification, la maturité, etc. Afin de pouvoir décrire mathématiquement les stades phénologiques d'une culture ou d'un groupe de cultures, plusieurs échelles de référence ont été développées (Koch et al, 2009).

Étant donné que chaque culture possède des particularités spécifiques en termes de besoins nutritionnels ou de temps de développement, une bonne connaissance des notions de croissance est essentielle afin de comprendre les exigences de la culture au champ et de planifier les périodes de récolte (Bourgeois et Lepage, 2012). En raison de la relation étroite entre le développement des plantes, le temps et le climat, les réseaux d'observation phénologique sont gérés par les services météorologiques nationaux dans de nombreux pays.

La phénologie est un instrument facile à observer et rentable pour la détection précoce des changements dans la biosphère, et complète donc très bien les mesures instrumentales des services météorologiques nationaux. Ces dernières années, la phénologie a changé son image d'une collection traditionnelle de données traditionnelle à un paramètre intégratif important dans les systèmes de modélisation pour prédire et évaluer l'impact des changements climatiques sur les écosystèmes. Dans ce contexte de longues séries de données provenant des réseaux d'observation des plantes sont devenus très précieuses, et le maintien des réseaux d'observation est devenu une priorité au sein des services météorologiques nationaux (Koch et al, 2009).

II.2. Intérêts de la phénologie

La phénologie est un bon instrument pour communiquer les caractéristiques du climat en général, et en particulier les impacts des changements climatiques sur le grand public. L'information sur la caractéristique précoce ou tardive de l'année en cours, peut augmenter la sensibilisation du public à la nature et sa chronologie saisonnière et peut agir comme une motivation pour que les gens observent activement les processus naturels. En outre, la phénologie est déjà (et pourrait devenir) un sujet encore plus important pour renforcer les activités de relations publiques des services météorologiques. L'importance de la phénologie réside dans son efficacité en tant qu'un outil de surveillance des impacts des changements climatiques sur les plantes et les animaux.

Parmi les effets imminents sur la végétation, notons : 1) les déplacements (flux des gènes) vers les régions polaires et les altitudes plus élevées, (2) les changements dans la densité de population et la composition de la végétation, (3) des saisons de croissance plus

longues et (4) floraison précoce des plantes et périodes de reproduction avancées. Les intervalles auxquels de tels événements se produisent sont étroitement liés au climat et aux conditions météorologiques, en particulier la température au printemps et en été (Sparks et al, 2001, Menzel, 2003). Contrairement à la modification des variations de gamme ou à la modification de la composition des écosystèmes, qui peut être confondue par d'autres facteurs, tels que le changement d'utilisation des terres ou l'habitat, la température est le facteur d'influence crucial. Ainsi, la phénologie est probablement le moyen le plus simple et le plus rentable d'observer les effets des changements de la température, et par conséquent, la phénologie est devenue un outil important dans la recherche d'un éventuel changement global (Sparks et Menzel, 2002, Walther et al, 2002).

L'utilisation de la phénologie comme un indicateur biologique du changement climatique présuppose (1) une analyse quantitative précise des changements dans les séries temporelles phénologiques, (2) une relation connue avec la température et/ou précipitation, et (3) un changement analogue de la température et/ou de la précipitation correspondante au fil du temps (Root et al, 2003). L'agriculture et la science forestière ont appliqué des données phénologiques pour le calendrier des travaux agricoles et la sélection de cultures et de cultivars appropriés. La phénologie a également été une méthode de mesure complémentaire pour l'évaluation des conditions climatiques locales. De nos jours, les données phénologiques sont largement utilisées pour fournir des données d'entrée précieuses pour la modélisation de la croissance et du rendement des cultures. Elles apportent un soutien important aux avertissements de gel et sont indispensables pour les mesures de lutte antiparasitaire (Lepage et Bourgeois, 2012).

Les phases phénologiques reflètent entre autres les conditions environnementales, les facteurs génétiques et les caractéristiques du climat. Par conséquent, de longues séries d'observations phénologiques peuvent être utilisées pour détecter la variabilité du climat et/ou les changements climatiques. La réponse significative des événements du cycle de vie aux changements globaux a provoqué une forte augmentation de l'intérêt pour les processus phénologiques en tant qu'indicateur des impacts des changements climatiques. En tant que marqueur du climat, la phénologie est donc un élément clé de l'autécologie des espèces car elle permet de mieux appréhender leur adaptation au contexte écologique et climatique local de développement (Figure 5) (Lebourgeois et al, 2006). Cependant, le calendrier des

événements phénologiques est également important pour d'autres questions en éducation, agriculture, santé humaine, tourisme et loisirs, biodiversité et écologie, reflétant la réponse significative des événements du cycle de vie aux changements globaux.

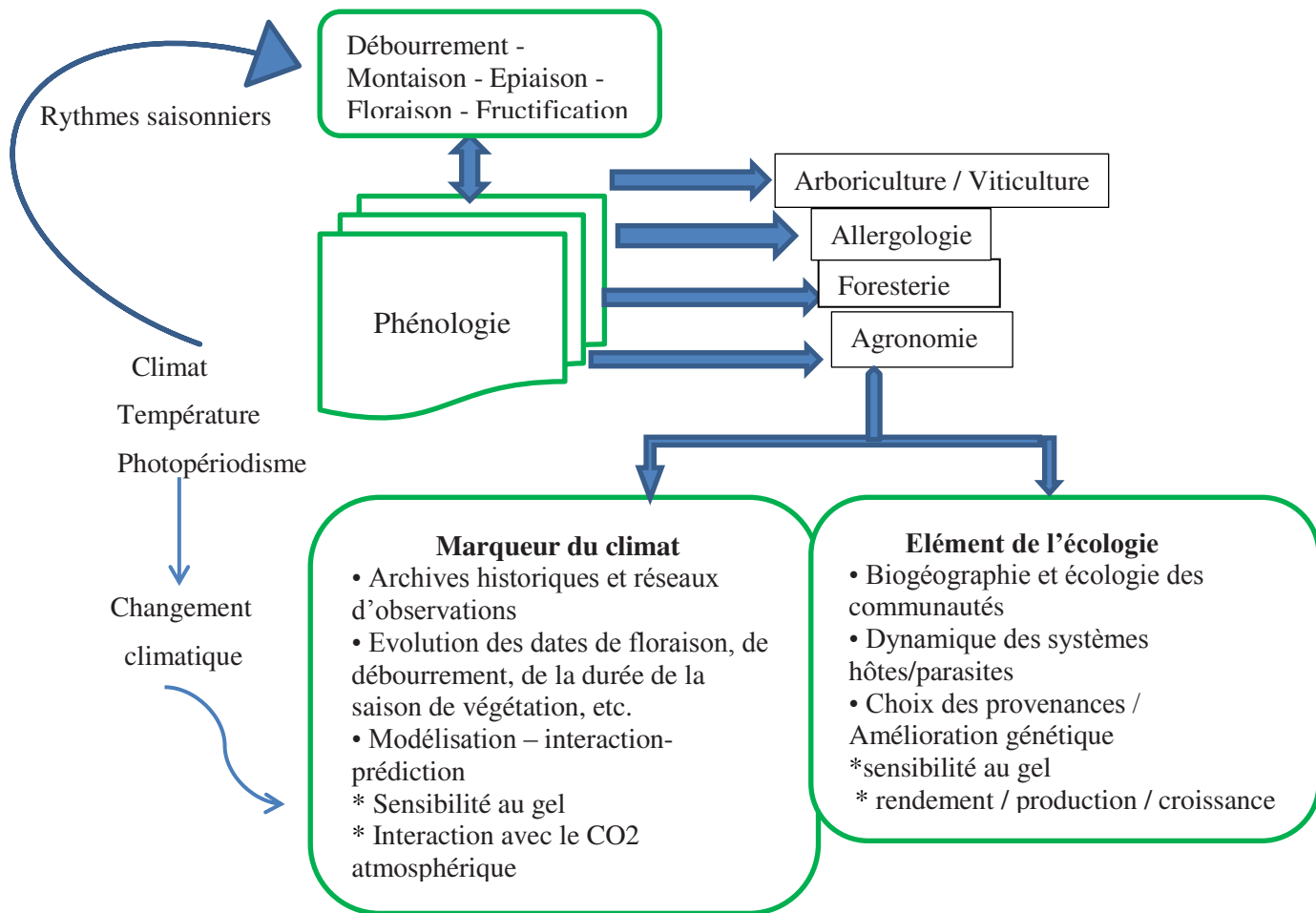


Figure 5 : Phénologie : Elément de l'autécologie et marqueur des changements environnementaux d'après Lebourgeois et al (2006).

II.3. Stades phénologiques des arbres fruitiers.

En arboriculture, plusieurs systèmes de description accompagnés de dessins représentatifs des principaux stades repères des arbres fruitiers ont été proposés. Le plus couramment utilisé est le code Baggiolini (1952) subdivisé en 16 stades de A à P. Dans les années 1990, un code décimal (de 0 à 99), appelé échelle BBCH ((Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt et Chemische Industrie, se traduisant par Centre fédéral de recherche biologique pour l'agriculture et l'industrie chimique) a permis de disposer d'un système uniforme pour décrire le développement de l'ensemble des plantes cultivées. Adopté par les chercheurs, les techniciens et les praticiens, il facilite notamment l'échange des données informatiques (Lancashire et al, 1991; Hack et al, 1992).

La définition des stades repères des arbres fruitiers proposée par les différents auteurs n'est pas toujours la même. Les phénomènes végétatifs décrits ou leur période d'apparition peuvent d'ailleurs différer d'une espèce fruitière ou d'une variété à l'autre. L'établissement d'une correspondance entre les différents systèmes a donc été nécessaire. Pour obtenir des données phénologiques comparables, il est nécessaire de définir exactement les phases à observer. L'utilisation de l'échelle BBCH dite étendue (Meier, 1997), basée sur le code céréalier (Zadoks et al, 1974), est un système pour un codage uniforme des stades de développement phénologique similaires de tous les mono- et dicotylédones. L'échelle BBCH a été développée en Allemagne, elle utilise des codes de 0 à 99 pour identifier les stades phénologiques, « 00 » correspondant au semis et « 99 » au produit après récolte (Meier, 2001). C'est une échelle générale qu'on peut aussi appliquer aux plantes pour lesquelles aucune échelle spéciale n'est disponible.

Pour la description des principaux stades de développement phénologique (plus durables) appelés principaux stades de croissance, des caractéristiques morphologiques externes claires et facilement reconnaissables sont utilisées. Ces principales étapes de développement sont décrites en utilisant des nombres de 0 à 9 dans l'ordre croissant (voir Tableau 2).

Tableau 2 : Principaux stades de développement selon l'échelle BBCH (Meier,2001).

Stade	Description
0	Germination/levée/développement des bourgeons.
1	Développement des feuilles.
2	Formation des pousses secondaires ou tallage.
3	Élongation de la tige/formation de la rosette/développement des pousses.
4	Développement des parties végétatives de récolte ou des organes de Multiplication végétative/développement des organes de reproduction sexuée, gonflement de l'épi ou de la panicule.
5	Apparition de l'inflorescence ou épiaison.
6	Floraison.
7	Développement des fruits.
8	Maturation des fruits ou graines.
9	Sénescence et mort ou début de la période de dormance.

Les stades phénologiques n'ont pas besoin de procéder dans l'ordre ascendant de la table mais peuvent se dérouler en parallèle par exemple le stade de floraison (BBCH = 6) peut se produire avant le développement des feuilles (BBCH= 1) comme dans certains arbres fruitiers, ou en raison des espèces végétales très différentes. Les stades de développement secondaires sont introduits pour définir les points de temps précis dans le développement de la plante. Contrairement aux principales phases de croissance, ils décrivent les stades de développement caractéristique et respectif d'une phase principale de développement des espèces végétales. Ils sont également codés avec les chiffres 0 à 9. Le 0 définit le début, 9 représente la fin du stade de croissance principal. Par exemple, un BBCH de 60 représente le début de la floraison et un BBCH de 69 la fin de la floraison. Un stade secondaire 3 pourrait représenter la 3^{ème} vraie feuille, la 3^{ème} talle, le 3^{ème} nœud, 30% de la longueur ou taille finale typique de l'espèce, ou 30% des fleurs ouvertes.

La combinaison des nombres du stade principal de développement et du stade secondaire se traduit par un chiffre à deux chiffres, soit de 00 à 99.

II.3.1. Dormance du bourgeon

Chez les espèces à feuilles caduques, la dormance, ou repos végétatif, est une forme d'adaptation et de résistance aux conditions hivernales rigoureuses des zones tempérées. A l'automne et en hiver, les bourgeons des végétaux ligneux tempérés sont en dormance. La dormance est l'état physiologique particulier présenté par les graines et divers organes végétaux (bourgeons, tubercules, bulbes) qui, en vie ralentie, sont affectés par une incapacité temporaire à se développer (Mazoyer, 2002). Certains auteurs considèrent que la dormance est caractérisé par l'incapacité du bourgeon à croître lorsque toutes les conditions de l'environnement sont favorables et lorsque toutes les inhibitions dues aux processus physiologiques internes de la plante sont supprimées (Chouard 1956 ; Champagnat 1983 ; Crabbé et Barnola 1994, cités dans Favre 1998).

Selon Samish (1954) dans Herter (1992), la dormance est l'état de l'organe dont la croissance est suspendue temporairement, même si les conditions météorologiques, comme la température, l'humidité, la lumière et la photopériode, sont favorables. Le végétal ralentit sa croissance et forme des écailles sur les bourgeons pour protéger le méristème du froid (paradormance). Puis pendant la période froide (jusqu'à fin décembre) le méristème n'a plus aucune croissance (endodormance).

Finalement (jusqu'au printemps), la hausse des températures prépare la croissance du méristème (écodormance). Naor et al (2003) ont déduit que la dormance n'est qu'un mécanisme de protection contre les températures hivernales extrêmes et prévient la reprise de croissance lors de redoux hivernaux.

La dormance est activée par la baisse des températures. Elle empêche que la croissance se fasse en hiver de façon à ce que les jeunes tissus fragiles du méristème ne gèlent pas (Andres et Ameglio, 2012). Champagnat (1983), a défini la dormance d'un bourgeon comme l'étape ultime d'une cascade d'inhibitions corrélatives dont la source est de plus en plus proche de lui. La dormance chez les arbres fruitiers s'étend en général de la chute des feuilles à l'automne jusqu'à l'apparition des premiers signes d'activité au printemps. Moore et al (2001) ont défini à leur tour la dormance comme étant l'état d'incapacité de croissance et particulièrement de débourrement, résultant d'une cause interne à l'organe considéré.

II.3.1.1. Phases de dormance :

Lang et al (1987), Hauagge et Cummins (1991), ont traduit la différence entre les bourgeons végétatifs et floraux par une distinction dans les phases de dormance. En effet, ils ont rapporté que les concepts de para-endo et eco-dormance sans doute sont trop simplistes et plus adaptés aux bourgeons végétatifs qu'aux floraux. Trois types de dormance peuvent être décrits selon les causes de l'arrêt de croissance et les besoins spécifiques pour le rompre (Horvath et al, 2003).

- **Endodormance** : Ce type de dormance est induite par une inhibition de croissance dont l'origine se situe au sein même du méristème, en l'absence de toutes inhibitions corrélatives et lorsque tous les facteurs externes sont favorables (dormance au sens strict). Ainsi, aucune croissance ne peut être induite même lorsque le bourgeon est isolé (absence de paradormance) ou lorsqu'il est placé dans des conditions environnementales favorables (absence d'écodormance). C'est une inhibition de la croissance contrôlée par des mécanismes qui résident à l'intérieur de la structure dormante. Elle est aussi l'entrée en dormance ou dormance maximale. L'état d'endodormance est caractérisé par une répression endogène de la croissance. Cet état est maintenu jusqu'à l'intervention de signaux spécifiques endogènes ou environnementaux. Pour la majorité des plantes, le meilleur signal est l'exposition à des températures comprises entre 0 et 7°C (Jiménez et al, 2010b). La période d'endodormance ne se termine pas d'un seul coup. Il y a un passage graduel de l'état d'endodormance à l'état d'écodormance (Couvillon et Erez, 1985).

Une fois l'endodormance complétée, les unités de froid supplémentaires accélèrent le retour à la croissance (Chuine et Cour, 1999). En effet, plus l'accumulation en unités de froid est grande, moins les besoins en unités thermiques sont importants pour sortir de l'écodormance. Les unités thermiques sont souvent calculées en degrés-jours, qui permettent d'estimer le développement des plantes en fonction de la température. Pour une accumulation d'unités de froid nettement supérieure aux besoins, la demande en unités thermiques tend vers un seuil minimum (Chuine et Cour, 1999). Le nombre d'unités de froid pour lever l'endodormance est relatif à chaque espèce.

Si les conditions de levée d'endodormance ne sont pas remplies, certains composés chimiques peuvent être utilisés par les cultivateurs afin de forcer la levée de dormance, tels le dinitro-ortho-crésol, le nitrate de potassium, le thiocarbamide, le benzyladénine, les

gibbérélines et le thidiazuron (Wang et Faust, 1994).

L'endormance peut être considérée comme un mécanisme de protection inhibant la reprise de croissance des bourgeons avant que la saison défavorable ne soit terminée. C'est pourquoi, elle n'est levée qu'après exposition à des températures froides (Weinberger, 1950), par exemple 3 à 4 semaines à 5°C (Vegis, 1973). Ces températures peuvent même être négatives (-5 à -10°C) (Hasegawa et Tsuboi, 1960). Il a également été montré qu'une application de phytohormones permet également de lever l'endormance, c'est une méthode couramment utilisée dans les régions à hiver doux (Wareing et Phillips, 1978). De nombreuses hypothèses sur les mécanismes d'établissement et de levée de l'endormance ont été émises. Certains auteurs ont évoqué l'interaction entre effets inhibiteurs et promoteurs de croissance (Saure, 1985), expliquant le fait qu'une application de phytohormones stimulatrices de croissance (cytokinines, gibbérélines, auxines) permet de lever cette endormance (Crabbé, 1994).

D'autres études ont évoqué une compétition trophique entre le bourgeon et les tissus sous-jacents (Champagnat, 1989). Un effet hydrique a également été évoqué, les bourgeons dormants ne contenant que très peu d'eau libre (Faust et al, 1991) et la continuité hydraulique entre tissus sous-jacents et bourgeons étant interrompue. Mais cette relation semble plus en rapport avec la résistance au gel qu'avec la suspension de capacité de croissance (Erez et al, 1998 ; Parmentier et al, 1998).

- **Paradormance** : Ce type de dormance décrit une dormance induite par des facteurs internes à la plante, mais externes à l'organe affecté, telles que les inhibitions corrélatives, exercées à plus ou moins longue distance du méristème considéré, par d'autres organes de la plante. La dominance apicale, où le bourgeon situé au sommet de la pousse empêche le développement des bourgeons axillaires mis en place lors de la croissance de la tige, est un exemple de paradormance (Horvath et al, 2003).
- **Écodormance** : Ce type de dormance est induite par des facteurs environnementaux défavorables tels que les déficiences en nutriments, les stress hydriques, les niveaux limitant en CO₂ et O₂, les conditions extrêmes de température ou de lumière. Le méristème reprend son activité lorsque les conditions environnementales redeviennent favorables. Une fois les besoins en froid comblés, les bourgeons entrent en écodormance. Ces derniers resteront en écodormance jusqu'à ce que la température ambiante permette la croissance (Buban et Faust, 1995). La figure 6 représente les différentes étapes de dormance avec leurs conditions

d'induction, élaborée par Legave (2011).



Figure 6 : Différentes phases de dormance élaborée par Legave (2011),

II.3.1.2. Facteurs influençant la dormance

De tous les facteurs du milieu susceptibles de jouer un rôle dans le déroulement de la dormance des bourgeons des végétaux ligneux, c'est certainement la température qui a fait l'objet de plus grand nombre de travaux. En particulier, l'effet bénéfique du froid sur la levée de dormance a été reconnu depuis longtemps. Nombreux sont les exemples mettant en évidence des anomalies de comportement lors du départ printanier de la végétation après des hivers doux (Raynaud, 1955; Lichou et Fourni, 1981 ; Lichou et Tier, 1981 ; Winberger, 1950, 1954, 1956, 1967a et 1967b).

Dans ces conditions, le débourrement est généralement retardé, hétérogène, échelonné dans le temps. Bidapé (1967) et Pouget (1972), ont fait apparaître respectivement chez le pommier et chez la vigne que ce sont les basses températures de l'automne qui éliminent la dormance des bourgeons. De son côté, Huglin (1958), a mis en évidence, au niveau de plant de vigne entier placés sous serre, les conséquences d'un déficit de froid sur les modalités du débourrement et de la ramification. Les facteurs climatiques induisent des transformations morphologiques et physiologiques qui, selon leur nature, favorisent l'instauration, le prolongement ou la levée de dormance des organes concernés. Chez les rosacées fruitières, le froid constitue un facteur indispensable à la levée de dormance. Dans les régions à hivers doux, son insuffisance limite les performances du pommier et conduit à l'apparition d'une dormance prolongée.

Un manque en froid provoque un désordre physiologique de la croissance végétative et de la fructification. Cette insuffisance se manifeste par un affaiblissement général de l'arbre, un retard de débourrement, un étalement de la floraison, un faible rendement et un fruit de médiocre qualité.

L'intensité de ces troubles est d'autant plus grande que le manque en froid est important et que la variété est sensible à ce facteur (Mahhou et El Phil, 2001). Selon Petri (1989), les effets du manque en froid sur pommiers peuvent être résumés comme suit : taux de débourrement faible, retard de débourrement des bourgeons latéraux, débourrement anticipé des bourgeons terminaux, inhibition du débourrement des bourgeons latéraux (effet de dominance apical), défaut de couverture foliaire, forte consommation de réserve au début de la croissance, développement terminal vigoureux et long (nécessité d'une taille plus sévère), formation d'un nombre peu élevé de lambourdes, retard de l'initiation de la fructification, fruits petits, rendement faible, développement végétatif exubérant et branches vigoureuses demandant une quantité de froid élevée.

L'intensité de la dormance dépend de corrélations multiples qui s'exercent tout au long de la période de végétation. Dès juin, des ablations de feuilles, des pincements ou des tailles de rameaux ont des effets spectaculaires sur la profondeur de l'inertie des bourgeons restants, mesurée à divers moments de l'hiver, celle-ci peut être fortement augmentée ou diminuée (Champagnat, 1983). Herter (1992), note que la fraîcheur nocturne du début de l'automne est sans doute un des facteurs les plus importants d'entrée en dormance. Un des facteurs externes qui contribue le plus à l'arrêt de croissance est la sécheresse. Dreyer et Mauget (1986) dans Herter (1992), ont trouvé qu'en cas de contrainte hydrique tard en saison de végétation (septembre), il y a un retard de l'entrée en dormance des bourgeons, avec des répercussions sur le niveau de dormance atteint.

II.3.2. Débourrement

Les auteurs considèrent généralement qu'un bourgeon est débouuré lorsqu'il est ouvert et qu'il laisse entrevoir les jeunes feuilles ou aiguilles. Cependant, les définitions utilisées pour caractériser le débourrement varient.

Ce phénomène étant essentiellement déterminé par la température, on considère souvent qu'un certain cumul thermique est nécessaire pour qu'il se réalise. Ce cumul est généralement calculé en additionnant, à partir d'une date initiale, les températures journalières supérieures à un seuil thermique déterminé (Comps et al. 1987). Le débourrement est la première manifestation visible de la reprise de la croissance. Une à trois semaines avant le débourrement, l'activité mitotique reprend d'abord au niveau des ébauches foliaires basales, puis vers l'anneau initial (Carolus, 1970). D'après Gautier (1987), il constitue la première manifestation externe de l'activité de l'arbre. Du point de vue cinétique, le débourrement débute par le gonflement des bourgeons, l'augmentation du taux de matière sèche et l'écartement des écailles et il se produit en fin d'hiver (Benttayeb, 1993). Chez la vigne, à la sortie de l'hiver, les bourgeons retrouvent leur aptitude à croître. La dormance disparaît progressivement et les bourgeons entrent dans une phase de post-dormance précédant le débourrement. Le facteur externe majeur qui intervient dans la levée de dormance est la température. Il commence dès que la température de l'air avoisine 10°C tel qu'il est cité par Chauvet et Reynier (1979), Bouard et Pouget (1971) et Vidaud (1993).

Un gonflement du bourgeon latent apparaît avant que les premières écaille s'écartent, la bourre ou coton est rejetée, une pointe vert et les premières feuilles apparaissent. On peut noter que la date de débourrement est fonction des cépages, de la température, de la latitude mais également de la vigueur du sarment et du système de taille utilisé (Huglin et Schneider, 1998 ; Galet, 2000). Un besoin en froid est nécessaire pour lever la dormance et le débourrement, il dépend des espèces, des provenances et des variétés. Un végétal qui a de faibles besoins en froid verra sa dormance levée rapidement et pourra avoir une reprise de végétation précoce (Neilsen, 2013). Une période hivernale insuffisante entraîne trois conséquences majeures reliées au débourrement : un débourrement retardé, un taux de débourrement faible et/ou un manque d'uniformité dans la floraison et la feuillaison (Campoy et al, 2011).

La précocité de débourrement, qui constitue un des aspects du rythme végétatif des espèces et variétés de vigne, peut être caractérisée avec précision grâce à la vitesse de débourrement des bourgeons, observée dans des conditions contrôlées après levée artificielle de la dormance. La vitesse de débourrement varie selon une loi de nature exponentielle en fonction de la température, mais seulement dans l'intervalle de 15-25°C (Pouget, 1964 et

1966). Au-dessus de 25°C, la vitesse croît beaucoup plus lentement et paraît même atteindre un palier au voisinage de 30°C. Au-dessous de 15°C, elle décroît d'autant plus rapidement que la variété est plus tardive. Il semble donc qu'il existe, entre 10°C et 15°C une discontinuité dans la variation de la vitesse de débourrement. De plus, les processus physiologiques qui déterminent la croissance interne et le débourrement sont d'autant plus fortement freinés par l'abaissement de la température, au-dessous de 15°C, que la variété est plus tardive. La loi exponentielle ne pouvant pas traduire une telle discontinuité, une autre loi de la variation de la vitesse de débourrement en fonction de la température a été recherchée. C'est l'étude de cette nouvelle loi qui a été abordée en premier lieu.

Il est admis qu'un bourgeon est d'autant plus dormant que la gamme des températures auxquelles il croît est plus restreinte. Aux mois d'octobre, de novembre et de décembre, seules les températures de 22°C à 30°C permettent une croissance dont la première manifestation décelable est le gonflement du bourgeon suivi de son débourrement. A la fin de l'hiver, aux mois de février et de mars, le débourrement est possible à des températures plus basses, 8°C, 12 °C ou 15 °C selon les espèces. En d'autres termes, l'éventail des températures compatibles avec la croissance s'est ouvert au cours de la levée de dormance. La notion d'éventail de températures en relation avec la croissance, due à Vegis (1964), appliquée aux végétaux ligneux, s'est révélée remarquablement fructueuse. Elle a permis de montrer que l'intensité de la dormance des bourgeons des végétaux ligneux dans des climats tempérés dépend de leur position sur l'axe (Crabbé, 1968 ; Barnola, 1970). Le bourgeon apical est le plus dormant.

Afin de modéliser le débourrement des bourgeons, il faut tenir compte de plusieurs variables, soit l'accumulation d'unités de froid durant l'automne et l'hiver, l'accumulation d'unités thermiques durant le printemps, l'interrelation entre ces deux périodes, les températures automnales et la photopériode. Afin de prédire le débourrement, certains modèles débutent le calcul des unités thermiques lorsque l'endodormance est levée. La date choisie au Québec (Canada) est le 1^{er} mars. Selon la littérature, l'accumulation d'unités thermiques antérieures à cette date ne contribue pas au débourrement (Lease et al, 2009).

Compte tenu du réchauffement climatique, une accumulation d'unités thermiques avant le 1^{er} mars serait à considérer. Le degré-jour est généralement l'unité utilisée pour calculer les unités thermiques. Ils représentent la sommation des températures au-dessus du seuil de développement pour chaque journée. L'intégration d'un modèle de cumul d'unités de froid au

modèle de cumul thermique permettrait de lancer le modèle de cumul thermique à la date où l'endormance serait levée. Selon Campoy et al (2011), quand la plante a atteint ses besoins en froid, l'endormance est levée et les bourgeons peuvent reprendre leur croissance lorsque les conditions sont favorables, c'est à dire sous certaines conditions de températures (plutôt élevées), d'humidité du sol et de nutriment, et pour les espèces photosensibles, certaines conditions de photopériode (Körner et Basler, 2010 ; Polgar et Primack, 2011). Ces conditions favorables doivent durer pendant un certain temps pour que l'éclatement des bourgeons apparaisse (Polgar et Primack, 2011 ; Malagi et al, 2015).

Les modèles phénologiques prédisant l'occurrence des différentes phénophases en fonction des conditions environnementales (principalement température et photopériode), prévoient que l'augmentation globale de température pendant l'hiver va ralentir voire compromettre la levée de l'endormance par manque de jours de froid (Chuine et al, 2016). Cependant, certains auteurs pensent que ce manque de froid hivernal pourrait être partiellement remplacé par une photopériode longue (Körner et Basler, 2010 ; Caffarra et al, 2013). Néanmoins, cette compensation par la photopériode ne peut avoir lieu que chez les espèces photosensibles (Laube et al, 2014). Cette sensibilité des phénophases aux variations de température annuelles en fait un bon indicateur des impacts biologiques des changements climatiques sur le long terme et sur les écosystèmes terrestres (Richardson et al, 2013). Plusieurs études ont montrées que les phénophases les plus sensibles aux variations de températures sont celles se déroulant au printemps ou en été et qu'il existe une relation approximativement linéaire entre l'occurrence de ces phénophases et la température (Gordo et Sanz, 2005 ; Beaubien et Hamann, 2011 ; Spark et al, 2000 ; Fitter et Fitter, 2002 ; Morin et al, 2010). Ainsi, durant les dernières décades, de nombreuses espèces ont vu leurs dates de débourrement devenir de plus en plus précoces avec l'augmentation des températures.

II.3.3. Floraison

Chez les plantes, le moment de la floraison est régulé par des mécanismes qui agissent pour assurer l'émergence des fleurs dans des conditions appropriées. Dans les climats tempérés, le processus de floraison est adapté aux causes à travers les signaux environnementaux, en particulier la photopériode et la température. Ces indices pour l'induction des fleurs peuvent également être impliqués dans les temps de signalisation de la

dormance à la plante.

La formation des fleurs chez les espèces fruitières passe par trois phases essentielles : l'induction florale, l'initiation des primordiaux floraux et enfin la différenciation des ébauches florales. Chacune de ces phases est contrôlée par des processus internes et externes spécifiques.

L'induction florale est la réalisation, au niveau de l'apex d'un bourgeon indifférencié, d'un état biochimique favorable à son évolution ultérieure en bourgeon à fleur. Le fonctionnement de ce processus est soumis à deux conditions essentielles chez les arbres fruitiers : 1) arrêt de l'action anti-inductrice des gibbérellines endogènes et 2) concentration suffisante de cytokinines endogènes dans la sève du xylème pour empêcher l'entrée en dormance des bourgeons (Legave, 1975).

L'initiation florale se manifeste par des changements dans la taille et la forme du méristème apical, qui prend la forme d'un large dôme bas, caractérisant la transition d'un état végétatif vers un méristème reproducteur. Elle est contrôlée par plusieurs processus physiologiques, sa date varie en fonction de l'espèce et des conditions de culture. Le manque d'irrigation et la sévérité de la taille ont pour effet de retarder la période de différenciation florale. Cette transition se manifeste par une prolifération cellulaire touchant toutes les parties de l'apex, ce qui conduit à l'effacement de la zonation qui caractérisait l'état végétatif (Mehri Et Crabbé, 2002). Les ensembles de données phénologiques de floraison sont souvent composés de premières dates de floraison et couvrent une large gamme d'espèces avec différentes formes de vie. Les réponses de floraison sont généralement alternées par les changements climatiques qui sont difficiles à prédire (Penuelas et Filella, 2001; Memmott et al, 2007).

Les dates de floraison sont principalement des enregistrements des temps d'émergence des fleurs. Il y a cependant un besoin de définir ce qui constitue l'émergence des fleurs, en particulier lorsqu'il y a un grand nombre d'enregistreurs différents. Dans certains cas, les observateurs définissent clairement leur définition de la floraison, par exemple des «anthères visibles» (Fitter et al, 1995) ou «une fleur ouverte dans laquelle des étamines ou des stigmates peuvent être observés sans que l'observateur repousse les pétales». Une autre

approche consiste à utiliser une échelle universelle, telle que l'échelle BBCH.

Selon les exigences climatiques particulières des espèces et de l'endroit où ils sont cultivés, la hausse des températures peut ne pas avoir nécessairement un effet sur l'avancée de la phénologie (Luedeling, 2012).

La hausse des températures pendant la phase d'accumulation des besoins en froid peut retarder la phénologie (Luedeling et Gassner, 2012), alors qu'un réchauffement au cours des besoins en accumulation de chaleur avance presque certainement la phase de débourrement et de floraison. Une série d'observation commune de la floraison du pommier (variété *Golden Delicious*) dans trois sites différents (1976-2002) a confirmé l'existence d'un gradient de précocité croissante (F1 plus précoce de huit jours à Bergerac par rapport à Angers et de sept jours à Nîmes par rapport à Bergerac (des sites en France)). Parallèlement un réchauffement climatique marqué a été observé en France à la fin des années 80, en comparant les dates moyennes du F1 sur les périodes 1976-1988 et 1989-2002. L'avancée moyenne de la floraison peut être estimée de sept à huit jours dans les trois sites (figure 7). Les dates de floraison du pommier 'Golden Delicious' ont été retenues comme indicateur biologique de l'influence du réchauffement climatique (Legave et al. 2007).

La modélisation de la floraison suggère que cette avancée de la floraison recouvre un allongement moyen de la durée de la dormance (3-5 jours) compensée par une réduction plus importante de la durée de la croissance florale, de la levée de dormance à la floraison (10-13 jours en moyenne). Ces effets opposés du réchauffement résulteraient respectivement d'une moindre rapidité à satisfaire les besoins en froid et inversement d'une plus grande rapidité à satisfaire les besoins en chaleur. Depuis le début des années 2000, des cas plus fréquents de floraison excessivement étalée (à l'échelle de l'arbre ou entre arbres de variétés différentes) notamment pour l'abricotier et le cerisier en 2001, 2007 et 2008 dans le sud de la France (Tobergte, 2013). L'avancée généralisée de la phénologie accompagne les températures hivernales plus douces, pouvant entraîner des risques de gel au moment de la floraison pour les arbres fruitiers (Domergue et al, 2004). Le réchauffement climatique, actuel, serait donc susceptible d'accroître indirectement le gel printanier par une avancée de la floraison, sans que cela signifie qu'il existe une relation étroite entre précocité de floraison et risque de gel.

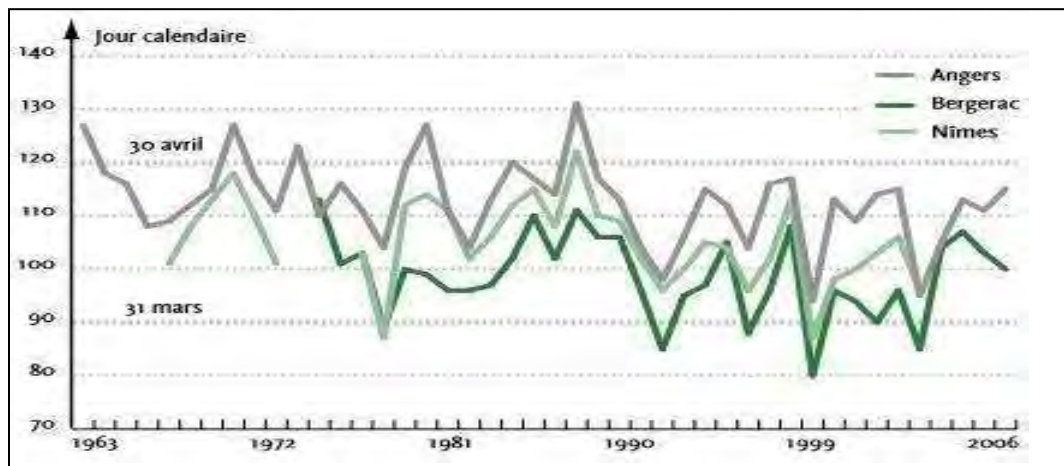


Figure 7 : Evolution de la date F1 (10 % de fleurs épanouies) du pommier Golden Delicious dans trois sites représentatifs de la production (Legave et al, 2007).

II.4. Effet du réchauffement climatique sur Les besoins en unités de froid et de chaleur pour le débourrement et la floraison des arbres fruitiers

II.4.1. Notion de chilling et de forcing

La température est définie comme étant le facteur exogène le plus important dans l'entrée et la levée de la dormance (Erez et al, 1998; Erez et al, 2000). Les arbres de la zone tempérée doivent satisfaire : 1) aux besoins en froid qui sont accumulés pendant une phase de conditions fraîches et 2) aux besoins en chaleur, qui sont satisfaits par une température élevée au cours de la période de dormance. Ces deux exigences doivent être remplies pour permettre le débourrement au printemps. Le temps et le taux d'accumulation de froid et de chaleur sont déterminants pour définir le calendrier des événements du printemps (Luedeling et al, 2009f).

En tant qu'espèces à feuilles caduques du climat tempéré, le pommier, le pêcher et l'abricotier sont caractérisés par un cycle comportant une période automno-hivernale dite de «dormance». Une certaine durée d'exposition à des températures fraîches, températures inférieures à des températures seuil de 7°C sont nécessaire pour satisfaire les besoins en froid des pêcher et par la suite la levée de dormance (tableau3), des températures inférieures ou supérieures à cet optimum étant moins efficaces (Balandier et Courduroux, 1992).

Dans les mêmes conditions climatiques cette durée est plus ou moins longue selon les variétés. Grâce à ce mécanisme et à la faible hydratation des tissus qui en découle, la jeune fleur reste protégée du gel pendant une longue période. A la suite de la levée de dormance, les ébauches florales entrent dans une période de croissance accélérée.

Tableau 3. : Besoin en unités de froid de quelques espèces fruitières (Childers, 1978).

Espèces	Heures de froid $T^{\circ} < 7^{\circ}\text{C}$ nécessaires pour lever la dormance
Pommier	1200 – 1500
Poirier	1200 – 1500
Cerisier	1100 – 1300
Noyer	1200 – 1500
Pêcher	600 – 1200
Abricotier	700 – 1000
Amandier	200 – 500
Figuier	200
Prunier	700 – 1200

L'endodormance est levée via l'action des températures froides, dites températures de chilling (Howe et al, 1999). Le rôle des températures froides dans la phénologie du débourrement a été bien démontré, en particulier pour les arbres fruitiers (Ruiz et al, 2007 ; Luedeling, 2012 ; Darbyshire et al, 2013). Il est tout de même admis que les températures froides efficaces sont généralement inférieures à 10°C , avec une gamme optimale entre 2 et 7°C pour la plupart des espèces (Coville, 1920 ; Doorenbos, 1953 ; Nienstaedt, 1966 ; Cannell, 1989).

Une fois que les besoins en froid ont été satisfaits, les températures chaudes, dites températures de forcing, permettent généralement l'initiation de la croissance primaire pendant l'écodormance jusqu'au débourrement (Sakai et Larcher, 1987 ; Bigras et al, 2001). Cependant, la relation entre les périodes de forcing et de chilling est encore sujette à controverse. Les températures froides pourraient être actives dès le début de l'endodormance jusqu'au début de la quiescence (écodormance) ou jusqu'au débourrement, et les

températures chaudes pourraient être actives dès le début de l'endodormance ou à partir de la quiescence, jusqu'au débourrement (Chuine et al, 2000). Ceci n'étant pas clairement déterminé, il n'y a pas encore de consensus sur la succession ou la superposition des phases d'endodormance et d'écodormance. Dans l'hypothèse où les phases de chilling et de forcing se superposeraient, il est généralement établi que la quantité de températures chaudes nécessaires au débourrement décroît à mesure que la durée et la quantité de températures froides augmente (Cannell et Smith, 1983 ; Murray et al, 1989 ; Hänninen et al, 1993 ; Cannell, 1997). Chez certaines espèces d'arbres tempérés, la date de débourrement peut aussi être contrôlée par la photopériode en interaction avec les besoins en températures chaudes (Laube et al, 2013 ; Vitasse et Basler, 2013).

Les besoins en température sont sous contrôle génétique (Rousi et Pusenius, 2005 ; Sanz-Perez et al, 2009). Ceci concerne essentiellement deux processus : le premier contrôle agit sur la durée de la période de froid et la quantité de froid requise pour lever l'endodormance (Bennett, 1949 ; Nooden and Weber, 1978 ; Perry et Wu 1960 ; Samish, 1954 ; Sherman et al, 1977), et le deuxième agit sur la sensibilité aux températures chaudes, comme il a été démontré dans des plantations de châtaigniers (Mauget et Germain, 1980 ; Charrier et al, 2011). Un grand nombre de gènes sont potentiellement impliqués dans le contrôle de la phénologie du débourrement (Lang, 1994 ; Derory et al, 2006). La forte héritabilité du débourrement, reportée à la fois pour les espèces d'arbres caducifoliés (Howe et al, 2000 ; Baliuckas et al, 2005 ; Alberto et al, 2011) et persistantes (Billington et Pelham 1991), confirme ce fort déterminisme génétique.

Les hormones sont impliquées dans la régulation de la dormance (Anderson et al, 2001 ; Araki, 2001 ; Horvath et al, 2003). Les deux principales hormones impliquées sont les gibbérellines et l'acide abscissique (ABA). La concentration en ABA dans le bourgeon suit un cycle saisonnier avec un maximum durant la phase d'endodormance et un déclin progressif jusqu'à la fin de l'écodormance (Ofir et Kigel, 1998 ; Naor et al. 2008), cette hormone semble plutôt ralentir la levée de dormance. Burg (1968) a aussi démontré un rôle de l'éthylène dans l'inhibition de la croissance des bourgeons. Les gibbérellines semblent avoir un rôle opposé (Anderson et al, 2001), pouvant stimuler fortement la croissance des bourgeons (Falusi et Calamassi, 2003).

II.4.2. Impacts du réchauffement climatique sur les besoins en froid et en chaleur

Luedeling (2012), a rapporté que la hausse des températures peut ne pas avoir nécessairement un effet sur l'avancée de la phénologie, selon les exigences climatiques particulières des espèces et de l'endroit où ils sont cultivés. Cependant, la hausse des températures pendant la phase d'accumulation des besoins en froid peut retarder la phénologie alors qu'un réchauffement au cours des besoins en accumulation de chaleur avance presque certainement la phase de débourrement et de floraison (Luedeling et Gassner, 2012). Plusieurs auteurs ont montré une avancée de la date du débourrement végétatif et de la floraison avec l'augmentation de la température chez différentes espèces fruitières. Ceci peut être expliqué par un raccourcissement de la durée de la croissance florale vu la rapidité de la satisfaction des besoins physiologiques en chaleur une fois que la dormance est levée (Legave et al, 2007).

L'effet des fortes températures survenant exceptionnellement pendant l'hiver a été évalué. On note une tendance à l'augmentation de la durée de la dormance résultant d'une satisfaction de plus en plus tardive des besoins en froid (Hilaire et al, 2002; Legave, 2009; Seguin, 2010). D'après Ghrab et al, (2014), différentes anomalies causées par ce phénomène ont été signalées chez le pêcher telles qu'un retard de 6 à 17 jours de la date de débourrement, une extension de la durée de floraison de 4 à 10 jours par rapport aux années précédentes avec des conditions climatiques normales, une faible croissance végétative et une très grande hétérogénéité des calibres des fruits avec un nombre assez élevé de fruits déformés. Legave, (2009), a également noté des levées de dormance anormalement échelonnées entre les bourgeons au sein d'un même arbre, conduisant par exemple à un allongement de la durée de floraison sur le cerisier dans le sud-est de la France suite à l'augmentation des températures pendant l'automne et l'hiver. En conséquence, une levée de dormance incomplète affecte le comportement des arbres en réduisant le taux de débourrement.

II.5. Conséquences agronomiques des changements climatiques

II.5.1. Sur la production végétale

Selon Seguin (2003), dans le contexte des changements climatiques, les impacts peuvent s'évaluer en s'appuyant sur l'ensemble des connaissances disponibles dans le domaine de l'écophysiologie, intégrées au sein des modèles de fonctionnement des couverts végétaux qui traduisent l'effet du climat sur les fonctions élémentaires. Ainsi, il est nécessaire d'y adjoindre l'effet additionnel de l'augmentation du CO₂ atmosphérique, qui a fait l'objet, durant les vingt dernières années, d'un ensemble de travaux. Ces travaux permettent de prévoir les grandes lignes suivantes :

- une stimulation de la photosynthèse de l'ordre de 20 à 30%, conduisant à une augmentation résultante de l'assimilation nette de l'ordre de 10 à 20%, prenant en compte l'augmentation de la respiration liée à l'effet de l'augmentation de la température. Il devrait également s'en suivre une baisse de la transpiration des plantes et, en conséquence, un accroissement de la biomasse produite et des rendements potentiels pour les plantes d'intérêt agricole. Cette réponse positive de la photosynthèse à un enrichissement en carbone de l'atmosphère dépend toutefois de différents facteurs : Le type de métabolisme carboné, la température et la disponibilité en eau interfèrent ainsi avec l'accroissement de la photosynthèse consécutif à une augmentation de la teneur en carbone ;
- à l'inverse, un raccourcissement du cycle, de par cette même action du facteur thermique, pendant lequel le couvert végétal peut absorber l'énergie lumineuse par la photosynthèse ;
- enfin, une amélioration de l'efficacité de l'eau par suite de la diminution de la conductance stomatique sous l'effet de l'augmentation du CO₂.

II.5.2. Sur les rendements

Les conséquences varient beaucoup en fonction du type de couvert et des conditions climatiques associées aux conditions culturales pour les plantes cultivées. Mais la tendance générale est claire : Si les régions tempérées peuvent s'attendre à des effets tantôt positifs, tantôt négatifs sur le rendement, le changement climatique aura quasi-systématiquement des effets négatifs dans les zones tropicales. C'est effectivement ce qui ressort du grand nombre d'études consacrées ces vingt dernières années à la prédiction de l'impact du réchauffement climatique sur l'agriculture à l'échelle mondiale. Selon le 4^e rapport de 2007, les rendements agricoles devraient augmenter légèrement dans les régions de moyenne et haute latitude pour

des augmentations moyennes locales de température allant de 1°C à 3°C selon la culture considérée, et devraient diminuer au-delà dans certaines régions. Aux latitudes plus basses, particulièrement dans les régions ayant des saisons sèches et dans les régions tropicales, les projections montrent des rendements agricoles décroissants, même pour de faibles augmentations locales de température (1°C à 2°C) (Seguin, 2010).

D'après Erez et al (2000), le développement végétatif excessif qui peut se manifester simultanément à la floraison, entraînent une compétition entre les bourgeons végétatifs et les organes reproducteurs. Les effets sur le rendement des espèces cultivées, risquent d'être plus contrastés. Un problème majeur dans la culture sous serre des espèces de fruits à noyau est le développement végétatif excessif (Améglio et al, 1992). La stimulation de la photosynthèse par l'accroissement du CO₂ atmosphérique, l'allongement de la saison de croissance et les températures plus favorables vont donner dans un premier temps, des conditions de croissance plus favorables pour les forêts tempérées, à l'inverse des forêts tropicales. Par contre, pour des valeurs de réchauffement plus élevées (de l'ordre de 2°C à 3°C), le mouvement va s'inverser et la productivité des forêts tempérées diminuera, alors que celle des milieux tropicaux sera fortement réduite par l'effet combiné des fortes températures et de la sécheresse accentuée (Loustau et al. 2004).

II.5.3. Sur le fruit

Les arbres fruitiers se caractérisent par un cycle de croissance et de développement relativement complexe et long (>1 an), des pousses végétatives d'une année n aux fruits de l'année n+1. Durant ce cycle, la régularité et la qualité de la fructification s'élaborent à la suite de multiples phases et processus au cours desquels l'action de la température, notamment, est quasiment permanente sous diverses formes (effets cumulés, effets de seuil, effets de rythme). Face au réchauffement, de multiples impacts sont donc possibles, de la croissance végétative à la maturité des fruits. Ainsi comparée à d'autres productions (cultures annuelles), l'arboriculture fruitière est particulièrement exposée à des impacts climatiques défavorables du fait de conséquences pluriannuelles (alternance de production après gel) et cumulatives (impacts répétés sur l'architecture de l'arbre (Legave, 2009). La durée de croissance du fruit a fait l'objet de premières reconstitutions chronologiques, qui ont notamment montré des tendances vers des durées plus courtes en régions Méditerranéennes.

L'illustration présentée pour le pommier 'Golden Delicious' à Nîmes suggère une évolution progressive et limitée. L'illustration présentée pour une variété à maturité plus précoce (pêcher précoce) montre une tendance plus marquée vers une durée plus courte de la croissance du fruit, pouvant s'expliquer par une période de croissance plus brève coïncidant principalement avec une période de l'année ayant été particulièrement soumise au réchauffement (notamment +1.9°C en mai à Nîmes depuis la fin des années 80).

Nava et al, (2009) ont montré que les fortes températures avant et après l'anthèse induisaient chez le pêcher variété 'Granada' cultivée sous serre, une accélération de la floraison dans un premier lieu, un décalage de la croissance des gamétophytes femelles et des anomalies dans la formation des gamétophytes mâles dans un second lieu. Une élévation de températures provoque également une faible viabilité des grains de pollen et une faible production de sac embryonnaires. Associé à la désynchronisation de la maturité des gamétophytes mâle et femelle, le taux de fécondation, de nouaison et le rendement en fruits est réduit. La haute température influe aussi sur la germination du pollen chez le pêcher (Weinbaum et al, 1984).

Chez les Prunus, des températures supérieures à 25°C sont considérées comme températures-seuil pour la survenue des problèmes de nouaison (Erez et al, 2000). Le seuil des températures et la durée d'exposition à l'élévation de température restent mal connus. Toutefois, une élévation de courte durée intervenant au début de la floraison, suivi par des températures fraîches, ne semble pas nuire à la récolte autant qu'une élévation de température appliquée pendant toute la période de floraison (Niezderholzer, 2014).

Sur le plan de la qualité du fruit, des modifications de son rythme de croissance pourraient également avoir des conséquences sur des aspects majeurs de la qualité. Par exemple, des travaux chez le pêcher suggèrent qu'une croissance trop rapide sous l'effet du réchauffement ne permettrait pas une mobilisation suffisante des éléments nutritifs, et pourrait conduire à des calibres réduits (Lopez et Dejong, 2007).

II.5.4. Autres impacts sur l'arbre et sur son environnement biotique

Pour les arbres fruitiers et la vigne, l'avancée généralisée de la phénologie peut poser des problèmes de risque de gel au moment de la floraison, et de qualité par avancée des stades sensibles (Domergue et *al*, 2004). Legave (2009), a rapporté que les avancées de floraison sont susceptibles d'accroître le risque de gel printanier, mais le risque climatique (fréquence des températures négatives) a diminué dans le contexte du réchauffement climatique (selon Météo France). En régions méridionales moins gélives et présentant des avancées de floraison plus réduites, ce risque resterait faible et pourrait même diminuer avec l'augmentation du réchauffement (levée de dormance encore plus tardive et fréquence du gel encore plus faible). Toutefois, ce risque demeure toujours possible dans ces régions avec des conséquences graves (gel de mars 2008 dans le Gard (France), ayant contribué à une faible production d'abricots).

En outre, l'accentuation de la sécheresse estivale en zone méditerranéenne, conduirait aux mêmes effets négatifs, renforcés par l'augmentation des risques d'incendie. Outre l'aggravation du risque météorologique dans les régions affectées traditionnellement, il faut s'attendre à une extension géographique vers des régions qui ne sont ni préparées, ni habituées (Rigolot, 2008). Legave (2009), a rapporté que les sécheresses des années 90 et plus récemment de 2003 et 2005 en France ont eu des conséquences relativement limitées (perte de production estimée à moins de 15% à la suite de la sécheresse 2003), en raison d'une irrigation largement développée (sur 74% du verger français). Les risques d'asphyxie racinaire dans un contexte d'inondations croissantes (1999, 2002, 2003, 2006) restent également limités notamment grâce au progrès génétique en matière de porte-greffes tolérants (sélections INRA). Dans un futur de stress hydriques probablement plus fréquents, des conséquences défavorables sur la qualité et la régularité de production sont cependant à envisager, et viendraient aggraver la situation d'irrégularité de certaines espèces comme l'abricotier. Denhartigh (2014), a récapitulé dans la figure 8 les différents aspects de réchauffement climatique et leurs impacts sur les composantes des écosystèmes terrestres et aquatiques.

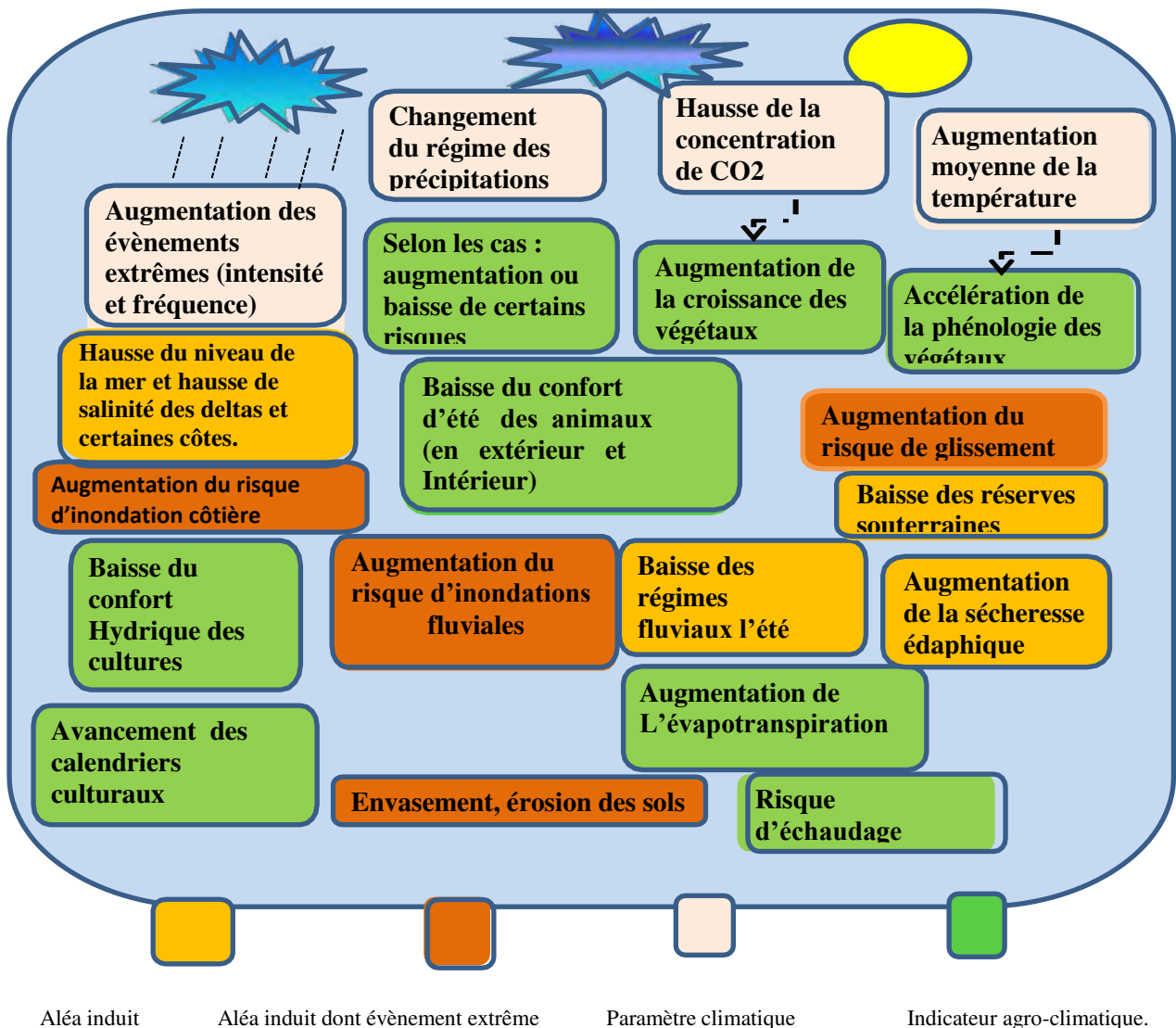


Figure 8 : Synthèse des effets attendus des changements climatiques sur les systèmes agricoles d'après Denhartigh, (2014).

II.6. Tendances récentes et projections futures de la phénologie

Selon Delécolle et al, (2010), le développement phénologique des cultures est avant tout lié à la température du végétal ou de l'air qui l'entoure. Une augmentation globale de la température se traduira par des vitesses de développement et des évolutions plus rapides que dans les conditions actuelles. Une synthèse de plusieurs travaux ayant entrepris l'effet de réchauffement climatique sur la phénologie des cultures a suggéré une tendance à une différenciation entre l'hémisphère nord et l'hémisphère sud. Ces travaux ont expliqué ces différences par l'avancement des dates de débourrement et de floraison de quelques plantes au cours du printemps. Ces résultats ont été accordés avec ceux de Yu et al (2010), qui ont

associé ces avancements beaucoup plus aux élévations des températures printanières qu'à celles de l'hiver. Ce résultat crucial était couplé avec une diversification des réponses phénologiques des plantes à l'égard de réchauffement climatique, ou Cook et al (2012), ont trouvé que 72-73% des espèces étudiées étaient catégorisées par des réponses à des chaleurs de printemps « spring-only temperatures responders ».

La tendance vers une floraison avancée a été reportée par plusieurs études focalisées sur les arbres fruitiers dans le nord de l'Amérique (Abu-asab et al, 2001), en Europe (Guédon et Legave, 2008, Gordo and Sanz, 2009 et 2010), Sud Afrique (Guédon et Legave, 2008). En plus, une certaine variabilité a été révélée dans ces réponses phénologiques attribuées à l'espèce et à la zone d'étude (Guédon et Legave, 2008). L'état d'avancement ou de retard des événements phénologiques du aux fortes chaleurs de printemps se trouve lié aussi au type de bourgeon analysé (Pope et al, 2013).

II.6.1. Cultures annuelles

Dans le cas de cultures annuelles à cycle déterminé, la durée séparant le semis de la récolte s'en trouvera donc diminuée, entraînant par le fait une diminution de la durée de croissance des organes récoltables. Suivant les cultures, on pourrait assister à des diminutions des longueurs de cycle. Pour ce qui est des céréales d'hiver, l'augmentation de la vitesse de développement pourrait être tempérée par une moindre satisfaction des besoins en froid (vernalisation) pendant l'hiver, car cette satisfaction se traduit par la réalisation d'une vitesse maximum de développement. Bien que les changements phénologiques soient souvent influencés par les pratiques culturales, en particulier la date de semis et le choix de la variété, le réchauffement climatique récent en Europe a influencé de manière significative l'avancée du calendrier cultural. Les stades spécifiques de la croissance (par exemple, la floraison, le remplissage des grains) sont particulièrement sensibles aux conditions climatiques et critiques pour le rendement final. La durée du cycle cultural (agrophénologie) détermine le succès productif de la culture. En général, un cycle cultural plus long est fortement corrélé avec des rendements plus élevés, car il permet une meilleure utilisation de l'énergie thermique disponible, du rayonnement solaire et des ressources en eau.

Les dates de semis ou de plantation de plusieurs cultures agricoles ont été avancées, par exemple de 5 jours pour les pommes de terre en Finlande (1965-1999), 10 jours pour le maïs et la betterave sucrière en Allemagne (1961-2000) et 20 jours pour le maïs en France (1974 - 2003) (EEA, 2012). Un allongement supplémentaire du cycle cultural ainsi qu'une évolution d'espèces vers le nord est projetée en raison de l'augmentation de la température à travers l'Europe. La date du dernier gel printanier devrait avancer d'environ 5 à 10 jours d'ici 2030 et de 10 à 15 jours d'ici 2050 dans la majeure partie de l'Europe (EEA, 2012). Selon Soussana (2015), une avancée de 3 à 4 semaines des semis de maïs sur les 30 dernières années a été observée sur 4 domaines expérimentaux de l'Inra. Parallèlement, des variétés à cycle plus long sont utilisées.

De même, les moissons du blé ont avancé de l'ordre de 20 jours en moyenne depuis les années 80, quel que soit la région considérée. Le raccourcissement du cycle concerne, en particulier, la période de remplissage des grains, ce qui peut provoquer des baisses de rendement, d'autant plus importantes en conditions de déficit hydrique (cas des années 2003, 2005 et 2006). Dans certaines parties de la région méditerranéenne, le passage de cultures d'été à des cultures d'hiver pourrait intervenir afin de compenser certains des impacts négatifs des vagues de chaleur et des sécheresses de l'été (Minguez et al, 2007).

Les changements des dates de floraison modélisées tiennent compte des effets, attendus de changements dans le choix des cultivars sur les dates de floraison et de maturité. Étant donné que de nombreuses plantes (y compris les céréales) en Europe nécessitent des jours longs pour fleurir, l'effet du réchauffement sur la date de la floraison est amoindri. La date de floraison du blé d'hiver devrait montrer les plus grands avancements dans les régions occidentales de l'Europe, mais avec une grande incertitude liée également à l'incertitude dans les projections sous-jacentes des changements climatiques. L'avancement de la date de maturité est supérieur à l'avancement de la date de floraison, entraînant un raccourcissement de la période de remplissage du grain, ce qui affectera négativement les rendements (EEA, 2012).

II.6.2. Cultures pérennes : arbres fruitiers et vigne

II.6.2.1. Arbres fruitiers

Des anomalies physiologiques de la phénologie des bourgeons causées par des satisfactions insuffisantes des besoins en froid (retards et étalements excessifs de la floraison) pourraient être observées. Les conséquences agronomiques attendues sont des désynchronisations de floraison entre des cultivars devant s'interpolliniser ou des étalements excessifs de la maturité des fruits à l'échelle de l'arbre ou des vergers. Des débourrements végétatifs excessifs pourraient également perturber fortement l'architecture des arbres et la conduite des vergers (De Cortazar-Atauri et al, 2013). Soussana, (2015) a constaté après une analyse de données acquises sur les 20 à 30 dernières années (rassemblées dans la base de données Phenoclim) : une avancée des dates de floraison, une floraison plus précoce des arbres fruitiers quels que soient les espèces et les sites (y compris des espèces à feuilles persistantes comme l'olivier).

Selon Seguin (2003), dans le cas des arbres fruitiers, l'application des scénarios de réchauffement climatique à la vallée du Rhône a permis de prévoir une avancée de la date de floraison finalement faible (de l'ordre de deux à trois jours) par rapport à ce qui est constaté actuellement dans le Sud de la vallée (région de Nîmes, France), mais plus marquée (une dizaine de jours) au nord (région de Valence, Espagne). L'évolution des dates de floraison des arbres fruitiers ont amené à se poser aussi la question sur la vigne, et à lancer des programmes de recherche dans ce domaine.

La constitution de séries de dates de stades phénologiques pour les principales espèces fruitières dans différents sites a révélé une tendance commune vers plus de précocité de la floraison durant un passé récent en Europe occidentale, notamment dans les différents bassins fruitiers français. Les modifications phénologiques vers plus de précocité se seraient produites sous forme de «rupture» et non de façon progressive du début des années 70 au début des années 2000 (Guédon et Legave, 2008). La période de rupture la plus probable se situerait en 1988-1989, c'est à dire à la fin des années 80 correspondant précisément au début d'une période de réchauffement. Les avancées de floraison observées peuvent donc être considérées comme un impact avéré (ainsi qu'un indicateur) du réchauffement global sur le caractère d'époque de floraison.

Dans le cas du pommier ‘Golden Delicious’, les avancées moyennes depuis la fin des années 80 peuvent être estimées à 10-12 jours dans une région septentrionale comme celle de la Rhénanie (Allemagne) et à seulement 6-7 jours sur le pourtour Méditerranéen (Languedoc, France). Par ailleurs, les simulations par modélisation de la date de fin de levée de dormance des bourgeons floraux ont révélé chez le pommier une tendance vers des levées de dormance plus tardives depuis la fin des années 80, notamment en Languedoc (+ 5-7 jours à Nîmes) mais aussi en Anjou (Canada) et en Aquitaine (France) (Legave et al, 2008). Par contre, cet impact aurait été quasiment inexistant dans des régions plus septentrionales (Rhénanie, Wallonie (Belgique)). Une telle différence régionale d’impact sur la levée de dormance apparaît cohérente avec le fait que le réchauffement en automne notamment en novembre et décembre (période essentielle pour la satisfaction des besoins en froid) a été sensiblement plus marqué en régions méridionales y induisant par conséquent des levées de dormance plus tardives (Legave, 2009).

Le facteur température est central et le plus mis en évidence dans les scénarios climatiques (Seguin, 2003). C’est d’ailleurs ce facteur qui est responsable des évolutions signalées ci-dessus, en lien avec le réchauffement avéré du climat sur la France métropolitaine au cours du siècle passé, de l’ordre de 0.9°C et plus particulièrement au cours de la dernière décennie, de l’ordre de 0.4°C à 0.6°C. Ces évolutions ont concerné pratiquement toutes les manifestations phénologiques des cultures pérennes, en particulier pour les dates de floraison (avancée de l’ordre de deux ou trois semaines en trente ans, aussi bien pour la vigne que pour les arbres fruitiers) (Moisselin et al, 2002).

II.6.2.2. Vigne

En dehors de l’observation d’une avancée systématique des dates de floraison des arbres fruitiers, l’illustration la plus nette se situe en viticulture, particulièrement sensible à ce réchauffement : on note dans l’ensemble des régions viticoles une avancée des dates de vendange et une augmentation de la teneur en sucre et du degré alcoolique conduisant généralement, pour les vingt dernières années, à des vins de haute qualité. Des avancements significatifs des dates de vendange pour la vigne (presque un mois dans la même région au cours des cinquante dernières années (Ganichot, 2002).

Les dates de vendange ont avancé de presque un mois en cinquante ans dans les Côtes-du-Rhône sans qu'a priori cela ne puisse s'expliquer, si non pour une faible part par des considérations de pratiques culturales. Cette avance généralisée du calendrier viticole se manifeste également dans l'ensemble des régions viticoles françaises, puisqu'elle est observée et documentée du Bordelais à l'Alsace et à la Champagne, en passant par la Bourgogne. Elle est également attestée en Californie et en Afrique du sud, et encore peu perceptible en Amérique du sud et en Australie (ce qui est d'ailleurs en bon accord avec la répartition spatiale des scénarios climatiques du futur, qui prévoient un réchauffement plus marqué dans l'hémisphère nord, où l'étendue couverte par les surfaces continentales est plus importante que dans l'hémisphère sud) (Ganichot, 2002).

L'augmentation des températures moyenne s'est traduite par des conditions globalement plus favorables avec moins de variabilité interannuelle pour tous les vignobles français, ainsi qu'une augmentation de la teneur en alcool (de 1 à 2 degrés suivant les régions) et une diminution de l'acidité. Depuis vingt ans, l'augmentation de la température moyenne combinée à des pratiques culturales particulières (faible rendement, réduction de la fertilisation, augmentation de la surface foliaire) a conduit à une avance de la date de maturité des raisins de 15 jours en moyenne. Cet ordre de grandeur de l'avancement de la phénologie dans le Bordelais est comparable à celui observé dans d'autres vignobles.

À ce sujet, il est nécessaire de faire référence aux importantes recherches qui ont permis de reconstruire le climat passé à partir des données phénologiques de la vigne et notamment la date de vendanges (De-Cortazar-Atauri et al, 2013). De même Poulin (2013), a rapporté qu'en trente ans, les vendanges ont été avancées de deux à trois semaines selon les régions. La floraison est également plus précoce pour la vigne, mais l'avancées'accentue au cours du cycle pour atteindre 2 semaines à la maturité (jusqu'à 3 semaines en 2003).

Soussana (2015), a rapporté que des études montrent qu'il sera difficile d'échapper aux températures élevées pendant la maturation ce dont il sera nécessaire de tenir compte pour l'élaboration du produit final. Le changement de cépage ou le recours à l'irrigation pour abaisser les températures au niveau des grappes pourraient être des solutions à envisager. Les conditions plus chaudes pendant la maturation du raisin, conduisent à une augmentation régulière du degré alcoolique et à une modification potentielle de qualité à la vendange à cause, entre autres, d'un déséquilibre entre alcool et acides. Des écarts notables de typicité peuvent aussi se superposer pour des conditions extrêmes.

II.7. Modélisation et prédiction des stades phénologiques

D'après Lepage et Bourgeois (2012), bâtir un modèle, nécessite l'observation préalable des stades de développement pendant plusieurs années dans des régions présentant des particularités différentes et d'avoir accès aux paramètres météorologiques de chaque région étudiée. Une fois le modèle élaboré, il suffit d'y intégrer les données météorologiques provenant de l'emplacement d'une culture afin d'obtenir la prédiction des stades phénologiques pour cette culture. Pour certaines cultures, la prédiction d'un certain stade phénologique est primordiale pour une récolte optimale et pour répondre aux besoins du marché pendant la saison de croissance. Une meilleure gestion de l'eau peut être réalisée en ajustant les périodes d'irrigation selon le stade de développement ou en évaluant le drainage en période critique.

Pour mieux comprendre les mécanismes de contrôle physiologiques des bourgeons durant la dormance, diverses méthodes ont été établies, afin de développer des modèles phénologiques permettant de prédire la date de débourrement et de floraison des arbres et explorer les variations entre les espèces et les régions (Fu et al, 2012). Ces modèles constituent un outil important dans l'étude des changements climatiques et leurs effets sur la phénologie (Zhao et al, 2013). Pour Dennis (2003) et Ricard (2014), la modélisation de débourrement des bourgeons, doit tenir compte de l'accumulation de températures froides durant l'automne et l'hiver, l'accumulation d'unités thermiques durant le printemps, l'interrelation entre ces deux périodes, les conditions automnales ainsi que la photopériode. En général, les modèles phénologiques sont basés sur trois points clés à savoir ; la méthode d'approche, le concept du modèle et les paramètres du contrôle (température, précipitation, photopériodisme, facteurs intrinsèques liés à la plante (voir la figure 9) (Cook et al, 2010).

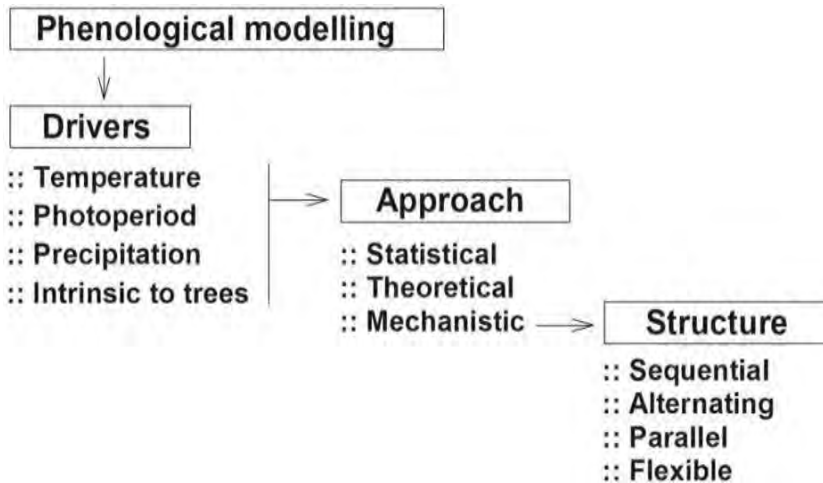


Figure 9 : Trois catégories des modèles phénologiques et leurs subdivisions selon Cook et al, (2010).

Ces modèles révèlent le développement des plantes en fonction d'un ou de plusieurs facteurs environnementaux ou d'autres facteurs intrinsèques de la plante. La température est considérée comme le principal facteur déterminant le développement des plantes (Müller and Braun, 2008), tandis que le photopériodisme et la lumière sont moins étudiés mais essentiels pour la modélisation (Hanninen, 1995; White and Nemani, 2003; Fu et al, 2012 ; Cardoso, 2011). Ces facteurs environnementaux sont toujours étudiés séparément et utilisés de la même manière pour paramétrer les modèles, en générant des modèles peu complexes et robustes (Müller and Braun, 2008). Pour la plupart, les modèles sont conçues pour une espèce ou plusieurs espèces appartenant au même biome (Cleland et al, 2007). La majorité des modèles considèrent que les espèces de climat tempéré ont besoin d'une période de froid suivi par une période de chaleur pour initier un développement normal. Les taux de développement des arbres sont communément associés avec la température, dans chaque phase et la fin de chaque phase se produit s'il y aura accumulation des unités de froid et de chaleur (Zhao et al, 2013).

Trois concepts sont pris en compte lors de développement des modèles phénologiques : statistique, théorique et mécanique (Zhao et al, 2013). Les modèles théoriques prédisent l'évènement phénologique en estimant les facteurs incluant ; la balance hormonale, température, précipitations, ou la balance de carbone (Caldararu et al, 2014). Cette information est généralement obtenue par un control automatisé (pour les facteurs intrinsèques de la plante) et une télédétection des facteurs environnementaux et phenologiques (Zhang et al, 2007), ce qui permet une visualisation à grande échelle de la phénologie et de

ses facteurs déterminants. Les principaux avantages de ce type de modèles, c'est qu'ils considèrent les variations phénologiques dans les populations ou les espèces et les prédictions au niveau mondial. Les inconvénients incluent la variation dans les prédictions phénologiques entre les régions et la limitation des séries de dates de paramétrisation et la validité des modèles.

A/ Modèles statistiques

Modèles considérant seulement les unités thermiques (Ricard 2014). Pour prédire le débourrement, le calcul des unités thermiques devrait commencer lorsque l'endodormance est levée (Differt, 2001). Le degré-jour est généralement l'unité utilisée pour calculer les unités thermiques. Ils représentent la sommation des températures supérieures au seuil de développement pour chaque journée. Le seuil inférieur de développement, souvent nommé la température de base, est de 5°C chez le pommier. Les degrés-jours équivalent à la différence entre la température moyenne quotidienne et la température de base. Ce sont des approximations linéaires de la date de débourrement en fonction de la température. Il existe plusieurs méthodes permettant de calculer ces unités, dont la méthode standard, triangulaire et sinusoïdale. Il existe aussi des modèles d'unités de forçage de fonction logistique comme celui de Sarvas (Sarvas, 1974). Ces modèles ont aussi été combinés à des modèles d'accumulation d'unités de froid (Differt, 2001).

Des modèles statistiques à une phase ont été conçus, ils sont basés sur des fonctions mathématiques corrélées à des facteurs environnementaux et des facteurs intrinsèques de la plante (Chuine et al, 2014). Beaucoup de ces modèles assument une simple corrélation linéaire entre une action physiologique et un facteur environnemental et ces paramètres sont généralement obtenus en utilisant des méthodes de simulation statistiques (Zhao et al, 2013). Les deux modèles respectivement le degré d'heure de croissance GDH (Richardson et al, 1975) et le temps thermique (Cannel and Smith, 1983) sont des exemples de ce type de modèle, ils décrivent le début de développement au cours de printemps en considérant l'accumulation de la chaleur à partir d'une date calendaire fixée, en supposant que les besoins en froid sont satisfaits (Linkosalo et al, 2008). L'avantage de ce modèle est la simplification des calculs, à condition que l'estimation d'un stade phénologique et ses facteurs sur lesquels il dépend, soit bien correcte (Zhao et al, 2013). Pour une large proportion des régions tempérées

froides le modèle statistique prédit avec précision les dates de débourrement et /ou de floraison, cependant, l'intensification des réchauffements climatiques et la régression des besoins en froid au cours de l'hiver, ces modèles peuvent ne plus être précis (Chuine et al, 2014). Ces modèles se trouvent inefficace dans les régions à climat subtropical, lorsqu'ils sont appliqués sur les mêmes espèces dont ils ont été développés.

B/ Modèles mécaniques

Modèles considérant les unités de froid et les unités de chaleur. Plusieurs modèles décrivent la levée de l'endodormance par l'accumulation d'unités de froid suivi d'une période d'accumulation d'unités thermiques pour combler l'écodormance. Une autre définition serait une accumulation graduelle d'unités de froid qui chevauche l'accumulation d'unités thermiques menant au débourrement. En réalité, la période d'endodormance ne se termine pas d'un seul coup. C'est un passage graduel entre deux états. À des températures favorables à la croissance, les arbres sortiront de dormance deux semaines après que les unités de froid soient accumulées. La date de débourrement peut être influencée par des unités de froid additionnelles, l'acide gibbérellique, et artificiellement avec des agents permettant la sortie de dormance (Couvillon et Erez, 1985). Les modèles mécaniques décrivent la relation entre la cause et l'effet, ils sont basés sur la compréhension de la physiologie des stades phénologiques et son interaction avec les facteurs environnementaux (Zhao et al, 2013). Les paramètres utilisés pour développer ces modèles comme les dates de débourrement ou de floraison peuvent être directement obtenues à partir des observations de terrain. Une compréhension de l'interaction entre les facteurs environnementaux et phénologiques est très importante pour l'optimisation des modèles mécanique (Hayhoe et al, 2007). Ces modèles, sont aussi connus par les modèles à deux phases considérant l'effet de la température dans les phases d'endodormance et d'ecodormance (Chuine et al, 2014).

La complexité des modèles mécanique est composée de trois différentes hypothèses qui devraient toujours être considérées durant la modélisation ; (i) le type de réponse phénologique à l'égard d'un facteur écologique, (ii) la dépendance des effets de froid et/ou de chaleur, et (iii) la fenêtre temporelle durant laquelle le bourgeon végétatif et/ou floral sont réceptifs de l'effet de froid et /ou de chaleur (Chuine, 2000). La levée de l'endodormance et les dates de débourrement et de floraison changent considérablement dans les modèles mécaniques (Müller and Braun, 2008). Cependant, bien que les modèles mécaniques ont été

rapidement utilisés dans des variétés de différentes espèces, leur développement est limité par la difficulté dans la détermination de la fin de l'endodormance (Zhao et al, 2013) et le début de l'effet de chilling (Müller and Braun, 2008).

B1 / En mode Séquentiel

Le taux de développement d'un plant durant l'endodormance et l'écodormance est peut être interprété en utilisant des concepts de modèles alternatifs, parallèles, séquentiels (Chuine, 2000; Linkosalo et al, 2008), et flexibles (Fu et al, 2012).

Un modèle de type séquentiel est décrit par un passage abrupt de l'endodormance à l'écodormance (Lang et al, 1987). Il considère l'endodormance et l'écodormance comme deux phases indépendantes et consécutives (Richardson et al, 1974; Sarvas, 1974; Hanninen, 1987). Il n'y a donc pas de réponse aux températures chaudes tant et aussi longtemps que les besoins en froid ne sont pas comblés. De plus, une exposition supplémentaire au froid n'a pas d'effet sur les besoins en unités de chaleur (Hunter et Lechowicz, 1992).

Les modèles séquentiels ont été développés par Hanninen (1987) et Legave et al, (2013). Ils supposent que lorsque les besoins en froid sont satisfaits, l'endodormance est levée, prédisposant les plantes à se développer quand les conditions environnementales seront favorables (écodormance) (Hanninen, 1995). Ceci dit que la non satisfaction des besoins en froid entrave le débournement et la floraison (Linkosalo et al, 2008). Cependant, cela n'est pas toujours le cas dans les régions à hivers doux, parfois la floraison a lieu dans le terrain, même si les modèles n'indiquent pas un froid suffisant pour lever l'endodormance.

En utilisant les séries de températures et de phénologie des régions tempérées Fu et al (2012), ont observé que le modèle séquentiel est le modèle mécanique avec une plus haute précision dans la prédiction de débournement.

Dans les conditions futures sous le réchauffement climatique, ce modèle sera beaucoup plus approprié dans la prédiction des changements phénologiques, car il prend en compte l'effet de froid (Fu et al, 2012). Cette considération attribue au modèle séquentiel une plus grande précision par rapport au modèle statistique qui prend en compte uniquement les besoins en chaleur. Certains modèles (Weinberger, 1950; Richardson et al, 1974; Shaltout and Unrath, 1983; Fishman et al, 1987; Linsley-Noakes et al, 1994) ont été développés en utilisant les simulations mathématiques et les tests biologiques pour estimer les périodes d'effet de froid.

Ces modèles prennent en compte la température vue son efficacité à induire le débourrement ou la floraison. Ces modèles estiment le débourrement et la floraison quand ils sont associés à une phase de modèle statistique, comme le degré heure de croissance GDH. Cette association des modèles peut aussi être classée comme modélisation séquentielle et propose des réponses triangulaires pour l'effet de froid et des réponses sigmoïdales, linéaires (Fu et al, 2012) et exponentielles (Legave et al, 2013) pour l'effet de chaleur.

B2 / En mode alternatif

Selon Cannel and Smith (1983); Murray et al (1989) et Kramer (1994), les modèles alternatifs sont similaires aux modèles statistiques, parcequ'ils proposent un pré-établissement de la date de début d'accumulation de froid et de chaleur. Cependant, contrairement aux concepts des autres modèles, la satisfaction en besoins de froid pour une espèce donnée ou une variété peut s'étendre au-delà de début de la date d'accumulation de chaleur, résultant des effets chevauchés. Souvent un modèle alternatif propose un effet binaire de froid et linéaire de chaleur (Fu et al, 2012).

B3 / En mode parallèle

Un modèle de type parallèle est décrit par un chevauchement entre l'endodormance et l'ecodormance (Chuine, 2000). Selon Cannell et Smith (1983), ce modèle considère que les unités de chaleur peuvent être accumulées même si les besoins en froid ne sont pas comblés. Le nombre de jours de froid et le nombre de degrés-jours sont calculés séparément à partir de deux dates fixes. La date de débourrement sera la date pour laquelle la relation est vérifiée. D'après Landsberg (1974), Hanninen(1990), et Kramer (1994), Il reflète la simultanéité de l'effet de froid et de chaleur dans le développement de la plante durant l'endodormance. Dans ce modèle, le seuil pour le débournement /floraison est non définit, et cela varie grandement en raison de changement climatique dans le terrain, la période durant laquelle ils se déroulent, et l'accumulation totale de froid et de chaleur (Linkosalo et al, 2008). Ainsi, théoriquement, quand il n'y a pas de froid durant un hiver doux sera responsable du développement ontogénique, et le débournement / floraison peut se produire même si l'accumulation de froid est faible. Ces modèles proposent des réponses triangulaires pour l'effet de froid et linéaires pour l'effet de chaleur (Fu et al, 2012).

B4 / En mode flexible

Les modèles flexibles sont plus normalisés parcequ'ils combinent les concepts séquentiels et parallèles dans un seul modèle. Comme pour les modèles séquentiels, la durée de la période d'endormance est calculée à partir de la date fixée et les mesures de l'accumulation de la chaleur débutent lorsque la période d'endormance se termine (Müller and Braun, 2008). Cependant, ce modèle hybride a une structure supplémentaire qui permet une douce transition entre les phases de chilling et de forcing (Linkosalo et al, 2008).

Chuine (2000), a observé que le modèle flexible présente une bonne performance régionale mais entraîne une faible précision dans la prédiction phénologique, lorsqu'il est testé avec des données climatiques et phénologiques sur une zone géographique plus étendue (Müller and Braun, 2008). Quand les modèles phénologiques sont sélectionnés et appliqués sur des vastes régions, ils peuvent fournir une information précise sur la relation entre l'environnement et les processus physiologiques (Richardson et al, 2013) et comprendre comment la phénologie des plantes réagit à la variabilité climatique.

II.7.1. Modèles utilisés en production fruitière

Les modèles parallèles et séquentiels sont complexes et peu d'information existe sur leur application en vergers (Hanninen, 1987; Kramer, 1994; Cesaraccio et al, 2004). Les modèles les plus utilisés afin de prédire le débourrement dans la production fruitière sont les modèles classiques : le modèle «Chilling hours» et le modèle «Chilling units». Ces modèles ne séparent pas l'état d'endormance de l'état d'écodormance (Cesaraccio et al, 2004). Le modèle «Chilling hours» a été conçu par Weinberger (Weinberger, 1950). Ce modèle accumule un «chilling hour» pour chaque heure d'exposition à des températures entre 0°C et 7,2°C. Les modèles classiques incluant le «Utah», le «North Carolina», le «Low chilling» et le «Positive chili unit» ont été développés afin de prédire le débourrement (Richardson et al, 1974; Gilreath et Buchanan, 1981; Shaltout et Unrath, 1983; Linsley-Noakes et Allan, 1994). Les températures seuils sont nécessaires dans la construction d'un modèle car certaines températures contribuent à l'accumulation d'unités de froid tandis que d'autres non (Cesaraccio et al, 2004). Le modèle «Utah» a été conçu par Richardson (Richardson et al, 1974). Ce modèle cumule les unités de froid pour des températures comprises entre 0°C et 16°C et associe une valeur négative aux températures supérieures à 16°C.

Le modèle «Utah» est le modèle le plus utilisé (Differt, 2001). Ce modèle est construit pour utiliser des degrés jours fixes (indépendant des unités de froid) afin de prédire le débourrement. Par contre, il est démontré que les besoins en unités de chaleur «forcing requirement » sont dépendants des unités de froid. C'est pour cette raison que le modèle «Utah» n'est pas adapté aux hivers doux. Les arbres qui sont exposés à un faible nombre d'unités de froid requièrent plus de températures chaudes pour lever la dormance que les arbres qui subissent des hivers froids (Couvillon et Erez, 1985).

Le modèle dynamique (modèle de type «chilli units») a été proposé par Erez et Fishman (Erez et Fishman, 1998). Ce modèle est basé sur des concepts théoriques développés par Fishman (Fishman et al, 1987). Un «chilli portion» est accumulé après 28 h d'exposition à 6°C. Contrairement au modèle «Utah», une fois que le «chilli portion» est accumulé, il ne peut pas être annulé par des températures chaudes. Pour les «chilling units», une valeur est donnée en fonction de la température.

Les modèles basés sur la température sont souvent utilisés afin de prédire le débourrement sans prendre en compte la spécificité des espèces et des sites. Par exemple, le modèle «Utah» ne semble pas être adapté lorsqu' il est testé dans des conditions plus douces que les conditions originales. Il semble y avoir d'autres facteurs, en plus de la température, impliqués dans le processus de dormance (Cesaraccio et al, 2004). Dans les futurs scénarios de changements climatiques, la détermination des modèles phénologiques peut encore dépendre sur des facteurs multiples autres que la température, ce qui induit à un développement des modèles multifactoriels (Müller and Braun, 2008).

CHAPITRE III

MATERIELS ET METHODES

III.1. Caractérisation du réchauffement climatique en Algérie

III.1.1. Hypothèse

Les analyses spatiotemporelles de la température et de la phénologie peuvent générer des évidences sur le déterminisme de la phénologie florale. La comparaison des tendances historiques de température et de phénologie d'une région subhumide (Benchicao) avec celles enregistrées dans une région semi- aride (Sidi Lakhdar) et une région continentale à hivers doux (Boumedfaa), pourrait indiquer sur la vulnérabilité de la production fruitière à l'égard du réchauffement climatique.

III.1.2. Objectif

Cette partie vise à mettre en évidence des indications fiables pour les changements climatiques et évaluer leurs tendances dans un passé récent dans notre région, en se focalisant sur l'analyse de quelques paramètres climatiques notamment la température. Ces analyses contribuent à mieux comprendre l'effet des variations de la température sur la satisfaction des besoins en unités de froid et de chaleur nécessaires à la reprise de l'activité phénologiques de l'espèce fruitière.

III.1.3. Présentation des sites d'étude

Trois sites ont été choisis pour cette étude, le site de Benchicao (site1, MD) commune de la wilaya de Médéa et les sites de Sidi Lakhdar (site 2, SD) et Boumedfaa (site 3, BM) deux communes de la wilaya d'Ain Defla (figure 10).



Figure 10 : Localisation géographique des deux wilayas, Ain Defla (Sidi Lakhdar, Boumedfaa) et Médéa (Benchicao) sur la carte d'Algérie.

III.1.3.1. Situation géographique des trois sites

La commune de Benchicao se situe au sud-est du chef-lieu de la wilaya de Médéa à une distance de 22 km et à 80 km au sud-ouest d'Alger (figure 11). Elle est limitée au nord par la commune d'Ouazra, au sud par la commune de Berrouaghia et à l'ouest par les communes de Tizi Mehdi et Si Mahjoub. La ferme expérimentale ITAFV (site des vergers du pommier et des vignobles étudiés) est située à une distance de 5 km au sud-ouest de Benchicao, à une altitude qui varie entre 1080 m et 1133m, selon les coordonnées de $36^{\circ}11' 59''$ nord en latitude et de $2^{\circ}50' 55''$ en longitude. Elle occupe une superficie agricole totale (SAT) de 34.10 ha, avec une surface agricole utile (SAU) de 30.10 ha.

Sidi Lakhdar (site 2) et Boumedfaa (site 3) sont deux communes de la wilaya d'Ain Defla appartenant à la plaine du haut Chellif (plaine de Khemis- Miliana). La plaine fait partie du bassin de Haut Cheliff, elle est située au nord-ouest de l'Algérie et fait partie du bassin

hydrographique du Cheliff au nord-est de ce dernier. Elle est limitée au nord par le massif du mont Zaccar, contrefort des monts du Dahra, au sud par le massif de l'Ouarsenis, à l'est par le Djebel Gantas et à l'ouest par le Djebel Doui qui le sépare de la plaine d'El Abadia.

La plaine est comprise entre les coordonnées, $36^{\circ}12'$ et $36^{\circ}30'$ de latitude Nord, entre les communes de Bir Oueld Kkhelifa et de Miliana, $2^{\circ}02'$ et $2^{\circ}44'$ de longitude Est, entre les montagnes de Doui et Gantas (Touhari, 2015). Elle s'étend sur une superficie de 360 km^2 soit 7 % du territoire de la wilaya d'Ain Defla, à une pente relativement faible 15% (Ikhlef, 2005).

Sidi Lakhdar est située dans la daïra de Khemis Miliana, wilaya d'Ain Defla, au centre de l'Algérie à 145 km au Sud-Ouest d'Alger, d'une superficie de 39 km^2 .

Elle est limitée géographiquement comme suit, au nord Ben Allal, Au sud Djelida, à l'est Khemis et à l'ouest Arib et Ain Defla. Ces coordonnées géographiques sont, $36^{\circ}9'51''$ de latitude et $0^{\circ}26'27''$ de longitude avec une altitude de 211 m (voir figure 11).

La daïra de Boumedfaa se trouve dans la partie nord de la Wilaya d'Ain Defla, à 90 km à l'ouest d'Alger et à 56 km à l'est du chef-lieu de la wilaya, sur le versant nord de la montagne de Gantas. Ayant un relief ondulé et caractérisé par des versants exposés au nord. Elle s'étale sur une superficie de $128,94 \text{ km}^2$. Elle est limitée au nord par la commune de Hammam Righa, au sud par la commune de Djendel, à l'est par la commune d'Oued-Djer et la commune d'Ain Benian et Hoceinia à l'ouest. Ses coordonnées géographiques sont de $36^{\circ}22'13''$ en latitude Nord et de $2^{\circ}28'35''$ en longitude et une altitude de 263 m (figure 11) (Subdivision de Boumedfaa).

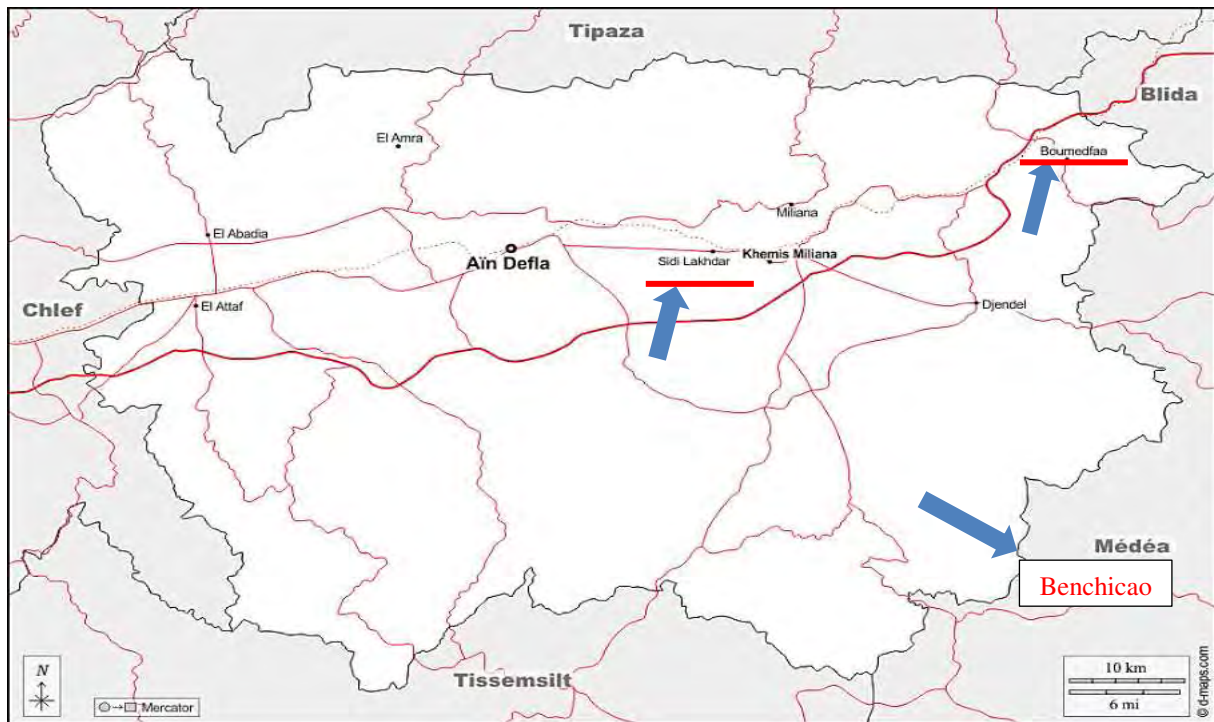


Figure 11 : Localisation géographique des sites d'étude Benchicao, Sidi Lakhdar et Boumedfaa

III.1.3.2. Caractéristiques pédoclimatiques des sites

A/ Caractéristiques climatiques

La région de Benchicao est caractérisée par un relief accidenté et des pentes plus ou moins importantes, une zone montagneuse de l'Atlas tellien. Le climat de la région de Benchicao est caractérisé par un automne assez doux et pluvieux, un hiver très froid, pluvieux, neigeux avec des gelées noires, un printemps assez pluvieux avec quelques gelées tardives (gelées blanches et un été sec et chaud. Ces caractéristiques définissent le type de climat de la région qui est subhumide (figure 13). La vocation principale de la région en relation avec son climat est la viticulture et l'arboriculture.

Selon Reyner (2000), dans une région où l'altitude atteint 1200 m, la répartition des pluies, l'ensoleillement et les températures au cours d'une même année agissent sur le comportement de la variété et sur la qualité de fruit. Dans cette partie, les paramètres climatiques étudiés pour caractériser notre zone d'étude sont principalement, les précipitations journalières et les températures journalières (maximales, minimales et moyennes).

Pour les deux sites, Sidi Lakhdar et Boumedfaa, les caractéristiques climatiques sont celles de la wilaya d'Ain Defla avec des différences dues essentiellement au type de relief de chaque site.

Sidi lakhdar et Boumedfaa se caractérisent cependant par un climat méditerranéen semi-aride avec un caractère de continentalité marqué et un écart de température de 20 °C entre les mois de Janvier et d'Aout. Des hivers pluvieux et froids, des automnes et des printemps très courts. L'été s'étend sur 5 à 6 mois environ avec des masses d'air chaud à partir du mois de mai. Cette classification du climat se base sur les données météorologiques des stations régionales de l'ANRH et de l'ONM sur plus de trente années d'observations (Nefidsa, 2012).

La pluviométrie reste variable et atteint 500 à 600 mm / an. Il existe une série d'étages climatiques allant du sub-aride (Sidi Lakhdar) au fond de la vallée et subhumide (Boumedfaa) sur les reliefs. La distance d'un étage à un autre est parfois si étroite qu'elle atteint à peine 300 m. Plus l'altitude est élevée plus l'étage est humide de même pour l'enneigement qui touche les reliefs de plus de 600 m d'altitude. La plus grande valeur d'humidité relative de l'air est atteinte pendant la période hivernale, avec 80.6 % au mois de décembre et la plus basse, pendant la période estivale avec 42 % au mois d'août (Sadfi et Hassine, 2018).

Les vents de la région sont très fréquents, dont la vitesse varie avec leur direction et la saison. En hiver les vents dominants sont de direction ouest. En été les vents dominants sont de direction est. Le maximum des forces des vents se situe au cours des mois de mars, avril et mai et le minimum se situe en aout, septembre et octobre (Souaieur, 2016). Le vent de sirocco est fréquent dans la zone d'étude, il se manifeste en septembre. Il peut causer des dégâts importants aux végétaux en faisant augmenter la température, l'évapotranspiration potentielle accélère le dessèchement du sol en surface (Sadfi et Hassine, 2018).

B) Caractéristiques du sol

Les analyses physico-chimiques des parcelles du sol de Benchicao (parcelles des vergers du pommier et des vignobles étudiés) ont été réalisées au niveau du laboratoire de pédologie de L'I.T.A.F.V en 2011. Les valeurs engendrées dans le tableau 4 reflètent une

texture sablo-argileuse avec un pH plus ou moins neutre qui tend vers une faible acidité.

Tableau 4 : Composition texturale du sol à Benchicao, (ITAFV, 2011).

Composition texturale	Profondeur		
	0-35 cm	35-50 cm	50-100 cm
Argile %	9.92	9.50	9.91
Limon fin%	5.34	8.25	9.7
Limon grossier%	8.14	10.50	9.24
Limon%	13.48	18.47	19.0
Sable fin%	65.34	62.67	52.12
Sable grossier%	11.25	9.50	9.03
Sable%	76.59	71.77	61.15
Ca Co3 actif%	nul	nul	nul
pH%	6,7	6,3	6,3

Les sols du haut Cheliff où se situe les deux sites d'étude, Sidi Lakhdar et Boumedfaa sont caractérisés par la prédominance d'éléments fins, donc c'est la catégorie des terres fortes, les sols ne sont pas salés et de type argilo-limoneux (Ykhlef Chaouch, 2015).

D'après l'étude pédologique faite par la direction d'agriculture de la wilaya d'Ain Defla (DSA), les sols sont meubles, fertiles et de texture variable avec prédominance d'éléments fins (80%) dont plus de 45% d'argile (DSA, 2016).

On distingue une mosaïque de textures soit,

- Sols limono-argileux
- Sols argilo-limoneux,
- Sols calci-magnésiques,
- Sols fer-sialitiques,
- Sols sablo-limoneux.

Une analyse physico-chimique des sols a été faite par l'ITGC de Khemis –Miliana en 2007 (institut technique des grandes cultures) dont les résultats sont illustrés dans le tableau 5 et le tableau 6.

Tableau 5 : Analyse physique du sol (ITGC Khemis Miliana, 2007).

Profondeur (cm)	Chargeen %	Granulométrie en %					classe texturale
		Argile	Limon fin	Limon grossier	Sable fin	Sable grossier	
0 – 40	27.65	32	30	19.6	10.7	7.7	Limono argileuse
40 - 70	10.02	40	15	17.3	19.1	8.6	Argileuse
70 - 100	23.02	50	10	12	17.7	10.3	Argileuse
>100	31.40	50	10	04	13.6	17.2	Argileuse

Les valeurs obtenues ci-dessus, nous ont permet de classer les sols dans la catégorie des sols lourds, de type limono-argileux.

Tableau 6 : Analyse chimique du sol (ITGC Khemis Miliana, 2007)

Horizon (cm)	CaCo3 total %	CE ($\mu\text{m}/\text{m}$)	pH	MO (%)
0 - 40	3.52	1.6	8	1.51
40 – 70	3.97	1.85	7.8	1.08
70 - 100	19.79	1.98	8	0.75
>100	15.66	2.11	8.2	0.10
moyenne	10.73	1.88	8	0.86

Selon les valeurs engendrées dans le tableau 6, les sols d'Ain Defla contiennent une faible teneur en calcaire, avec une faible conductivité électrique inférieure à 4 mmhos / cm et une faible teneur en matière organique d'où un pH plus ou moins basique (Ykhlef Chaouch, 2015).

Cependant, il à noter que les sols de Sidi Lakhdar sont de type argilo-limoneux, où les cultures des agrumes, pomme de terre, rosacées, céréales, fourrages en irrigué sont dominantes. Alors que les sols de Boumedfaa sont de type limono-argileux, où la culture des rosacées, de la vigne, des légumes secs, de maraîchage et de l'olivier prospèrent (Labadlia et Benzerhouda, 2017).

III.1.4. Collecte des données climatiques

Les données de températures enregistrées pour chaque site sont présentées dans le tableau 7. Les données journalières de températures maximales et minimales obtenues pendant 37 ans (1980 à 2016) ont été collectées à partir des stations météorologiques à proximité des sites choisis et appartenant à l'Office national de météorologie (ONM). Les températures moyennes ont été calculées en utilisant les températures maximales et minimales. Les données journalières manquantes ont été estimées selon deux méthodes :

- 1) une interpolation linéaire pour quelques valeurs sur 1 à 3 jours des moyennes pour combler les valeurs manquantes des températures maximales et minimales.
- 2) des corrélations avec un autre site, lorsqu'il s'agit de données manquantes sur des (5 à 10 jours), entre la station de Sidi Lakhdar et la station de Chlef (latitude $36^{\circ} 10' N$, longitude $1^{\circ} 20' E$, altitude 116 m) pour le mois de mai de l'année 2005, et entre la station de Benchicao (Médéa) et la station de Bordj Bou Arreridj (latitude $36^{\circ} 04' 23'' N$, longitude $4^{\circ} 45' 39'' E$, altitude 930 m) pour les mois de janvier, février et mars de l'année 1980 et le mois de mai de l'année 2001. De même une corrélation a été faite entre le site de Benchicao (Médéa) et la station météorologique de Sétif (latitude $36^{\circ} 11' 28'' N$, longitude $5^{\circ} 24' 49'' E$, altitude 1038 m) pour les mois de septembre et octobre de l'année 1981, février et décembre de l'année 1990.

Pour le site de Boumedfaa, les données manquantes de quelques mois des années 1980, 1985, 1989 et 2005 ont été obtenue à partir des corrélations entre les données de la station météorologique de Khemis Miliana (latitudes $36^{\circ} 15' 36'' N$, longitudes $2^{\circ} 12' 0'' E$, altitude 721 m) et celles de la station météorologique de barrage Harraza (latitude 2° et $2^{\circ} 40' N$, longitude 36° et $36^{\circ} 40' E$, altitude moyenne de 450 mètres).

Tableau 7 : Données de températures et de phénologie collectées et les coordonnées géographiques des sites de Benchicao, Sidi Lakhdar et Boumedfaa.

Site	Région	Coordonnées géographiques	Altitude	Séries de températures	Espèce	Variété	Stade de débourrement période temporelle	Stade de floraison période temporelle
N°1 Benchicao, MD	Médéa	Latitude: 36°11' 59" N, Longitude : 2°50' 55" E	1133 m	1980-2016	Pommier	Golden Delicious	BBCH 51 / 2000-2016	BBCH 61 / 2000-2016
					Vigne	Muscat Italia	BBCH 09/1988-2016	BBCH 61 / 1988-2016
N°2, Sidi Lakhdar, SD	Ain Defla	Latitude: 36°15' 50" N, Longitude: 2°09'39" E	211 m	1980-2016	Pommier	Golden Delicious	BBCH51 / 2000-2016	BBCH 61 / 2000-2016
N°3, Boumedfaa, BM	Ain Defla	Latitude : 36° 22'13"N, Longitude : 2° 28'35"E	263 m	1980-2016	Vigne	Muscat Italia	BBCH 09/2000-2016	BBCH 61 / 2000-2016

III.1.5. Estimation des températures horaires

L'estimation des besoins en unités de froid et de chaleur par les différents modèles de calcul, nécessite la conversion des températures journalières minimales et maximales en températures horaires. En utilisant un outil de macros Excel développé par Bonhomme (INRA de Clermont- Ferrand). Ce dernier a été appliqué pour le climat de l'Europe occidentale et du Maroc (El Yaacoubi, 2016) et a été applicable dans le contexte Algérien. La figure 12 présente la fonction développée pour estimer les températures horaires à partir des températures minimales et maximales journalières. La figure 13 illustre la fonction de conversion des températures minimales et maximales journalières en températures horaires.

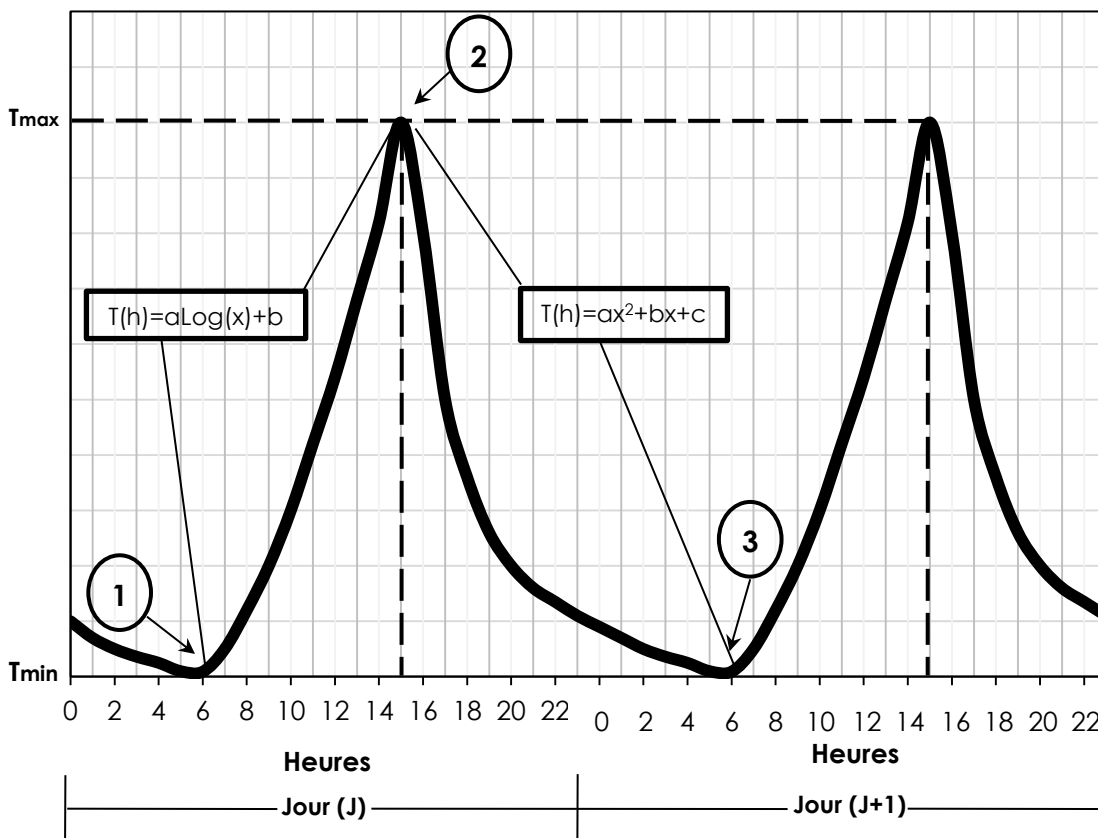


Figure 12 : Représentation schématique de l'ajustement mathématique de l'estimation des températures horaires journalières. (1) heure de la température minimale du jour j ; (2) heure de la température maximale au jour j ; (3) heure de la température minimale au j+1 (El Yaacoubi, 2016).

date/J	Tmax	Tmin	date/J	Heure	T°C
1/10	19.8	11.4	1/10	0	
2/10	15.9	11.8	1/10	1	
3/10	13.9	9.7	1/10	2	
4/10	16.1	10.3	1/10	3	
5/10	20	8.9	1/10	4	
6/10	22.9	12.7	1/10	5	
7/10	22.1	14.4	1/10	6	19.8
8/10	20.5	14.9	1/10	7	17.3
9/10	17.3	13.4	1/10	8	15.8
10/10	20.6	12.4	1/10	9	14.7
11/10	23.2	14.7	1/10	10	13.9
12/10	21	14.4	1/10	11	13.3
13/10	22.4	14.8	1/10	12	12.7
14/10	24.4	15.7	1/10	13	12.2
15/10	15.7	10.9	1/10	14	11.8
16/10	16.7	9.3	1/10	15	11.4

Figure 13: Logiciel de conversion « daily to hourly temperature convetor ».

III.1.6. Calcul des besoins en unités de froid et de chaleur

Afin de fournir des données supplémentaires permettant de caractériser les différences régionales de température et d'analyser les déterminismes de la température sur les caractères de débourrement et de floraison, les quantités annuelles en cumul d'unités de froid et de chaleur ont été calculées au niveau des trois sites. Ces calculs ont été basés sur l'hypothèse selon laquelle les unités de froid et de chaleur ont des effets successifs sur la levée de dormance et sur la croissance post-dormance menant au débourrement et à la floraison (Richardson et al. 1974; Rea et Eccel, 2006). Après estimation des températures horaires, les modèles, heures de froid 0°C-7.2°C (Weinberger, 1950), Utah (Richardson et al, 1974), Caroline du nord (Shaltout et Unrath, 1983) et le modèle Dynamique ont été utilisés pour estimer les disponibilités en unités de froid (figure 14). Les cumuls en unités de chaleur ont été estimées à l'aide du modèle Growing Degree Hours GDH (à température de base 4,5°C) (Richardson et al, 1975; Rea et Eccel, 2006).

Le calcul des quantités en unités de froid a été effectué à partir du mois d'octobre de l'année (n) jusqu'à la fin du mois de février de l'année (n+1).

Tandis que le calcul des quantités en unités de chaleur a été effectué à partir du mois de février jusqu' à la fin du mois de mai de la même année, en tenant compte des dates de floraison des deux espèces étudiées.

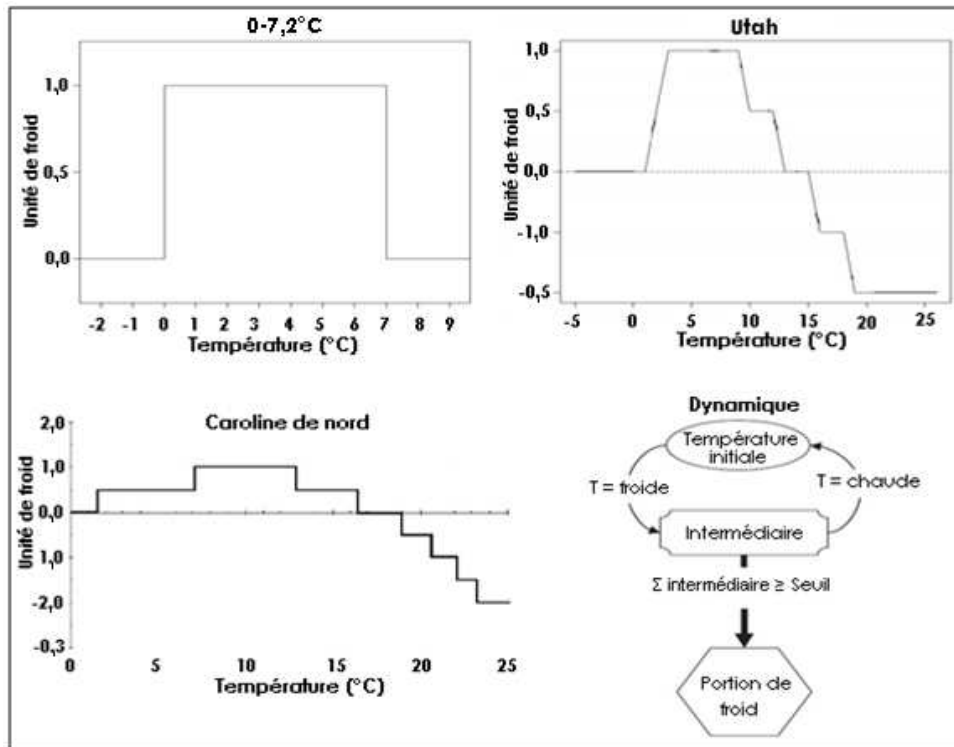


Figure 14 : Attribution des unités de froid pour une température donnée selon les modèles Weinberger (0-7.2°C), Utah, Caroline du Nord et Dynamique.

III.2. Impacts biologiques des changements climatiques sur le pommier et la vigne, dans des régions à climats contrastés.

III.2.1.Hypothèse

Des études sur les perturbations phénologiques dues aux changements climatiques ont été souvent entreprises dans le monde entier, en visant souvent une seule espèce dans une seule région. De ce fait, l'étude comparative de séries chronologiques de températures et de notations phénologiques de deux espèces fruitières cultivées dans trois régions à climat contrasté est considérée comme une première initiative pour mettre en évidence le niveau de vulnérabilité de l'espèce face aux changements climatiques.

III.2.2.Objectif

Notre objectif était de déterminer les différences de tendances temporelles, la variabilité régionale des températures et les dates de débourrement et de floraison dans trois zones de culture, soit Benchicao (médéa), Sidi Lakhdar et Boumedfaa (Ain Defla). La compréhension de l'effet de changement climatique sur la phénologie florale pourrait être facilitée par l'utilisation de deux espèces à déterminisme différent (semi précoce et tardive). Ces deux espèces ont été largement utilisées dans la bibliographie comme indicatrices de changement climatique ; le pommier, le plus exigeant en froid (Legave et al, 2008) et la vigne, moins exigeante en froid, mais exigeante en chaleur pour sa floraison (De Cortázar-Atauri et al, 2009). Dans ce contexte, nous avons proposé une comparaison des tendances d'évolution des températures durant les phases allant de la dormance jusqu'à la floraison, pour évaluer la relation entre la température et les tendances phénologiques pour la même espèce dans des régions différentes.

III.2.3.Collecte des données phénologiques

Les données phénologiques de débourrement et de floraison du pommier ont été collectées pendant la période allant de 2000 à 2016, dans les deux sites ; Sidi Lakhdar (Ain

Defla) et Benchicao (Médéa). Pour la vigne, les données phénologiques collectées s'étalent pendant la période 1988 - 2016 dans le site de Benchicao (Médéa) et durant la période 2000 - 2016 dans le site de Boumedfaa (Ain Defla). La collecte de données est focalisée sur deux cultivars principaux: 'Golden Delicious' pour le pommier et 'Muscat Italia' pour la vigne. Ces deux cultivars couvrent des superficies importantes dans les sites choisis.

Les données qui s'étalent entre 2000 à 2012 ont été collectées directement à partir des organismes étatiques spécialisés. Elles ont été observées avec précision grâce à des évaluations menées par des observateurs expérimentés, sur des arbres et des ceps adultes poussant dans des vergers et des vignobles à long terme. Il s'agit de dates moyennes qui représentent l'ensemble des vergers observés.

Les données phénologiques allant de 2012 à 2016 sont le résultat d'un travail de terrain que nous avons effectué pendant quatre années, sur les mêmes vergers et vignobles, implantés dans les trois sites. L'échantillonnage a été effectué au moment de la dormance. Un choix au hasard des arbres et des ceps était effectué dans le milieu et les quatre périphériques des vergers et vignobles concernés. Pour chaque pied on a pris quatre rameaux (productifs) selon les quatre orientations (Nord, Sud, Ouest et Est). Cependant, le nombre total des arbres et des ceps couvrait suffisamment la superficie totale du verger et du vignoble observé (plus de 50%).

La prise en considération de l'orientation était pour couvrir la différence en termes d'ensollement. Un comptage de nombre de bourgeons floraux était effectué préalablement pour chaque rameau choisi. Des suivis phénologiques à raison de 3 à 4 fois par semaine ont été effectués sur les arbres et les ceps adultes. Des notations sur le développement des bourgeons floraux de la dormance jusqu'au début débourrement et de débourrement jusqu'au début floraison ont été relevées.

Les arbres et les ceps sont soumis aux techniques des conduites habituelles (tailles, fertilisation et protection) sans subir de traitements chimiques qui peuvent affecter la dormance ou accélérer la floraison. Les dates de débourrement et de floraison au niveau de chaque site ont été collectées conformément au code international BBCH.

Les dates phénologiques prises en compte pour le pommier, concernent le début de débourrement (éclatement des bourgeons) qui correspond au stade 51 selon l'échelle BBCH

et au stade C selon Baggiolini. Le début de floraison (10% des fleurs ouvertes), il correspond au stade 61 selon l'échelle BBCH et au stade F1 selon Baggiolini.

Concernant la vigne, il s'agit du stade du début de débourrement (lorsque l'extrémité verte de la jeune pousse est nettement visible), il correspond au stade 09 selon l'échelle BBCH et au stade C selon Baggilioni. Le stade de début floraison (lorsque 10% des capuchons floraux sont tombés) est représenté par le stade 61 selon l'échelle BBCH, et le stade I selon Baggilioni (Meier et al. 1997, 2001).

Le début de débourrement et le début de floraison ont été déclarés atteints lorsque 60% des arbres et des ceps avaient atteints ces deux stades.

Toutes les séries collectées ont été vérifiées pour assurer qu'aucune donnée douteuse n'a été utilisée. Des tendances linéaires des dates de débourrement et de floraison ont été comparées afin de montrer les différences spatio-temporelles de ces deux espèces. La plupart de ces séries ont également été utilisées pour estimer la variabilité de la durée de débourrement et de floraison à travers le nombre annuel de jours entre les différents sites étudiés.

III.3. Modélisation phénologiques du pommier et de la vigne

III.3.1. Hypothèse

La conception des modèles adéquats pour une prédiction future des événements phénologiques face aux changements climatiques suppose des ajustements des modèles phénologiques préexistants en intégrant un large éventail de données de températures et de phénologie.

III.3.2. Objectif

Le choix d'un meilleur modèle phénologique séquentiel pour les prédictions annuelles de la phénologie du pommier et de la vigne constitue un objectif primordial, en parallèle avec un paramétrage des données de températures et de phénologie des deux espèces étudiées.

III.3.3. Données climatiques

Les séries historiques de températures (maximales, moyennes et minimales) qui ont été utilisées dans cette partie, sont présentées précédemment dans la première partie de ce chapitre avec les caractéristiques des trois sites d'étude. Les températures ont été collectées à partir des stations météorologiques qui existent à proximité des sites d'étude (la station météorologique de Khemis Miliana pour le site de Boumedfaa, la station météorologique d'Ain Defla pour le site de Sidi Lakhdar et la station météorologique de Médéa pour le site de Benchicao). Une analyse préliminaire des températures a été effectuée pour détecter les incohérences. Chacune de ces trois stations météorologiques centrales (Ain Defla, Khemis Miliana et Médéa) possède des stations pilotes sur les trois sites pour la collection des données météorologiques.

Les trois séries de températures (Benchicao, Sidi Lakhdar et Boumedfaa) sont constituées par le même nombre d'années (36 ans) et pour chaque composante (Température moyenne, minimale et maximale). Le site de Benchicao (Médéa) présente de bonnes conditions pour la culture du pommier notamment la variété 'Golden Delicious', contrairement au deuxième site de Sidi Lakhdar. Cependant, les deux sites Benchicao et Boumedfaa offrent des conditions favorables pour la culture de la vigne.

III.3.4. Données phénologiques

Les données phénologiques ont été obtenues à partir des observations effectuées dans des vergers du pommier et des vignobles situés à proximité des stations météorologiques où les températures ont été enregistrées. Ce sont les mêmes séries phénologiques, qui ont été étudiées dans la deuxième partie de ce chapitre (voir tableau 7) et exploitées pour la modélisation.

III.3.4.1. Prédiction des dates de débourrement et de floraison à l'aide des modèles phénologiques.

La modélisation phénologique a été basée sur le modèle séquentiel qui prend en considération l'effet successif et indépendant des températures sur l'endormance et l'écodormance des bourgeons floraux des cultivars de pommier et de la vigne (Chuine, 2000).

Le principe de ce modèle est conçu sur la base de l'existence d'une période d'accumulation des unités de froid suivie de celles de chaleur. Sept différentes fonctions mathématiques ont été testées et combinées entre les sous-modèles des unités de froid et ceux des unités de chaleur: binaire, linéaire, exponentiel, sigmoïdal, triangulaire, parabolique et normal. Les fonctions et les paramètres associés sont ceux utilisés par Legave et al. (2013) (Tableau 8).

Tableau 8 : Paramètres des modèles de la modélisation

Sous modèle	Fonction de température (T)	
Unités de froid	Fonction des unités de froid	Paramètres de la fonction
Binaire	$F_c(T)=1$ if $T < T_c$, $F_c(T)=0$ if $T > T_c$	T_c : threshold T_a
Linéaire	$F_c(T)=T_c-T$ if $T < T_c$, $F_c(T)=0$ if $T > T_c$	T_c : threshold T_a
Exponentiel	$F_c(T)=\exp(-T/T_c)$	T_c : specific T_a
Sigmoïdal	$F_c(T)=1 / (1+\exp[(T-T_c) / S_c])$	T_c : specific T_a ; S_c
Triangulaire	$F_c(T)=1-(T-T_c / I_c)$ if $T_c-I_c < T < T_c+I_c$, $F_c(T)=0$ if not	T_c : optimal T_a ; I_c
Parabolic	$F_c(T)=1-[(T-T_c) / I_c]^2$ if $T_c-I_c < T < T_c+I_c$, $F_c(T)=0$ if not	T_c : optimal T_a ; I_c
Normal	$F_c(T)=\exp[-(T-T_c)^2 / I_c]$	T_c : optimal T_a ; I_c
Unités de chaleur	Fonction des unités de chaleur	Paramètres de la fonction
Binaire	$F_h(T)=1$ if $T < T_h$, $F_h(T)=0$ if $T > T_h$	T_h : threshold T_a
Linéaire	$F_h(T)=T_h-T$ if $T < T_h$, $F_h(T)=0$ if $T > T_h$	T_h : threshold T_a
Exponentiel	$F_h(T)=\exp(T/T_h)$	T_h : specific T_a
Sigmoïdal	$F_h(T)=1 / (1+\exp[(T-T_h) / S_h])$	T_h : specific T_a ; S_h
Triangulaire	$F_h(T)=1-(T-T_h / I_h)$ if $T_h-I_h < T < T_h+I_h$, $F_h(T)=0$ if not	T_h : optimal T_a ; I_h
Parabolic	$F_h(T)=1-[(T-T_h) / I_h]^2$ if $T_h-I_h < T < T_h+I_h$, $F_h(T)=0$ if not	T_h : optimal T_a ; I_h
Normal	$F_h(T)=\exp[-(T-T_h)^2 / I_h]$	T_h : optimal T_a ; I_h

a paramètre de température (°C) qui dépend de la fonction, **b** paramètre de pente (nombre) de la fonction sigmoïdale autour de T_c ou T_h (température pour laquelle 50% de l'effet quotidien maximum est atteint) et **c** intervalle de température (°C) définissant la plage de températures efficaces autour des températures T_c . T_h est la température où une action d'unité de froid est obtenue, et T_c désigne la température où une action d'unité de chaleur est obtenue.

D'autres paramètres ont été pris en compte pour le paramétrage des sous- modèles des unités de froid et de chaleur, tels que la température (maximale, moyenne et minimale), la température optimale, la marge d'activité (supérieure et inférieure à la température optimale), l'entrée en dormance, la durée des périodes d'accumulation des unités de froid et de chaleur et le seuil de levée de dormance.

La marge des valeurs de chaque paramètre a été prédéfinie pour optimiser l'ajustement des modèles. Ces valeurs ont été incluses dans la plate-forme de données du logiciel PMP 5.5 (Chuine et al, 2013). Parallèlement, des fichiers Microsoft Excel contenant les données de températures annuelles (maximales, moyennes et minimales) ont été préparés et entrés automatiquement dans le logiciel. Les dates de début de débourrement et de début de floraison correspondant à chaque année de relevés de température ont également été automatiquement introduites.

La plate-forme PMP est utilisée dans cette étude comme modèle phénologique, c'est un logiciel convivial pour les environnements Windows. Il sert à ;

- Construire un modèle phénologique,
- Adapter un modèle phénologique aux données,
- faire des simulations à l'aide d'un modèle phénologique.

PMP est conçu pour permettre à l'utilisateur de sélectionner un modèle phénologique et de l'adapter à ses propres données, ou de définir un nouveau modèle à l'aide des fonctions fournies dans le logiciel. De cette manière, le PMP permet de créer une infinité de modèles. Chaque modèle est défini par un certain nombre de phases qu'il décrit, les variables d'environnement qui déclenchent chaque phase, les fonctions de réponse du développement de l'installation par rapport à ces variables, la manière dont les phases sont connectées.

Il existe deux manières d'utiliser PMP: adapter un modèle ou faire une simulation avec un modèle. Le PMP nécessite au moins des données météorologiques quotidiennes pour fonctionner, que ce soit pour effectuer une simulation ou pour adapter un modèle.

L'ajustement d'un modèle nécessite également des données phénologiques, tandis qu'une simulation nécessite un fichier de paramètres, avec les sept premières colonnes impérativement dans cet ordre:

1. Code de la station (entier),
2. Latitude de la station en degrés décimaux (double)
3. Année (entier),

4. jour de l'année (entier compris entre 1 et 365 ou 366),
5. température moyenne en °C (double),
6. Température minimale en °C (double),
7. Température maximale en °C (double).

Dès qu'une année est présentée dans le fichier, il doit être complet et contenir 365 ou 366 jours. S'il y a une ou deux données manquantes consécutives, il est recommandé de les remplir en les estimant avec la méthode souhaitée. Il est fortement recommandé que le fichier de données météorologiques contienne les données météorologiques de l'année précédente.

S'agissant des données phénologiques, un fichier doit être constitué des trois premières colonnes impérativement dans cet ordre:

1. Code de la station (entier),
2. Population / variété / famille / code individuel (entier),
3. Année (entier).

Plusieurs colonnes contenant des dates correspondant à différents événements phénologiques (dates de débourrement, dates de floraison, dates de repos, etc.) ont été ajoutées. Les dates ont été en jour de l'année, c'est-à-dire un nombre compris entre 1 et 366 (dates calendaires).



Figure 15 : Plateforme PMP 5.5 de modélisation phénologique

Pour adapter un modèle, le fichier.txt doit être créé avec seulement 3 colonnes impérativement dans cet ordre:

- code de la station (entier),
- Provenance / famille / code individuel (entier),
- année (entier).

Ce fichier contient la liste des données, parmi celles répertoriées dans le fichier de données phénologiques, qui seront utilisées pour s'ajuster au modèle. Il s'agit donc d'un sous-ensemble du fichier de données phénologiques. Dans ce cas, il contient les trois premières colonnes du fichier de données phénologiques ou seulement un sous-ensemble.

- En mode séquentiel, le début de la phase correspond à la fin de la phase précédente. Dans les autres modes, les phases peuvent se chevaucher. Dans ce cas, chaque phase peut commencer avant la fin de la phase précédente. Si nécessaire, T0 (date de début) est installé.

Une fois l'algorithme d'optimisation terminé, PMP affiche le résultat de l'optimisation différente dans une table et le résultat de chaque optimisation sous cette table.

Les statistiques affichées par PMP sont:

SS_{tot}: Total sum of square of the data

$$SS_{tot} = \sum_{i=1}^n (X_{obs_i} - \bar{X}_{obs})^2$$

SS_{res}: Residual sum of squares

$$SS_{res} = \sum_{i=1}^n (X_{obs_i} - X_{pre_i})^2$$

RMSE: Root means squared error

$$RMSE = \sqrt{\frac{SS_{res}}{n}}$$

EFF: Efficiency

$$EFF = \frac{(SS_{tot} - SS_{res})}{SS_{tot}}$$

Où X_{obs} et X_{pre} sont les valeurs observées et simulées de chaque stade phénologique,

\bar{X}_{obs} est la valeur moyenne du jeu de données observé et avec n le nombre d'observations utilisées pour correspondre au modèle.

III.3.4.2. Description des fonctions utilisées dans la modélisation

A/ Chuine

Cette fonction est unimodale et symétrique. Elle a été décrite dans Chuine (2000). Elle a trois paramètres, a , b et c .

- a , détermine la largeur de la fenêtre sur laquelle la fonction n'est pas nulle. $a \in [0,10]$; plus a est grand, plus la plage de températures sur laquelle les unités de froid sont accumulées est large.
- b , détermine la netteté de la courbe de réponse et son asymétrie. $b \in [-30,15]$; plus b diffère de zéro, plus le contraste est net et asymétrique.
- c , détermine la valeur de réponse moyenne lorsque b est proche de zéro et une limite à la plage de températures au-delà de laquelle les unités de froid s'accumulent, lorsque b diffère fortement de zéro (voir figure 16).

$$f_{Chuine} = 1 / (1 + \exp [a (Td-c)^2 + b (Td-c)]).$$

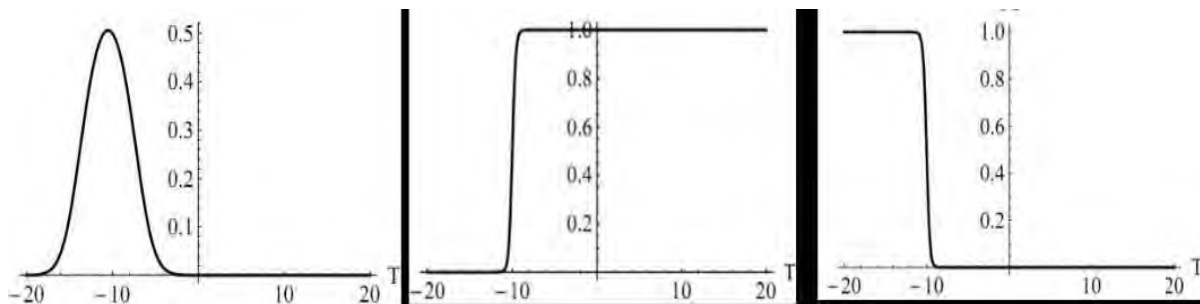


Figure 16 : Fonction f_{Chuine} avec $a = 0,1$ et $c = -10$ et $b = 0,1$ sur le panneau de gauche, $b = -5$ sur le panneau du milieu.

B/ GDD

Cette fonction a été proposée pour la première fois par De Reaumur (1735) et a été jusqu'à présent la fonction la plus utilisée pour décrire la phénologie des espèces. Elle est linéaire au-dessus du paramètre T_b et nul en dessous:

$f_{GDD}(T_d) = \text{Max}(0; T_d - T_b)$ (figure 17).

Où T_b est la température de base et T_d est la température de jour.

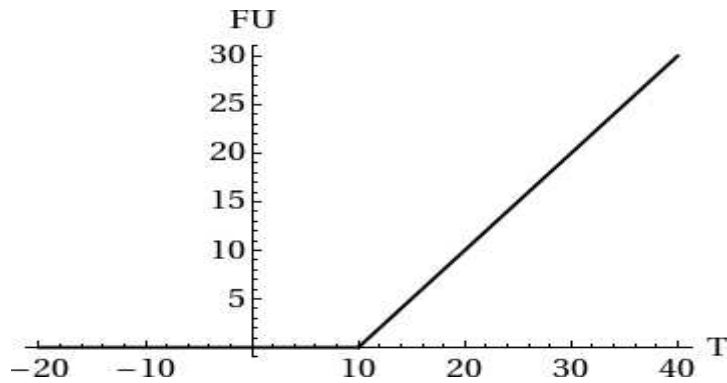


Figure 17 : Fonction de f_{GDD} avec $Q_b=10$.

C/ Parabolic

Cette fonction a été décrite par Chuine et Beaubien (2001) en fonction de l'activité photosynthétique dépendant de la température. Elle a un paramètre de température optimale. Elle est décrite par une fonction polynomiale du troisième ordre:

$$f_{Parabolique} = m T_d^3 + n T_d^2 + o T_d + p$$

si $(\text{div}1 = 0)$ ou $(\text{div}2 = 0)$ ou $(\text{div}3 = 0)$ alors $f_{Parabolique} = 0$ avec

$$o = -5700 T_{opt} (35 T_{opt} - 950) / \text{div}1$$

$$p = 100 + T_{opt} o (27075 - 1330 T_{opt} + 19 T_{opt}^2) / \text{div}2$$

$$n = o (475 - \sqrt{T_{opt}}) / \text{div}3$$

$$m = - (35 n + o) / 1425$$

$$\text{div}1 = 19 - 1330 + 15675 + 266000 T_{opt} + 760000$$

$$\text{div}2 = 57 (35 T_{opt} - 950)$$

$$\text{div}3 = T_{opt} (35 T_{opt} - 950).$$

D/ Richardson

Cette fonction a été introduite pour la première fois par Richardson et al. (1974). Il s'agit d'une version modifiée de la fonction GDD avec un plateau supérieur au paramètre de seuil *Thigh* : $f_{Richardson}(T_d) = \text{Max}(\text{Min}(T_d - T_{low}, T_{high} - T_{low}), 0)$ (figure 18)

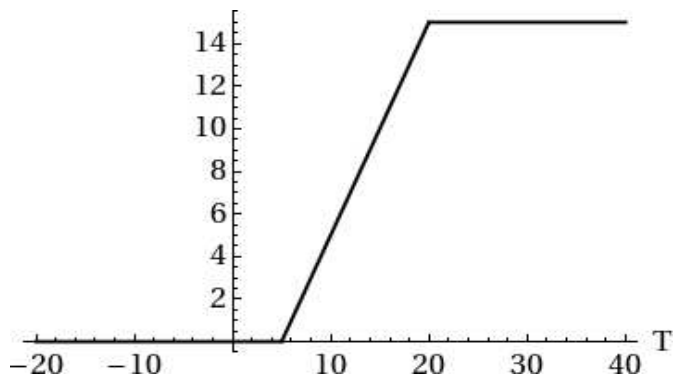


Figure 18 : Fonction $f_{Richardson}$ avec $T_{high} = 20$, $T_{low} = 5$.

E/ Inverse de Richardson

C'est l'inverse de la fonction de Richardson, atteignant un plateau inférieur à un seuil de température *Tlow*.

$f_{Richardson_inverse}(T_d) = \text{Max}(\text{Min}(T_{high} - T_d, T_{high} - T_{low}), 0)$ (figure 19).

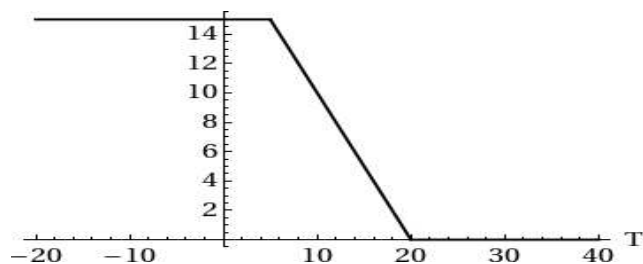


Figure 19 : Fonction $f_{Richardson_inverse}$ avec $T_{high}=20$, $T_{low}=5$.

F/ Sigmoide

Cette fonction a été introduite pour la première fois par Hänninen (1990b). Elle a deux paramètres: a et b.

- a définit la netteté de la réponse, les valeurs éloignées de zéro induisent une courbe de réponse plus nette.
- b est la température de réponse moyenne.

$f_{\text{Sigmoide}}(T_d) = 1 / (1 + \exp [a (T_d - b)])$ (figure 20).

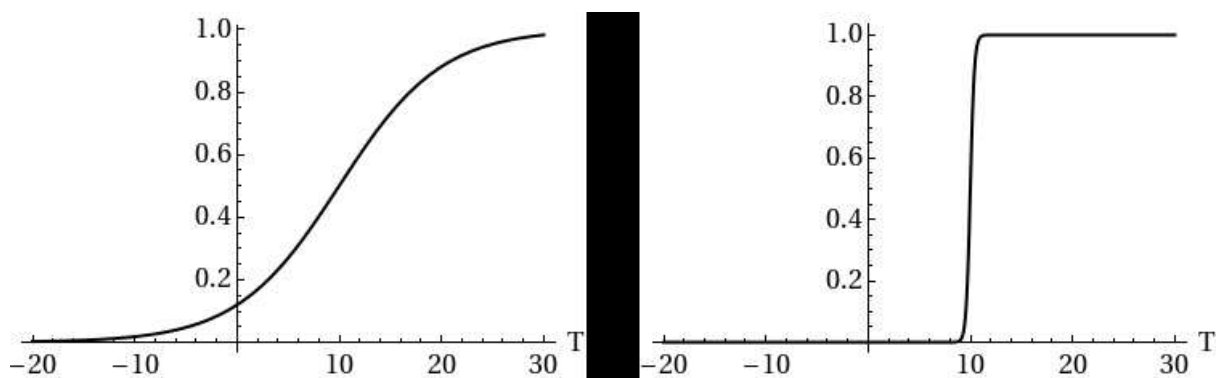


Figure 20 : Fonction f_{Sigmoide} avec $b = 10$ et $a = -0,2$ sur le panneau de gauche et $b = -5$ sur le panneau de droite.

G/ Smoothed Utah

Cette fonction a été introduite pour la première fois par Bonhomme et al. (2010) et est une version lissée de la fonction Utah proposée par Richardson et al. (1974). Cette fonction suppose que les unités de froid ne peuvent s'accumuler que dans une plage de températures et comportent quatre paramètres: T_{m1} , T_{opt} , T_{n2} et min . Des valeurs d'unités de froid négatives peuvent être accumulées pendant les jours chauds, augmentant ainsi la quantité de froid à atteindre. La fonction a été introduite par Bonhomme et al. (2010).

- T_{opt} définit la température quotidienne moyenne optimale, pour laquelle une unité de froid est accumulée chaque jour.
- T_{m1} définit la netteté de la diminution de l'efficacité du froid pour l'endormance des bourgeons. Plus le T_{m1} est bas, plus cette diminution est lente.
- T_{n2} définit la réponse moyenne, c'est-à-dire la température (supérieure à T_{opt})

qui a la moitié de l'efficacité de T_{opt} pour induire une endodormance.

- min définit l'impact négatif des températures trop élevées. Lorsque $min = 0$, les températures élevées n'ont pas d'impact négatif sur la libération de l'endodormance; quand $min = -1$, l'impact négatif d'une journée trop chaude équivaut à l'effet positif d'une journée à T_{opt} (figure 21).

$$f_{Smoothed\ Utah}(Td) = \frac{1}{1+e^{-4\frac{Tn2-Td}{Tn2-Topt}}} \quad \text{if } Td > Tm1$$

$$\frac{0,5(Td-Topt)2}{(Tm1-Topt)2} \quad \text{if } Tm1 < Td < Topt$$

$$1-(1-min)\frac{(Td-Topt)2}{2(Tn2-Topt)2} \quad \text{if } Topt < Td < Tn2 \quad (34)$$

$$min + \frac{1-min}{1+e^{-4\frac{Tn2-Td}{Tn2-Topt}}} \quad \text{if } Tn2 < Td$$

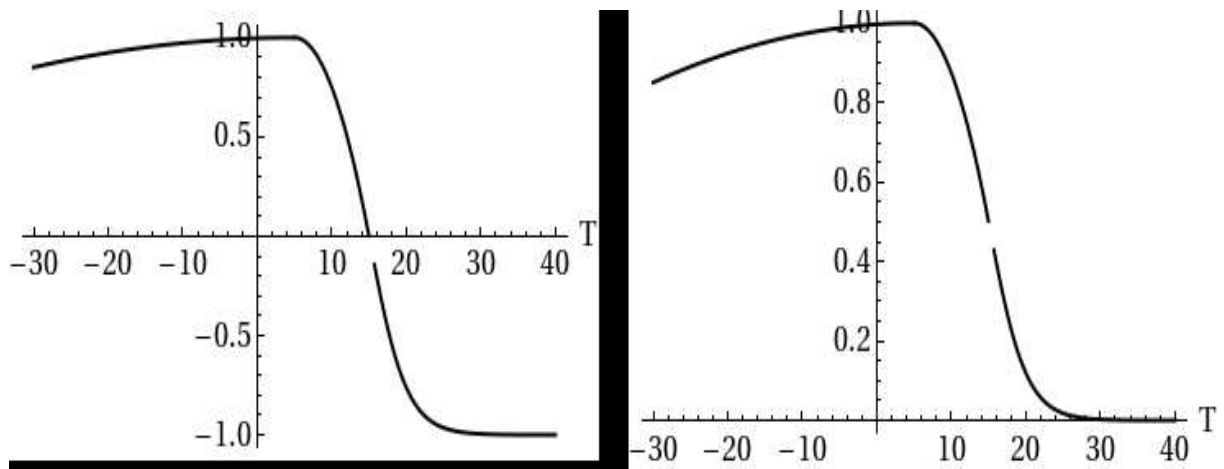


Figure 21 : Fonction $f_{SmoothUtah}$ avec $T_{opt} = 5$, $T_{m1} = -50$, $T_{n2} = 10$ et $min = 0$ sur le panneau de gauche, -1 sur le panneau de droite.

H/ Threshold supérieur

Cette fonction peut être considérée comme un cas particulier de la fonction sigmoïde lorsque le paramètre α est très élevé, de sorte que la pente au point d'inflexion est verticale.

Il a un paramètre T_b .

$$f_{\text{Threshold_supérieur}}(T_d) = 1 \text{ if } T_d > T_b \quad 0 \text{ if } T_d \leq T_b.$$

I/ Wang

Cette fonction a été définie pour la première fois par Wang et Engel (1998). Elle a un optimum et n'est pas symétrique. Cela concerne la famille de la fonction bêta. Elle a trois paramètres T_{opt} , T_{min} et T_{max} (figure 22)

$$f_{\text{Wang}} = \text{Max} \left[(2(T_d - T_{min})^\alpha (T_{opt} - T_{min})^\alpha - \frac{(T_d - T_{min})^{2\alpha}}{(T_{opt} - T_{min})^{2\alpha}}), 0 \right]$$

$$\text{avec } \alpha = \ln(2) / \ln \left(\frac{T_{max} - T_{min}}{T_{opt} - T_{min}} \right).$$

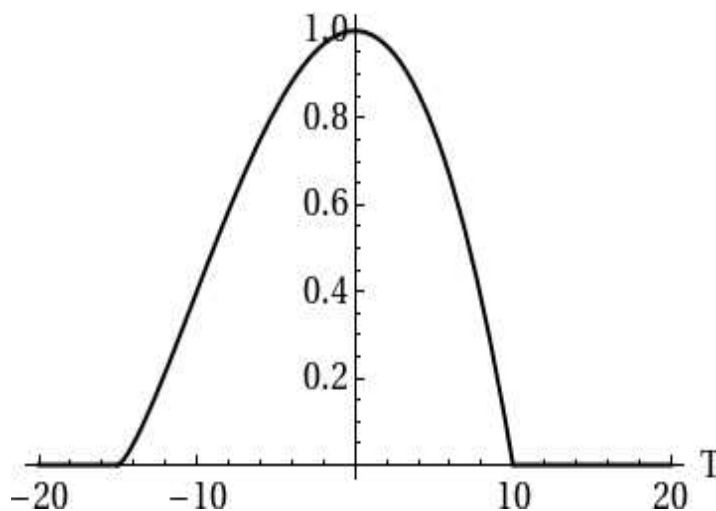


Figure 22 : Fonction f_{Wang} avec $T_{opt} = 0.1$, $T_{min} = -15$, $T_{max} = 10$.

III.4. Analyses statistiques

III.4.1. Données climatiques

Des corrélations de Spearman ont été effectuées sur les températures maximales, minimales et moyennes annuelles et mensuelles pendant les mois d'accumulation de froid (allant d'octobre à février) et de chaleur (à partir de février jusqu'à mai), dans les trois sites, afin de déterminer les tendances climatiques dans ces derniers et voir là où il y a un réchauffement climatique. La recherche d'éventuelle tendance dans l'évolution des besoins en unités de froid et de chaleur est effectuée via le test de Mann-Kindall et la pente de Sen.

III.4.2 Données phénologiques

Les dates de débourrement et de floraison pour les deux cultivars respectivement 'Golden Delicious' du pommier et 'Muscat Italia' de la vigne ont été converties en jours calendaires à partir du mois de janvier pour leur analyse. Des analyses de régression des données phénologiques en fonction des années avec une donnée mobile de deux ans ont été effectuées.

III.4.2.1. Recherche de corrélations entre les températures et les dates phénologiques

Le test non paramétrique de Spearman a été utilisé pour détecter des changements dans la série de température. Le test n'exige pas que les données soient distribuées normalement (Viola et al, 2013). Après l'identification des phases majeures (périodes d'accumulation des unités de froid et de chaleur), le test de Spearman a été réalisé pour mettre en évidence les corrélations qui existent entre les températures maximales, minimales et moyennes pendant la période d'accumulation des unités de froid et la période d'accumulation des unités de chaleur. D'autres corrélations ont été mises en évidence entre les températures et les dates de débourrement et de floraison des deux espèces, afin de mieux comprendre la période qui affecte le plus la date de débourrement et de floraison et par la suite le mois

qui joue un rôle prépondérant dans le début d'accumulation des besoins en unités de froid et de chaleur.

III.4.2.2. Analyse PLS

L'analyse de régression des moindres carrés partiels (RMCP ou PLS) a été utilisée pour déterminer avec précision la période d'accumulation des quantités de froid affectant la levée de l'endo-dormance des bourgeons (Lang, 1987) et la période d'accumulation des quantités de chaleur affectant le développement des bourgeons en induisant à leur floraison. C'est une approche statistique qui sert à modéliser la liaison entre la température et la phénologie (Luedeling et Gassner, 2012 ;Guo et al, 2013).

Deux variables ont été définies, une dépendante (réponse) correspondant au débourrement ou à la floraison et une autre explicative indépendante, correspondant à la moyenne mobile de la température moyenne journalière pour 11 jours, depuis octobre jusqu'à mai durant la période étudiée (pour s'assurer que les phases dans lesquelles la température a des effets importants sur la progression de la dormance sont clairement reconnaissables dans les résultats des procédures statistiques) (Luedeling et Gassner, 2012).

L'analyse a pris en compte les données des mois qui correspondent aux périodes d'accumulation des unités de froid et de chaleur. En plus, l'analyse des données a été menée selon le protocole décrit par Guo et al (2013). L'analyse PLS produit deux résultats majeurs, en terme de la valeur statistique ; Variable-importance-in-the projection ou importance de la variable dans la projection (VIP) qui indique si certaines variables sont importantes pour expliquer ou non la variation de la variable dépendante. Les valeurs supérieures à 0.8 sont généralement considérées comme significatives. Dans le contexte des dates de floraison, cela signifie que, pendant les phases où les coefficients du modèle sont positifs (courbes en vert), les températures élevées semblent retarder la floraison (conduisant à un nombre de jours julien plus grand, ce qui signifie une date ultérieure). Lorsque les coefficients sont négatifs (courbes en rouge), les températures élevées semblent avoir un effet d'avancement de la floraison. Les courbes en bleu en haut de chaque graphique indiquent sur les valeurs de VIP (variable important dans la projection) supérieures à 0.8 choisi comme seuil (indiqué par la ligne rouge). Les phases les plus pertinentes pour expliquer les dates de floraison sont donc

les phases ayant des scores VIP supérieurs à 0.8 et des coefficients de modèle positifs ou négatifs élevés (Wold, 1995 ; Luedeling et al, 2013a).

La quantification des besoins en unités de froid se fait à partir des résultats de PLS et en délimitant la phase d'accumulation du cumul de froid. Selon Luedeling et al. (2013a), la phase d'accumulation du froid a été identifiée par des coefficients modérés constamment positifs et au moins temporairement importants (selon le score VIP). Les coefficients positifs du modèle indiquent que les températures chaudes pendant le jour respectif retardent la floraison. Ceci est conforme à la notion d'une exigence en froid, selon laquelle des températures extraordinairement chaudes devraient retarder la levée de la dormance des arbres et conduire ainsi à une floraison plus tardive.

CHAPITRE IV

RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1. Caractérisation du réchauffement climatique en Algérie

IV.1.1. Evolution spatio-temporelle des températures

IV.1.1.1. Tendances annuelles

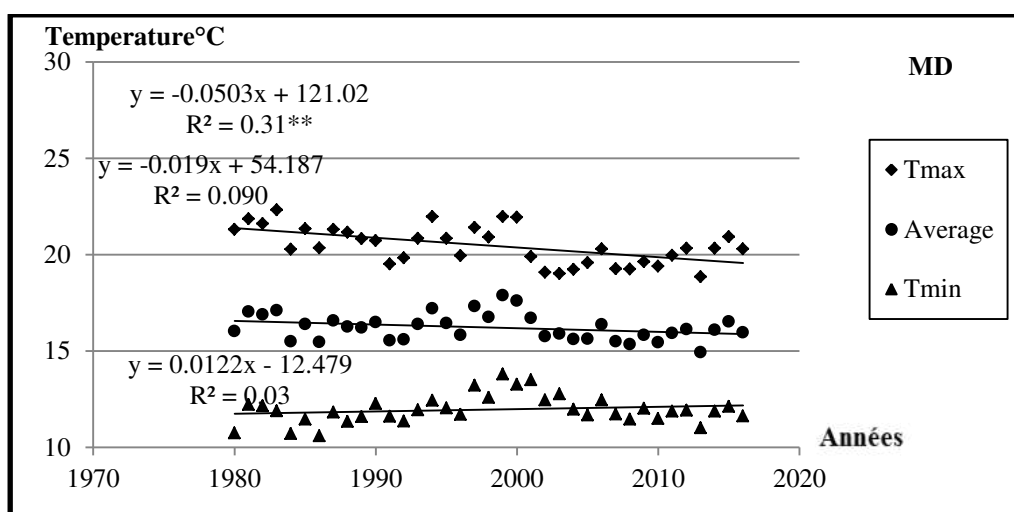
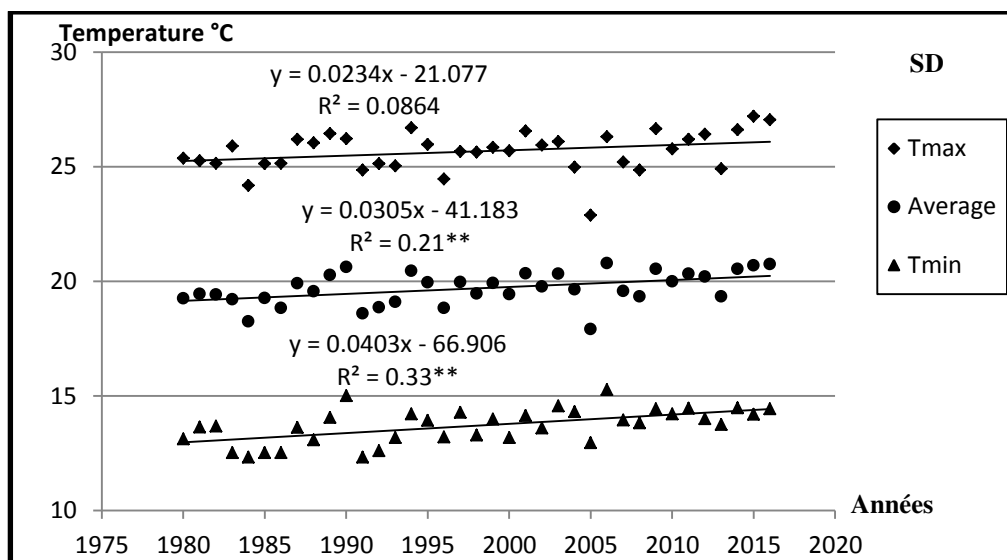
Les moyennes annuelles des températures moyennes, minimales et maximales pour les trois sites sont présentées dans la figure 23 et le tableau 9. La régression linéaire des températures moyennes annuelles sur les 36 années disponibles a révélé un réchauffement significatif (0.52^{***}) au site de Sidi Lakhdar (SD) et au site de Boumedfaa (BM) (0.50^{***}) de la wilaya d'Ain Defla, avec un accroissement hautement significatif de la moyenne annuelle des températures minimales (0.51^{***}) au site Sidi Lakhdar et d'une façon moindre au site Boumedfaa (0.36^{**}). A l'opposé, une augmentation hautement significative est survenue au niveau des températures maximales dans le site de Boumedfaa (0.56^{***}) comparée au site de Sidi Lakhdar (0.32^*).

Les températures moyennes annuelles les plus élevées ont été enregistrées respectivement au cours des années 2006, 2016, 2015 et 1997 oscillant entre 16.85°C à 16.34°C au site Sidi Lakhdar, alors qu'elles étaient de 14.77°C à 14.58°C successivement au cours des années 2006, 2015, 2014 et 2016 dans le site de Boumedfaa.

En l'occurrence, on constate plutôt une tendance au refroidissement, quoique non significative au site de Benchicao concernant la moyenne annuelle où les températures maximales ont connu une certaine régression significative (-0.53^{***}) (voir tableau 9). Un accroissement des moyennes annuelles a été soulevé durant les années 2000, 1981, 1997 et 2016 avec des valeurs allant de 13.16°C à 12.58°C .

Tableau 9 : Moyennes annuelles moyennes, minimales et maximales dans les trois sites étudiés avec leurs coefficients de régression obtenus par l'analyse de Spearman.

Température annuelle	Sidi Lakhdar (SD)			Boumedfaa (BM)			Benchicao(MD)		
	Moy	R	P	Moy	R	P	Moy	R	P
T° moyenne	20.0°C	0.52***	0.001	13.5°C	0.50***	0.002	16.2°C	-0.31*	0.06
T° minimale	14.0°C	0.51***	0.001	10.0°C	0.36**	0.02	12.0°C	0.16	0.34
T° maximale	26.0°C	0.32*	0.04	17.5°C	0.56***	0.0002	20.5°C	-0.53***	0.001



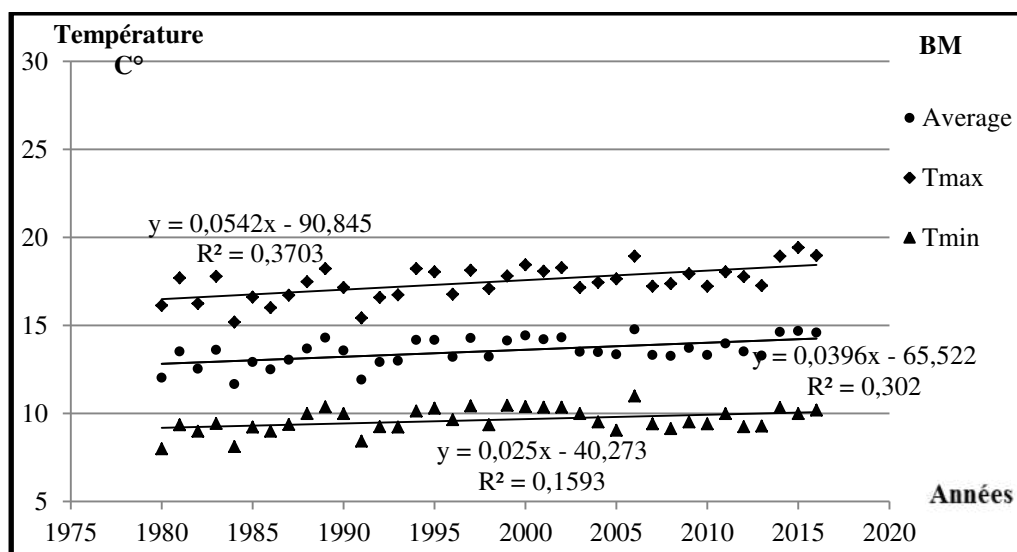


Figure 23 : Moyennes annuelles des températures (minimales, moyennes, maximales) des trois sites, Sidi Lakhdar (SD), Boumedfaa (BM) et Benchicao (MD) de 1980 à 2016. (*indique le niveau de signification des corrélations (*P <0.05; ** P <0.01).

IV.1.1.2. Tendances pour la période automne-printemps

Une analyse saisonnière à partir des 36 années disponibles montre des différences marquées entre les trois sites. Les tendances de températures moyennes mensuelles des mois d'octobre à mai (Températures quotidiennes minimales, moyennes et maximales) mesurées durant la période de 1980 à 2016 pour les trois sites (Sidi Lakhdar, Boumedfaa et Benchicao) sont synthétisées dans le tableau 10 et la figure 24. Les valeurs de corrélation entre les températures moyennes, maximales et minimales et les années sont présentées dans le tableau 10 où R est le coefficient de corrélation et p est le niveau de signification.

Nous nous sommes focalisés sur la période d'octobre à mai qui est la période affectant le plus les processus physiologiques associés à la phénologie printanière des bourgeons floraux des arbres fruitiers dans notre région.

Les températures moyennes d'octobre sont élevées et augmentent significativement aux sites de Sidi Lakhdar et de Boumedfaa. Le mois d'avril se réchauffe aussi significativement sur ces deux sites (Tableau 10, figure 24). Le mois de mai s'est montré aussi chaud au site de Sidi Lakhdar et d'une façon moindre au site de Boumedfaa. Aucune

tendance significative n'est enregistrée pour les autres mois. Les corrélations effectuées sur les tendances des températures mensuelles ont montré aussi clairement un réchauffement estival significatif en juillet au site de Sidi Lakhdar (données non-présentées).

En revanche, au site de Benchicao, comme déjà signalé précédemment, aucun réchauffement significatif n'est enregistré pour les températures moyennes au cours des 36 années. Au contraire, on enregistre une baisse des températures moyennes en novembre et février et d'une façon moindre en mars ($P=0.007^{**}$ et $P=0.005^*$, $P=0.03^*$, respectivement).

Concernant les températures minimales moyennes, les plus faibles valeurs ont été enregistrées durant le mois de janvier pour les trois sites avec 6.1°C , 6.4°C et 4.6°C , respectivement à Boumedfaa, Sidi Lakhdar et Benchicao.

La plus grande valeur de température minimale 12.1°C et la plus faible valeur 8.2°C ont été enregistrées par ordre en 2006 et 1991 au site de Sidi Lakhdar pour le mois de janvier, tandis que la plus grande valeur et la plus petite valeur au site de Boumedfaa ont été respectivement de 8.56°C en 1996 et 3.5°C en 1981. Au site de Benchicao, la plus grande valeur de 9.7°C a été enregistrée en 2000 comparé à une plus faible valeur de 6.6°C observée en 1980.

Selon les coefficients de corrélation, une hausse très significative a marqué les mois d'avril et mai dans les sites de Sidi Lakhdar et Boumedfaa, ainsi que le mois d'octobre au site de Sidi Lakhdar, ce qui justifie les tendances de réchauffement de ces deux sites. Au site de Benchicao, une tendance plus au moins significative a été enregistrée au mois d'octobre. En se limitant à la période phénologique (octobre-mai), les sites de Sidi Lakhdar et de Boumedfaa ont connu des températures maximales extrêmes durant les mois d'octobre et d'avril jusqu'en mai et elles étaient plus accentuées au site de Boumedfaa, ce qui explique l'augmentation des températures moyennes durant ces trois mois (figure 24a).

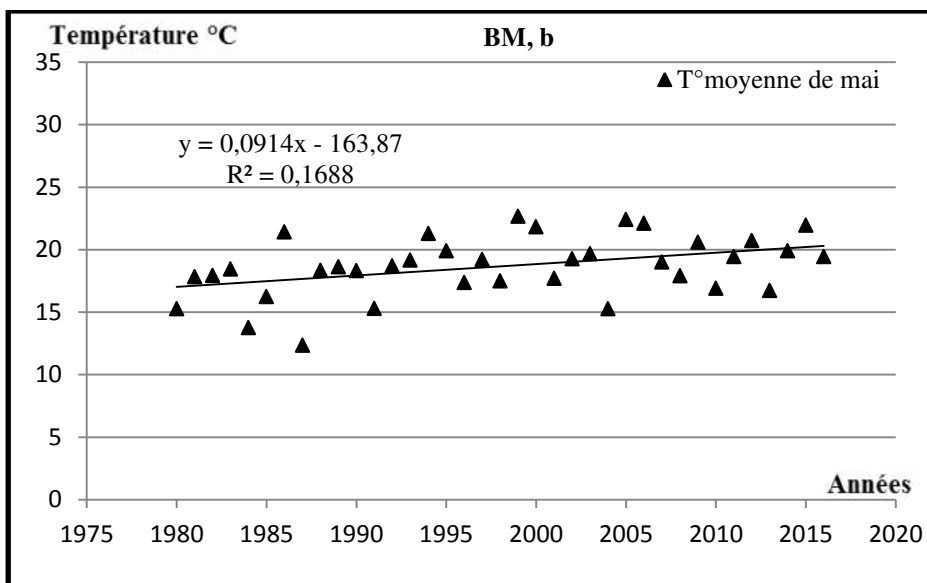
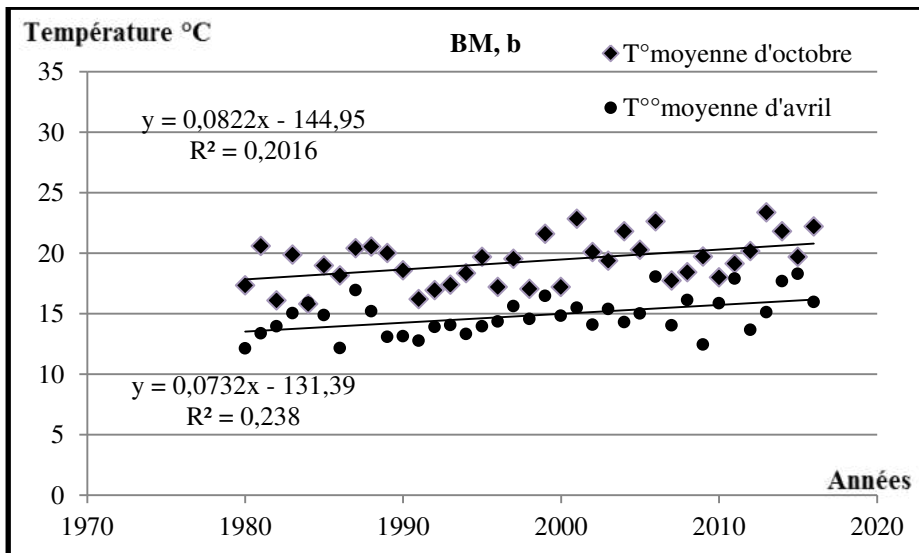
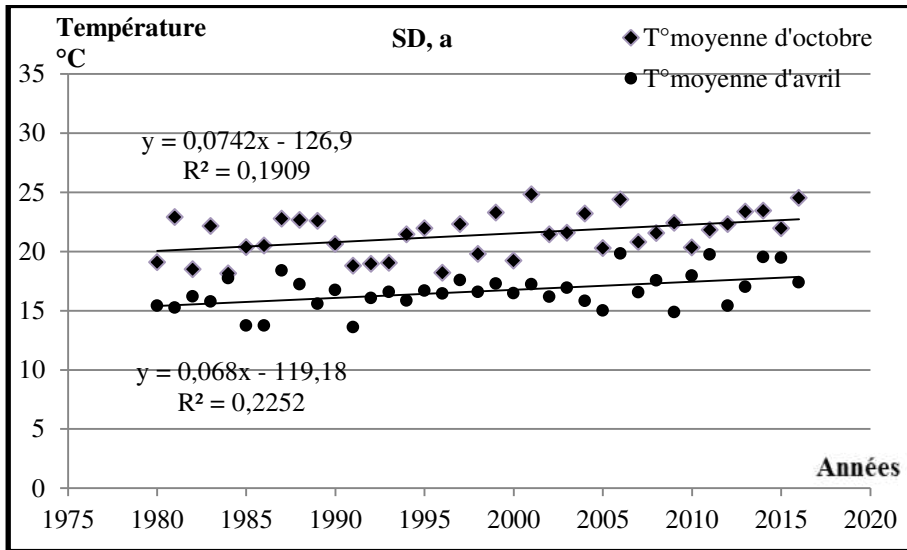
Des régressions significatives des températures maximales ont été enregistrées au site de Benchicao durant les mois de novembre, février et mars.

Tableau 10 : Températures moyennes aux sites de Benchicao, Boumedfaa et Sidi Lakhdar pendant 36 ans (1980-2016).

Mois	Température	Température moyenne de 36 ans (°C)			Coefficient de corrélation R de la tendance et le niveau de signification P					
		Sidi Lakhdar	Boumedfaa	Benchicao	Sidi Lakhdar R	Sidi Lakhdar P	Boumedfaa R	Boumedfaa P	Benchicao R	Benchicao P
Octobre	Moyenne	21.3	19.3	17.4	0.40**	0.01	0.40**	0.015	0.07	0.50
	Maximum	27.0	24.0	21.6	0.38**	0.018	0.44**	0.006	0.14	0.40
	Minimum	6	14.7	13.3	0.44**	0.006	0.31*	0.058	0.36*	0.028
Novembre	Moyenne	15.7	13.5	11.4	-0.004	0.1	-0.030	0.86	-0.40**	0.007
	Maximum	20.3	17.1	14.7	-0.03	0.84	0.006	0.97	-0.43**	0.008
	Minimum	10.8	10.0	8.1	0.11	0.48	-0.099	0.561	-0.17	0.30
Décembre	Moyenne	12.0	10.2	8.0	0.17	0.28	0.23	0.16	-0.16	0.16
	Maximum	16.4	13.3	11	0.10	0.556	0.29	0.077	-0.21	0.20
	Minimum	7.6	7.1	5.2	0.19	0.26	0.142	0.40	0.009	0.966
Janvier	Moyenne	11	9.3	7.3	0.35*	0.03	0.30	0.067	-0.20	0.08
	Maximum	15.3	12.5	10.2	0.24	0.143	0.30	0.064	-0.20	0.23
	Minimum	6.4	6.1	4.6	0.32	0.051	0.23	0.17	0.10	0.54
Février	Moyenne	11.9	10.0	8.1	0.11	0.48	-0.059	0.72	-0.32**	0.005
	Maximum	16.8	13.6	11.2	0.047	0.783	-0.062	0.71	-0.47**	0.003
	Minimum	6.8	6.5	5.0	0.16	0.34	-0.086	0.61	-0.22	0.18
Mars	Moyenne	14.2	12.5	10.5	0.01	0.51	0.14	0.40	-0.23	0.03
	Maximum	20.0	16.6	14.3	0.008	0.961	0.11	0.48	-0.47**	0.030
	Minimum	8.5	8.4	6.8	0.25	0.13	0.065	0.70	-0.025	0.88
Avril	Moyenne	16.6	15.0	13.3	0.42**	0.008	0.47**	0.003	-0.07	0.51
	Maximum	23.0	19.3	17.5	0.36*	0.027	0.46**	0.004	0.012	0.565
	Minimum	10.4	10.4	9.03	0.50**	0.002	0.43**	0.007	0.18	0.28
Mai	Moyenne	21.0	19.0	17.9	0.32*	0.04	0.40**	0.014	-0.1	0.38
	Maximum	27.9	23.6	22.7	0.21	0.19	0.42**	0.009	-0.014	0.403
	Minimum	14.3	14.0	3.0	0.40**	0.012	0.32*	0.050	0.089	0.600

P* < 0.05

P** < 0.01



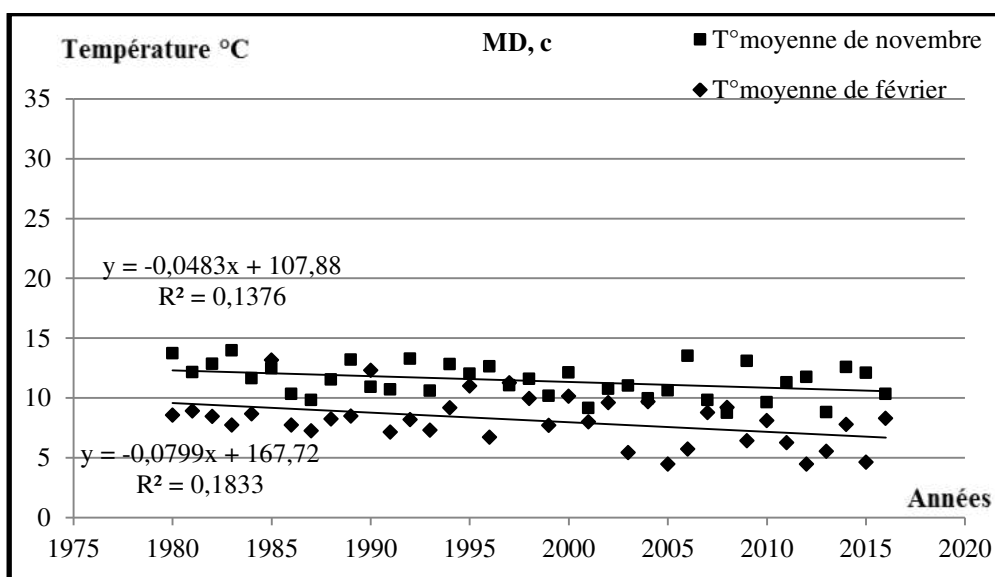


Figure 24 : Evolution des températures moyennes mensuelles sur les 3 sites pour les mois où la tendance est significative, a) Sidi Lakhdar pour les mois d'octobre et d'avril, b) Boumedfaa pour les mois d'octobre, d'avril et de mai, c) Benchicao pour les mois de novembre et février. Les * indiquent le niveau de signification de la corrélation (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$).

IV.1.2. Précipitations

Les cumuls moyens annuels des précipitations dans les trois sites ont connu une forte divergence reflétant l'effet combiné du relief et du climat. En effet des moyennes annuelles de 382 mm et 404 mm ont été enregistrées durant la période de 1980 à 2016 aux sites de Sidi Lakhdar (SD) et de Boumedfaa (BM) respectivement, et une moyenne de 558 mm au site de Benchicao (MD) durant la période 1987 à 2016. Les années les plus pluvieuses ont été : 1995 et 2008 au site Sidi Lakhdar, 2015 et 2016 au site Boumedfaa et 2003 et 2007 au site de Benchicao, avec des quantités de 528 mm et 518 mm, 568 mm et 581 mm et enfin, 899 mm et 946 mm.

Néanmoins, les quantités de précipitations les plus faibles ont été signalées durant les années 1993 et 1999, allant de 185 mm et 207 mm au site de Sidi Lakhdar et de 174 mm et 240 mm au site de Boumedfaa. Au site de Benchiaco des quantités de 301 mm et 278 mm

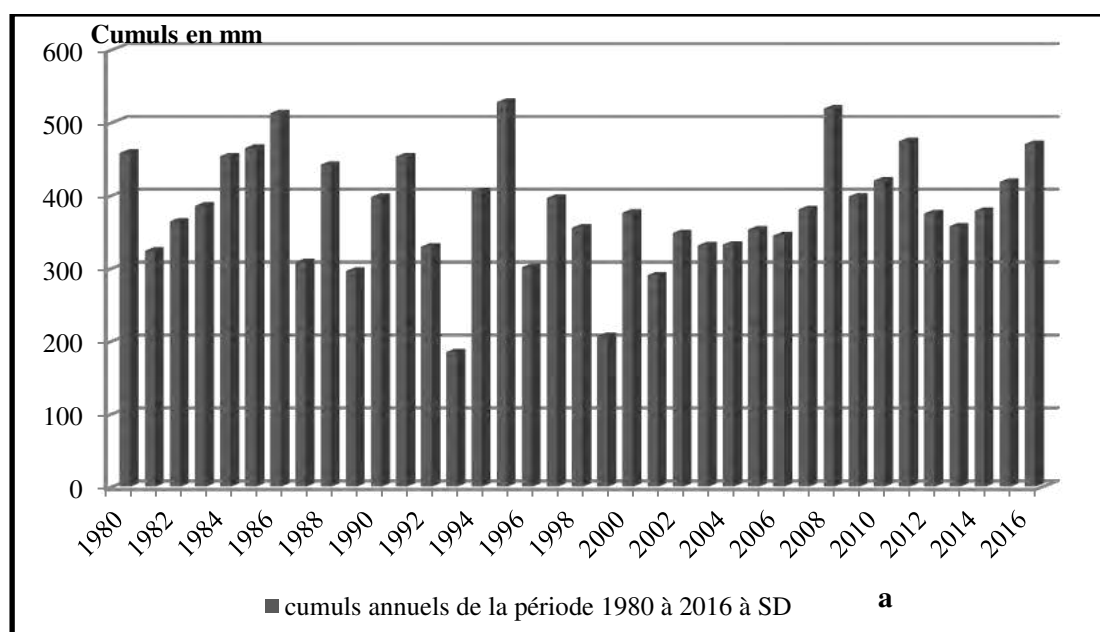
seulement ont été enregistrées durant les années 1988 et 1994 (figure 25a, b et c).

Afin d'étudier les cumuls mensuels dans les trois sites étudiés, la série s'étalant de 1980 à 2016 a été divisée en deux périodes, l'une est de 1980 à 1998 et l'autre de 1999 à 2016 pour les sites de Sidi Lakhdar et Boumedfaa, alors qu'à Benchicao la série de 1987 à 2016 a été divisé en deux périodes : de 1987 à 1998 et de 1999 à 2016.

Durant la première période(1980 à 1998), le mois de février était le plus pluvieux avec un cumul de 57 mm et 61 mm à Sidi Lakhdar et Boumedfaa, et le mois de mai au site de Benchicao avec un cumul de 46 mm.

Une tendance à un accroissement des quantités de précipitation a été relevé durant la période 1999 à 2016 pour les trois sites et pour l'ensemble des mois comparé à la première période 1980 à 1998 et 1987 à 1998, notamment le mois de novembre et février aux sites de Sidi Lakhdar et Boumedfaa et où les valeurs moyennes ont atteint les 64 mm et 58 mm à SD, ainsi que 68 mm et 70 mm à BM (figure 26 a et b)

Selon la figure 26c, l'augmentation des quantités de précipitations a été de plus en plus prononcé pour l'ensemble des mois au site de Benchicao durant cette période, et les mois les plus pluvieux étaient novembre, décembre et février avec des valeurs moyennes respectivement de 94 mm, 103 mm et 98 mm. Néanmoins, les mois de mars, avril et mai ont connu une élévation importante des cumuls de précipitation comparée à la période 1987 à 1998 du même site et aux deux périodes des autres sites étudiés.



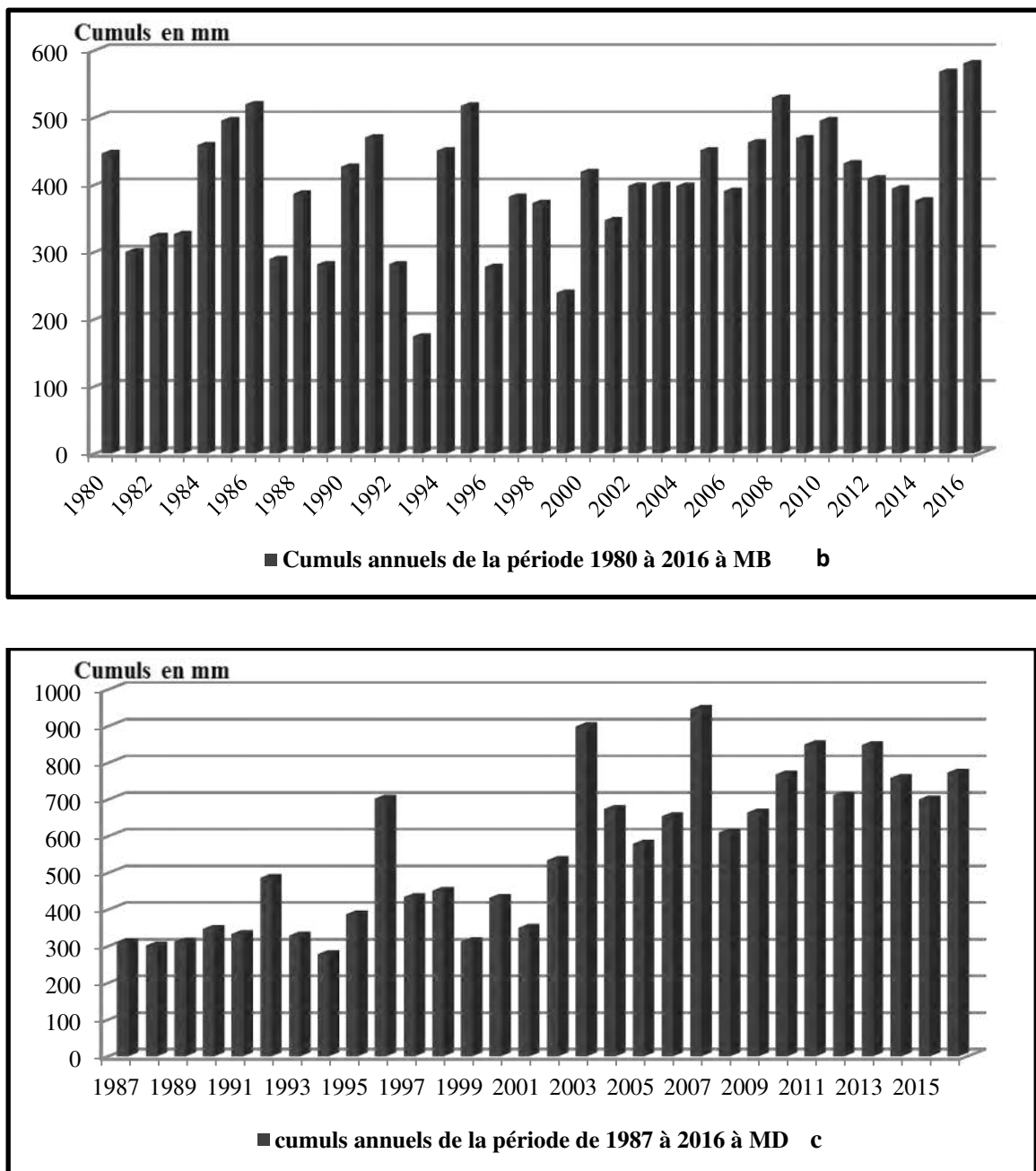


Figure 25: Cumuls moyens annuels des précipitations, a) Sidi Lakhdar, b) Boumedfaa durant la période 1980 à 2016 et c) Benchicao durant la période 1987 à 2016

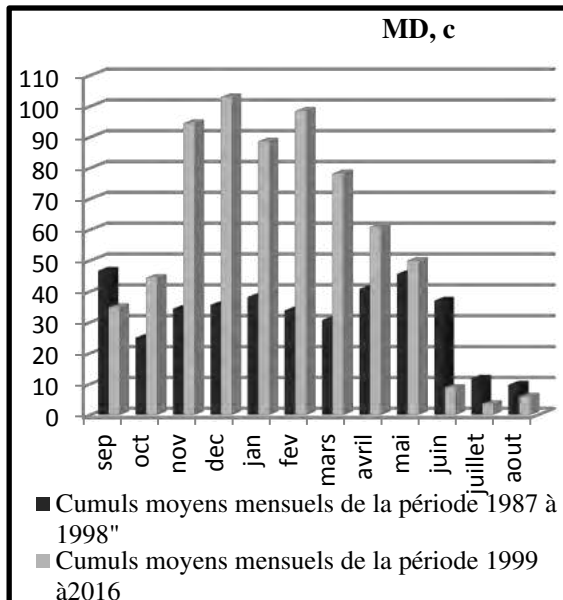
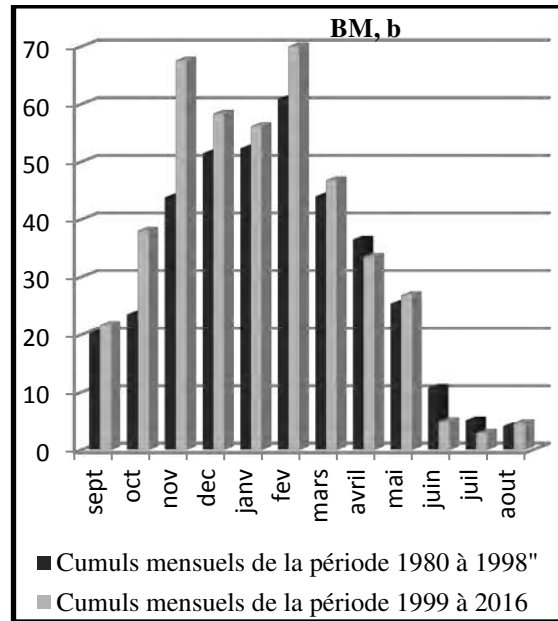
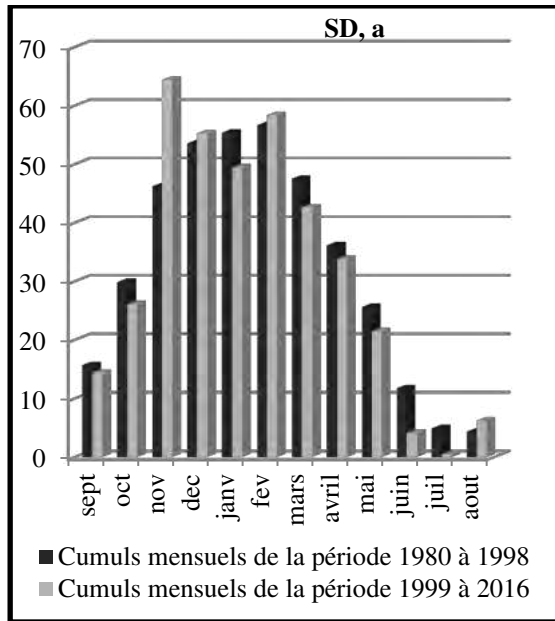


Figure 26 : Cumuls moyens mensuels des précipitations, a) Sidi Lakhdar, b) Boumedfaa durant les deux périodes 1980 à 1998 et 1999 à 2016 et c) Benchicao durant les deux périodes 1987 à 1998 et 1999 à 2016.

IV.1.3. Caractéristiques et tendances des quantités de froid et de chaleur

Les disponibilités en unités de froid et de chaleur ont été quantifiées pour chaque site selon les différents modèles, la recherche des tendances annuelles et saisonnières a été effectuée par le test de Mann-Kindall et la pente de Sen. Les résultats sont présentés dans les tableaux 11 et 12 et les figures 27 et 28.

IV.1.3.1. Tendances des quantités de froid

Une forte fluctuation a caractérisé les cumuls annuels de froid calculés entre les trois sites d'étude reflétant leur divergence spatio-temporelle. Les valeurs engendrées dans le tableau 11 révèlent une forte supériorité des quantités en unités de froid accumulées au site de Benchicao par rapport aux deux autres sites, Sidi Lakhdar et Boumedfaa. Selon la figure 27, les deux modèles Utha et Caroline du Nord ont donné les meilleurs résultats en quantités de froid sur les trois sites étudiées.

Schématiquement, la tendance globale des quantités en unités de froid accumulées a été caractérisée par un accroissement progressif au site de Benchicao pour l'ensemble des modèles, mais elle était plus accentuée avec le modèle Weinberger (tableau 11). Il est à signaler que l'évolution des quantités en unités de froid a été marquée par trois périodes, une progression de celle-ci, à partir de la série 1981 à 1991 pour atteindre une baisse depuis 1991 à 1999 arrivant à une autre progression plus importante que la première durant la période de 2000 à 2016.

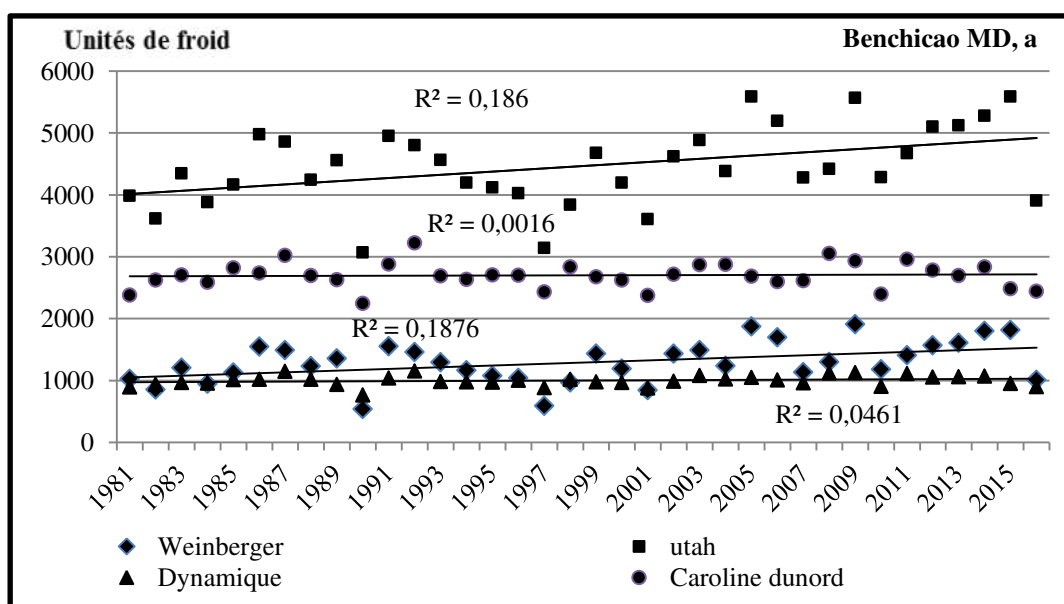
Une régression notable a marqué la tendance globale de l'évolution des quantités de froid aux deux sites, Sidi Lakhdar et Boumedfaa pour tous les modèles utilisés, notamment Weinberger à Sidi Lakhdar. L'évolution des quantités de froid dans ce dernier site a connu une élévation durant les années 1983 à 1987 et 2005 à 2006. Cependant, une forte régression a été observée durant les années, 1990, 1997, 2001, 2007, 2010 et 2016 où le cumul de froid a oscillé entre 462 et 918 unités de froid (figure 27 b).

Au site de Boumedfaa, le bilan est globalement le même que celui de Sidi Lakhdar, les quantités de froid accumulées ont été inférieures ou atteignant approximativement 2500 unités de froid sur l'ensemble des modèles de calculs. Les années 1992, 2009 et 2014 ont enregistré des quantités importantes d'unités de froid allant de 2378 à 2680 et les quantités les plus faibles ont été soulevées durant les années 1990, 2001, 2010 et 2016 oscillant entre 1350 et 1642 unités de froid.

Tableau 11: Tendances et moyennes annuelles des quantités de froid et de chaleurs accumulées selon différents modèles à Benchicao, Sidi Lakhdar et Boumedfaa.

Modèles	Sites						Moyennes		
	Benchicao		Sidi Lakhdar		Boumedfaa		Benchicao	Sidi-Lakhdar	Boumedfaa
	P	Pente	P	Pente	P	Pente			
Weinberger (0°- 7°C)	0.01	14.24*	0.05	-6.00	0.19	-5.5	1291	399	684
Utah	0.14	5.77	0.19	-8.65	0.36	-7.41	2234	761	1505
Dynamique	0.14	0.19	0.14	-0.29	0.23	-0.2	10001	552	808
Caroline du Nord	0.75	0.90	0.23	-6.05	0.42	-4.29	2701	1454	2155
GDH (Chaleur)	0.03	-91.3*	0.006	123.7***	0.005	124.74***	25821	37388	31308

*P< 0.05, **P< 0.01, ***P< 0.001.



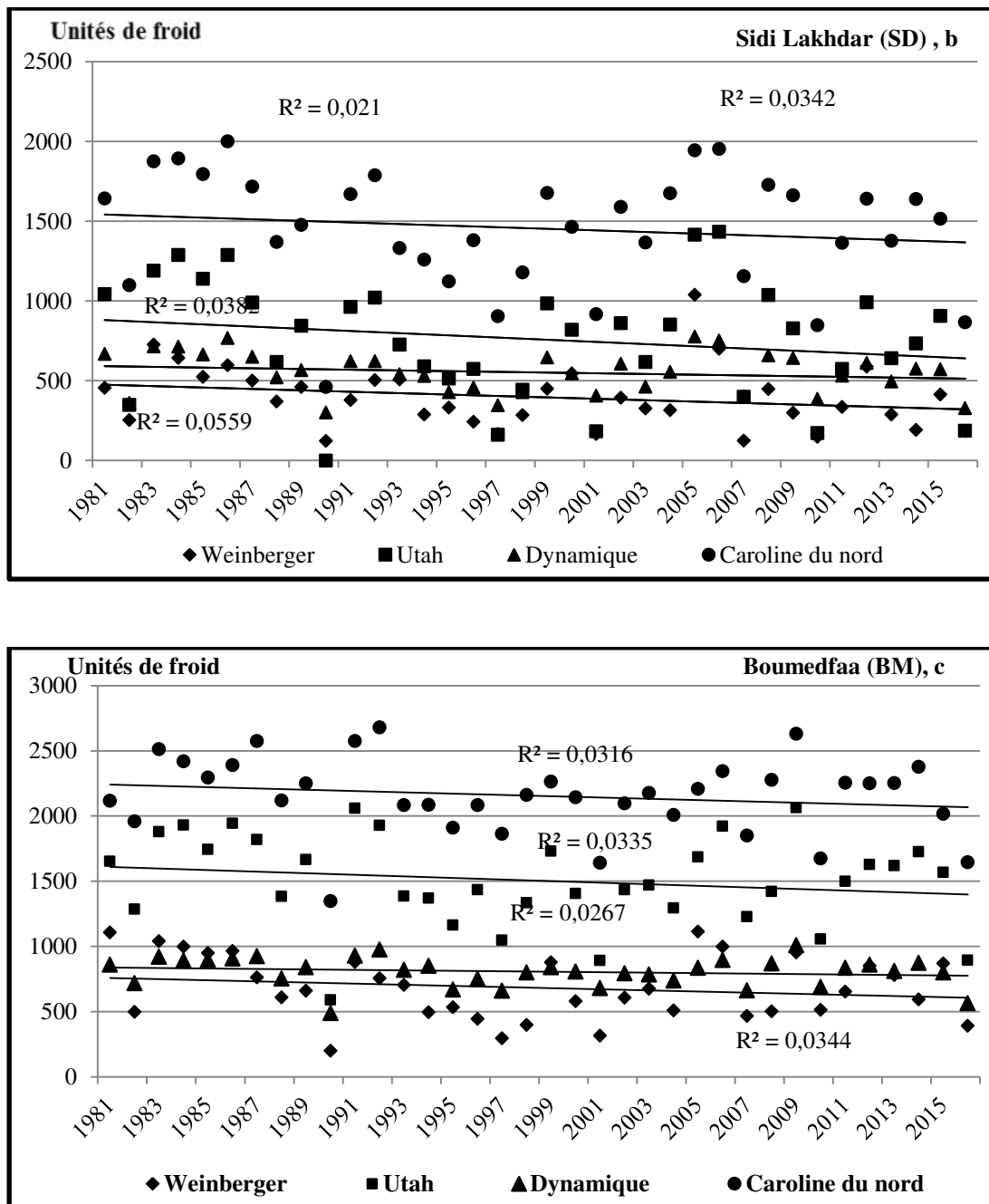


Figure 27 : Évolution des quantités annuelles des unités de froids calculées avec quatre modèles (Weinberger, Utah, Dynamique et Caroline du Nord) dans les trois sites d'étude, a) Benchicao, b) Sidi Lakhdar, c) Boumedfaa.

Pour avoir une vision plus détaillée de l'évolution des tendances des unités de froid accumulées, une analyse mensuelle a été effectuée à l'aide du test de Mann-Kindall et le test de Sen. Les effets des variations de la température sur l'accumulation des quantités en unités de froid mensuelles, ont été évalués par le biais de la variation des valeurs moyennes des quantités en unités de froid. Ces variations sont apparues en accord avec les différences régionales en termes de températures.

Au site de Benchicao, une tendance à une évolution progressive a été signalée pour l'ensemble des mois allant d'octobre à février et la période d'octobre à février. En effet, les résultats présentés dans le tableau 12 ont révélé que le début d'accumulation des unités de froid débute du milieu à la fin de novembre pour atteindre son maximum durant la deuxième quinzaine du mois de janvier jusqu'au mois de février, d'où la signification positive obtenue durant ces deux mois. Ceci correspond à cette région montagneuse, caractérisée par ses températures basses enregistrées durant la période de novembre à janvier, jusqu'au début du mois de février. Les valeurs positives et significatives obtenues durant la période s'étalant d'octobre à novembre ont bien argumenté ce résultat (figure 28a).

Pour les sites de Sidi Lakhdar et Boumedfaa, l'analyse des tendances n'a révélé aucune saisonnalité dans l'évolution des quantités en unités de froid (tableau 12), mais une forte régression générale a caractérisé le schéma de l'évolution, avec une nette signification négative durant le mois de janvier au site de Sidi Lakhdar. Cependant, cette accumulation n'avait lieu dans les deux sites qu'à la fin du mois de décembre pour atteindre son maximum vers la fin de janvier, avec un gain plus important pour le site de Boumedfaa, sans anéantir les différences attribuées aux modèles de calcul (figure 28b et c).

En l'occurrence, les moyennes mensuelles des températures minimales et moyennes des mois de décembre, janvier et la première quinzaine de février ont fortement contribué à l'accumulation des quantités en unités de froid dans ces deux sites et ils correspondent à la période la plus froide.

Les cumuls en unités de froid commencent à régresser à partir de mois du mars suite à l'augmentation des températures au site de Benchicao et dès le milieu du mois de février aux sites de Sidi Lakhdar et Boumedfaa (figure 28a, b et c)

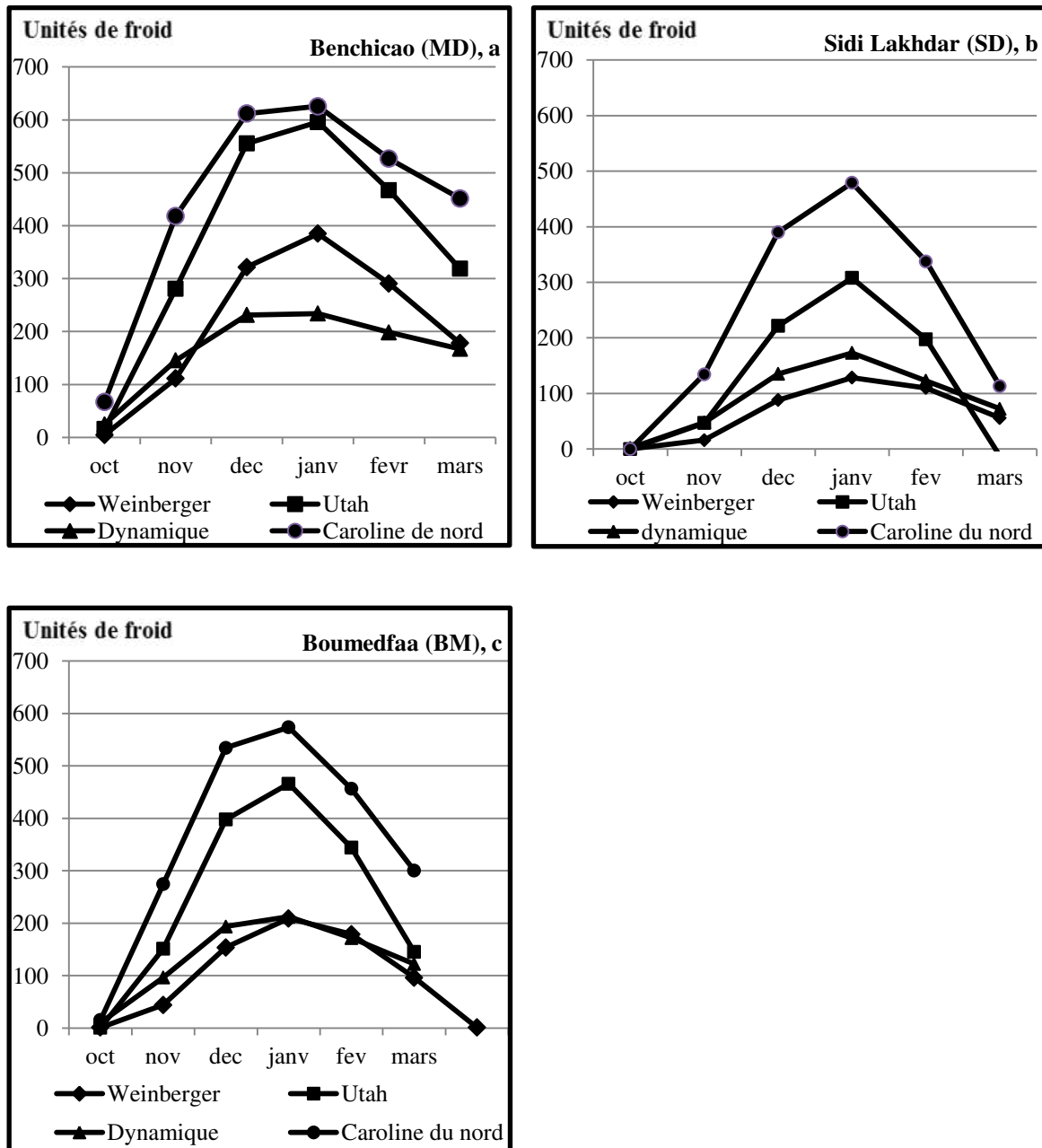


Figure 28 : Évolution des quantités mensuelles des unités de froids calculées avec quatre modèles (Weinberger, Utah, Dynamique et Caroline du Nord) dans les trois sites d'étude, a) Benchicao, b) Sidi Lakhdar et c) Boumedfaa.

Tableau 12 : Tendances mensuelles des quantités en unités de froid et de chaleur accumulées selon différents modèles à Benchicao, Sidi Lakhdar et Boumedfaa.

Mois/ Modèles	Sites / valeurs de p-value (P) et Pente de Sen					
	Benchicao		Sidi lakhdar		Boumedfaa	
	P	pente	P	Pente	P	Pente
Octobre						
Weinberger	0.78	0	0.08	0	0.77	0
Utah	0.13	0	0	0	0.38	0
Dynamique	0.56	7.43	0.23	0	0.10	0
Caroline	0.76	0	0.84	0	0.29	0
Novembre						
Weinberger	0.05	2.67	0.25	-0.21	0.94	-0.01
Utah	0.09	3.66	0.72	0	0.82	0.23
Dynamique	0.14	0.11	0.56	0.004	0.67	0.023
Caroline	0.29	1.90	0.93	0.22	0.75	0.81
Décembre						
Weinberger	0.34	2	0.08	-1.46	0.33	-1.65
Utah	0.61	-0.68	0.42	-1.86	0.15	-3.04
Dynamique	0.98	4.15	0.38	-0.08	0.32	-0.056
Caroline	0.23	-0.60	0.59	-0.80	0.15	-1.56
Janvier						
Weinberger	0.67	0.93	0.04	-2.5	0.12	-2.49
Utah	0.18	-1.71	0.09	-3.26	0.09	2.65
Dynamique	0.03	-0.04	0.04	-0.11	0.08	-0.09
Caroline	0.008	-1.44	0.09	-2.47	0.10	-1.18
février						
Weinberger	0.02	6.09	0.20	-1.39	0.93	0.11
Utah	0.57	0.85	0.36	-2.39	0.59	1.51
Dynamique	0.98	0.003	0.35	-0.006	0.63	0.03
Caroline	0.56	-0.46	0.54	-1.39	0.86	0.59
Oct-février						
Weinberger	0.04	12.24	0.06	-5.57	0.28	-4.94
Utah	0.29	4.44	0.17	-7.65	0.39	-4.76
Dynamique	0.13	0.17	0.26	-0.22	0.73	-0.05
Caroline	0.77	1.29	0.36	-4.03	0.50	-2.33
février						
GDH	0.03	-44.13	0.39	19.76	0.73	-7.53
mars						
GDH	0.17	-25.35	0.41	16.42	0.63	5.46
avril						
GDH	0.94	-0.82	0.02	39.61	0.007	55.56

GDH mai	0.50	-13.04	0.07	24.77	0.02	43.49
GDH Février-mai	0.03	-87.18	0.01	94.50	0.02	104.31
GDH						

IV.1.3.2. Tendances des quantités de chaleur

La quantification des besoins en unités de chaleur ont été effectuées à l'aide de modèle GDH_{4,5} pour les trois sites à partir du mois de février jusqu'au mois de mai et la période s'étalant entre février et mai (tableau 11 et tableau 12). De même, la vérification des tendances annuelles et mensuelles a été effectuée à l'aide de test de Mann-Kindal et le test de Sen. Les moyennes annuelles des quantités en unités de chaleur accumulées engendrées dans le tableau 11 ont montré une supériorité notable respectivement au site de Sidi Lakhdar et Boumedfaa par rapport au site de Benchicao. En outre, la tendance globale de l'évolution des cumuls en unités de chaleur, s'est montrée régressive au sein de Benchicao durant les 36 années d'études, qui a connu une tendance au refroidissement.

A Sidi Lakhdar et Boumedfaa, les pentes sont venues hautement significatives et progressives (voir tableau 11), notamment à Sidi Lakhdar qui a connu une tendance à un réchauffement climatique.

L'évolution du cumul annuel en unités de chaleur a été marquée par trois périodes à Benchicao, une période allant de 1997 à 2001 avec une élévation importante des unités de chaleur et deux périodes respectivement de 1982 à 1996 et de 2003 à 2016 avec des quantités moins importantes. De fortes valeurs de quantités de chaleur ont été enregistrées durant les années 1990, 1994, 1995, 1997, 2000 et 2006 à Sidi Lakhdar et les valeurs les plus faibles ont été soulevées durant les années 1984, 1991, 2004, 2005 et 2012.

A Boumedfaa les quantités de chaleurs les plus importantes ont été enregistrées durant les années, 1990, 1994, 1997, 2000 et 2007. Cependant, les quantités les plus faibles ont été obtenues au cours des 1984, 1991 et 2013 (voir figure 29a, b et c).

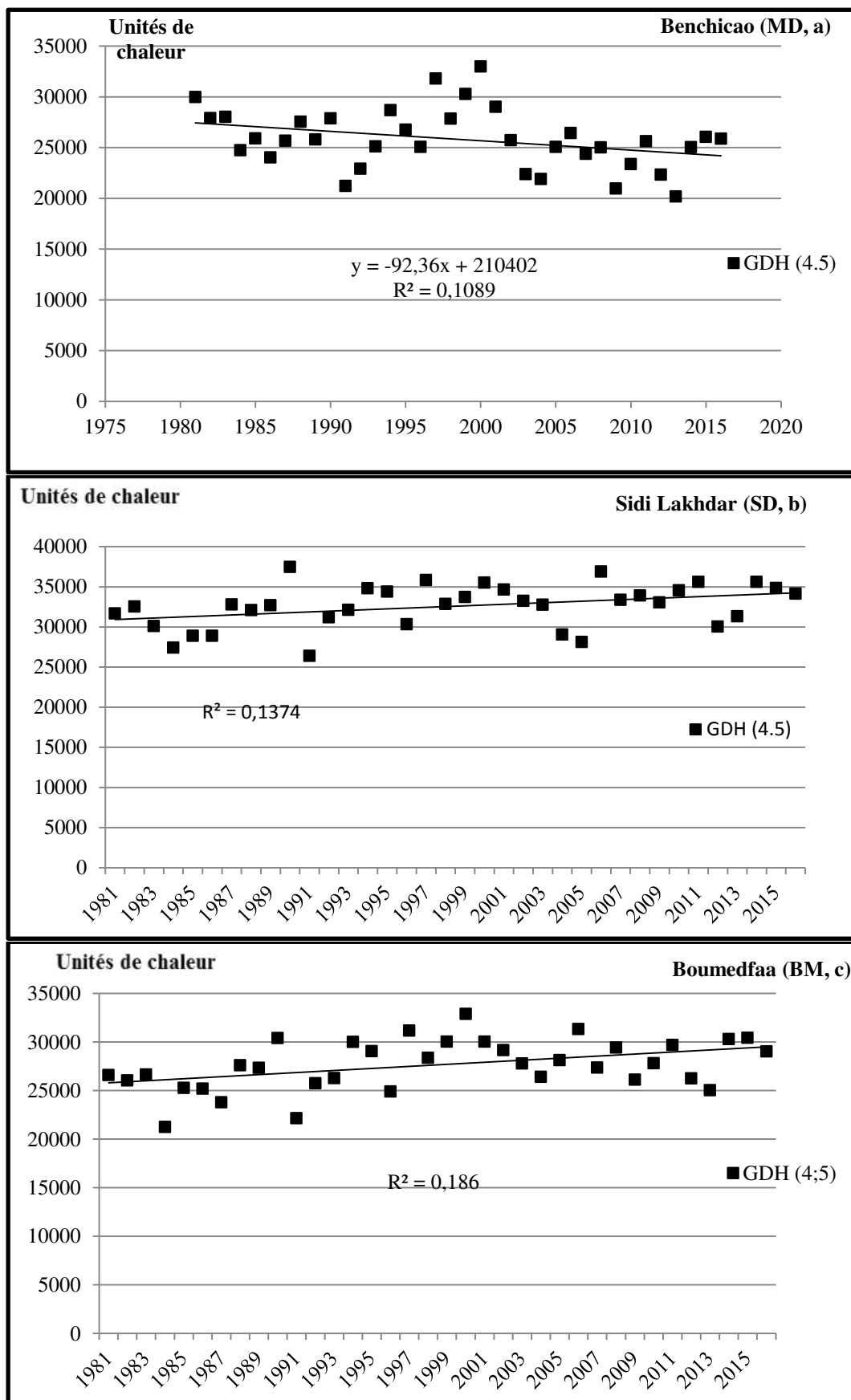


Figure 29 : Évolution des quantités en unités de chaleur annuelles dans les trois sites d'étude, a)Benchicao, b) Sidi Lakhdar, c) Boumedfaa, calculées par le modèle GDH (tb 4,5).

Afin d'avoir plus de détails, une étude de l'évolution mensuelle des unités de chaleur dans les trois sites a été effectuée, les résultats d'analyse générés dans le tableau 12 indiquent sur un début de régression importante des cumuls des unités de chaleur dès le mois de février jusqu'au mois de mars, attribuée probablement à la baisse des températures moyennes et maximales de février, ce qui en résultent une baisse plus ou moins accentuée durant toute la période allant de février à mai au site de Benchicao.

Une augmentation progressive des quantités en unités de chaleur est à relever dans les deux sites, Sidi Lakhdar et Boumedfaa, avec un gain prononcé pour le site de Sidi Lakhdar. Selon les valeurs de pente de Sen reportées dans le tableau 12, l'accumulation des besoins en unités de chaleur débute durant le mois de février pour atteindre son maximum durant le mois d'avril et mai à Sidi Lakhdar.

A l'opposé, cette accumulation de chaleur n'avait lieu qu'au mois d'avril en atteignant son maximum jusqu'au mois de mai à Boumedfaa, car la valeur positive et significative obtenue durant la période de février à mai ne peut que renforcer cette hypothèse et ce pour les deux sites (voir figure 30).

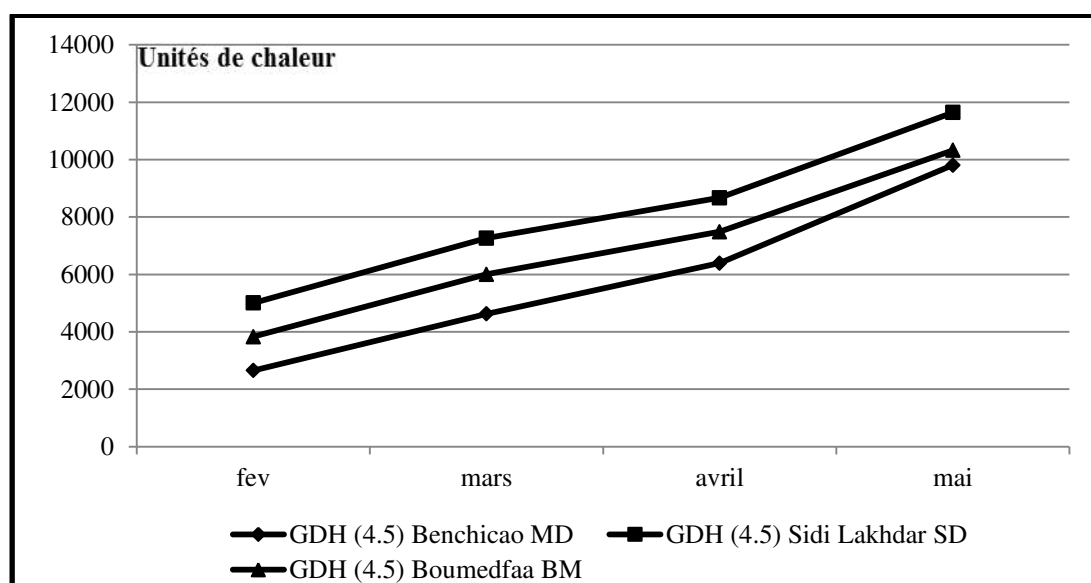


Figure 30 : Evolution des quantités mensuelles en unités de chaleur dans les trois sites d'étude, calculées par le modèle GDH.

IV.1.4. Discussion

Des études ont abordé les changements climatiques et leurs retombés sur la phénologie (Menzel et Fabian, 1999; Rutishauser et al. 2009), mais peu ont étudié ces changements entre les régions. Vu l'importance des superficies occupées par la culture de pommier et de la vigne en Algérie, cela a créé un contexte très enrichissant pour déchiffrer les schémas et les déterminismes des traits de débourrement et de floraison induits par les variations de température.

Les analyses statistiques des températures moyennes, minimales et maximales des trois sites étudiés ont révélé un réchauffement très prononcé au niveau de site Sidi Lakhdar suivi par le site de Boumedfaa, suite à une forte augmentation des températures minimales (Sidi Lakhdar) et des températures maximales (Boumedfaa) comparée à une tendance au refroidissement dans le site de Benchicao (Médéa), suite à une régression significative des températures maximales. Cette divergence entre les trois sites est due pour une partie à la différence entre les étages climatiques dont font partie les trois sites : un climat semi-aride et chaud à Sidi Lakhdar et Boumedfaa et un climat tempéré et chaud à Benchicao (Médéa). Mais les forts gradients interannuels de température dans le même site et entre les sites ont révélé une augmentation accentuée des températures moyennes annuelles notamment au cours des dernières années d'étude (1997, 2000, 2006, 2014, 2015 et 2016), indiquant un réchauffement des régions de la plaine (Sidi Lakhdar et Boumedfaa).

Malagi (2014) a rapporté dans une étude comparative entre des sites contrastés par le climat, des sites à climat doux (Maroc et le Brésil) et des sites à climat froid de l'Europe occidentale (Italie et France), que des forts gradients de température ont été soulevés entre les sites à climat doux et les sites à climat tempéré et que les températures moyennes annuelle des sites froids ont été proches de celles des sites à climat doux. Cependant, une légère augmentation des moyennes annuelles a été retenue à Forli (Italie) et Nîmes (France) qu'à Sao-Joaquim (Brésil).

Pour déterminer l'intensité de réchauffement climatique dans les trois sites étudiés, une analyse des moyennes des températures mensuelles (moyennes, minimale et maximales) de la période s'étalant entre octobre et mai a été effectuée. Les tendances de réchauffement des deux sites Sidi Lakhdar et Boumedfaa, ont été justifiées par une hausse très significative qui a marqué les mois d'octobre, d'avril et mai. Ces deux sites ont connu des températures

maximales extrêmes durant les mois cités et elles étaient plus accentuées au site de Boumedfaa. En revanche, une baisse notable des températures moyennes des mois de novembre et février et d'une façon moindre du mois de mars ont été soulevées dans le site de Benchicao. Les températures moyennes enregistrées durant la période d'accumulation des besoins en froid ont marqué une nette supériorité dans les sites Sidi Lakhdar (12.9°C) et Boumedfaa (11.0°C) comparé à celles de Benchicao (9.0°C), alors que Malagi (2014), a trouvé des températures moyennes inférieures à 12.0°C dans les sites de Nîmes et Forli, tandis qu'elles étaient proches de 12.0°C au Brésil et de 14.0°C au Maroc.

Fishman et al (1987), fixe un seuil supérieur de 13.0°C pour estimer les effets du froid dans le modèle dynamique, et Bonhomme et al (2010) ont trouvé 12.0°C comme température optimale pour obtenir des estimations efficaces du froid par le modèle Utah (Richardson et al, 1974) dans le pêcher.

De même, la période d'accumulation des unités de chaleur a été marquée par des moyennes de températures allant de 14.0 °C à 12.5°C respectivement dans les sites de Sidi Lakhdar et Boumedfaa et de 10.6°C à Benchicao, cela se traduit par une forte accumulation de chaleur nécessaire au développement des bourgeons dans les deux premiers sites par rapport au site de Benchicao.

Il paraît que le mois de décembre et janvier ont joué un rôle primordiale dans l'accumulation des besoins en unités de froid calculés par les trois modèles : Weinberger (0–7°C), Utah, Caroline du Nord et Dynamique dans les trois sites (Sidi Lakhdar, Boumedfaa et Benchicao). Néanmoins, une nette supériorité a été obtenue dans les des valeurs des heures de froid à Benchicao durant le mois de novembre, ce qui lui attribué un gain prononcé par rapport aux deux sites, Sidi Lakhdar et Boumedfaa, ou l'accumulation des heures de froid n'a débuté qu'à la fin du mois de décembre. Il semble que les différences régionales en terme de climat et relief entre les sites ont fortement contribué à créer cette divergence en matière de quantité de froid entre eux, le site de Benchicao (montagne à 1133 m d'altitude) a enregistré des valeurs importantes de cumul en unités de froid. Pour les trois sites, ces quantités en unités de froid enregistrées correspondent à la période où les températures minimales et moyennes atteignent des valeurs très basses par rapport à d'autres périodes, elle s'étale de la dernière quinzaine de novembre jusqu'à la première quinzaine du mois de février. Les cumuls en unités de froid commencent à régresser à partir de mois de mars suite à l'augmentation des températures durant ce mois au site de Benchicao. A l'opposé, la régression des cumuls en

unités de froid a lieu dès le mi-février à Sidi Lakhdar et Boumedfaa. Cette différence a fortement contribué à augmenter le cumul de froid dans le premier site (Benchicao) par rapport aux deux derniers sites. L'utilisation de quatre modèles de quantification des unités de froid dans les trois sites différents sur le plan climatique et géographique a décelé une certaine supériorité de deux modèles seulement, le modèle Caroline du Nord et le modèle Utah.

Il faut rappeler que le modèle Caroline du Nord est dérivé de modèle Utah qui attribue à des températures inférieures ou égales à 6.0°C pendant 1 heure une unité de froid et une contribution négative à des températures de 15.0°C. Néanmoins, le modèle Caroline du Nord propose une gamme plus large de températures efficaces avec un pic d'accumulation de froid optimum à 7.2°C (6.1°C pour le modèle Utah) et incorpore un effet négatif plus important quand les températures dépassent 21°C pour la dormance. La différence la plus grande entre le modèle Utah et le modèle Caroline du Nord est la contribution de la courbe entre 7.2°C et 19.5°C. Ce segment est très important dans les climats les plus chauds, car les températures durant l'hiver coïncident souvent dans cette fourchette. A des températures au-dessus de 18°C, il y a une augmentation de la négation du froid comparée au modèle Utah. Cet effet négatif augmente brusquement et atteint son maximum (-2.0 unité de froid) à 23.3°C (Benmoussa, 2018). Pour la température inférieure, seuil pour l'accumulation des unités de froid, il y avait des différences entre le modèle Utah (seuil à + 1,4 °C) et le modèle de la Caroline du Nord (seuil à -1,1 °C) (Shaltout et Unrath, 1983). De même, le modèle Caroline du Nord attribue une contribution du froid près de zéro pour des températures comprises entre 16°C et 18 °C et il est plus accru que d'autres modèles pour prédominer l'achèvement de la dormance dans les conditions de Caroline du Nord. Les températures moyennes minimales et maximales notamment celles de novembre à mars des sites de Benchicao surtout et Boumedfaa conviennent d'une manière acceptable les conditions empiriques de ces deux modèles.

Cependant, des études ont révélé que le modèle Dynamique est le plus adapté au climat chaud et plus performant que les modèles « Heures de froid » et Utah (Elloumi et al, 2013; Ghrab et al, 2014a; Pérez et al, 2008). Les estimations des besoins en unités de froid des différentes variétés d'espèces fruitières à travers le monde ne sont pas toutes conformes. Les résultats donnés par un tel modèle de froid pour une variété ne pourra probablement pas être valable pour la même variété dans une autre région.

Ainsi les besoins en froid des mêmes variétés d'abricotier cultivées en Espagne et en Afrique du Sud ne sont pas conformes (Campoy et al, 2012). Ces auteurs ont déduit que l'emplacement géographique a fortement influencé les températures et l'accumulation de froid. Le même constat a été rapporté par Viti et al (2010) pour les mêmes variétés d'abricotier plantées en Espagne et en Italie. Il se trouve qu'il y a une grande variabilité interannuelle des estimations pour la plupart des études et que cette variabilité est plus prononcée surtout lorsque les modèles « Heures de froid » et Utah sont utilisés (Campoy et al, 2012; Elloumi et al, 2013; Ghrab et al, 2014a; Guo et al, 2015a).

Un certain nombre d'études ont évalué la performance des modèles horticoles de froid couramment utilisés. Cependant, tous les modèles laissent encore beaucoup à désirer en termes de précision, et certains comportements de levée de la dormance dans des sites chauds ne peuvent pas être expliqués du tout (Luedeling, 2012).

Luedeling et al (2009a) ont étudié la sensibilité des modèles de froid hivernal pour les arbres fruitiers et des noix aux changements climatiques prévus dans la vallée centrale californienne. Leurs résultats fournissent une indication claire que la réussite des modèles de froid couramment utilisés ne sera plus garantie à mesure que les températures augmentent. En raison de leurs faiblesses conceptuelles, ils peuvent même être peu susceptibles d'être les outils les plus utiles disponibles.

Les quantités en unités de chaleur obtenues dans les trois sites d'études ont reflété d'une manière très exacte l'état dans lequel se trouve chaque site. Un gain très prononcé de cumul en unités de chaleur a été révélé dans le site de Sidi Lakhdar renforçant le résultat d'être un site qui évolue vers un réchauffement très prononcé. Cependant, la faible valeur de cumul en unités de chaleur enregistré à Benchicao par rapport aux autres sites ne peut que traduire la tendance au refroidissement dans ce site. Indépendamment des moyens par lesquels la chaleur est mesurée, il est souhaitable de comprendre comment les quantités de chaleur affectent les diverses phases de croissance des plantes (Sherman et Beckman, 2003). Il a été rapporté que l'accumulation des unités de chaleur (temps thermique) pour la floraison du pêcher commence à partir d'une température de base de 2 à 4 °C (Munoz et al, 1986; Richardson et al, 1975). Elle peut se produire à des températures plus basses mais à un rythme croissant au fur et à mesure que les températures augmentent. De même, il a été observé qu'en verger les fleurs de pêcher se forment rapidement dans le champ lorsque les températures nocturnes minimales restent supérieures à 10 °C (Sherman et Beckman, 2003).

A partir de valeurs seuils de température de base ou optimale, des modèles d'estimation des besoins en chaleur ont été développés.

Le réchauffement étant susceptible de dépasser environ 1,5 ° C pour la fin du 21^{ème} siècle (GIEC, 2013), différents modèles de réchauffement identifiés grâce à l'analyse des tendances saisonnières des températures maximales et des températures minimales dans des régions spécifiques (Martínez et al, 2010; Sansigolo et Kayano, 2010; Cordero et al, 2011). Mais les analyses climatiques comparaient plus rarement les variations de température entre les régions contrastées pendant des périodes d'accumulation des unités de froid et de chaleur distinctes. Les résultats obtenus à travers cette étude soutiennent de se concentrer dans un futur proche sur des comparaisons de températures entre les sites de montagne comme Benchicao et les sites de plaine à climat doux comme Sidi Lakhdar et Boumedfaa.

Synthétiquement, en se basant sur l'évolution des températures moyenne, minimales et maximales ainsi que les cumuls de froid et de chaleurs dans les deux périodes, la période d'accumulation des besoins en froid et la période d'accumulation des besoins en chaleur trois modèles de réchauffement (MR) peuvent être décrits ;

- A) MR1 caractérisé par des augmentations marquées de température et d'accumulation des unités de chaleur (principalement les températures maximales) pendant la période d'accumulation des besoins en unités de chaleur (écodormance) mais avec des changements moins significatifs pendant la période d'accumulation des besoins en unités de froid (dormance), prévalant dans le site de Boumedfaa.

- B) MR2 similaires à celui du MR1, mais aussi avec des augmentations très significatives de températures (températures maximales et températures moyennes) et des baisses de cumul des unités de froid pendant la période d'accumulation des besoins en froid (endodormance) prévalant dans le site de Sidi Lakhdar,

- C) MR3 caractérisé par presque aucun changement significatif des températures moyennes annuelles et minimale mais plutôt par une régression des températures maximales, d'où une diminution des quantités en unités de chaleur sans aucun changement sur les quantités en unités de froid et ce durant les deux périodes d'accumulations de froid / chaleur, prévalant dans le site de Benchicao.

Des réchauffements climatiques dans des sites de l'Europe (France, Italie) et au Maroc enregistrés au cours des quatre dernières décennies ont été décrits de manière similaire à partir d'analyses des températures et des tendances d'accumulation des besoins en froid et en chaleur par Malagi (2014) et d'autres dans des sites en hémisphère nord par Viola et al (2013,) ainsi que d'autres également liées aux augmentations des températures maximales par Rebetez et Reinhard (2007).

De tels schémas opposés suggèrent l'émergence de divergences dans les impacts du réchauffement pendant la dormance (période d'accumulation des besoins en froid) dans les régions de pomiculture et de la vigne comme celles qui ont fait l'objet de cette étude.

Avec l'utilisation de l'approche des modèles contrastés, des réponses régionales divergentes ont été obtenues pendant la période d'accumulation de froid. Deux sites ou l'un n'a montré aucune baisse significatives de froid, Benchicao (MR3) et l'autre avec une baisse modérée de froid, Boumedfaa (MR1) par rapport aux baisses de froid dans le site de Sidi Lakhdar (MR2). De ce fait, la tendance à la baisse de froid n'a été signalée que dans le site chaud à climat semi-aride et non pas dans celui à climat tempéré comme Benchicao.

De plus, le réchauffement printanier pendant la période d'accumulation des besoins en chaleur était plus rarement détaillé malgré ses effets déterminants sur l'avancée phénologique printanière (Fujisawa and Kobayashi, 2010; Legave et al, 2013). Le calcul des quantités de chaleur durant les mois de février, mars, avril et mai et la période allant de février à mai, a révélé un fort réchauffement printanier dans les deux sites chauds (MR1 et MR2), et rarement dans le site à climat tempéré (MR3). Ces schémas contrastés suggèrent également l'émergence de divergences dans les impacts du réchauffement «printanier» pendant la période d'accumulation des besoins en chaleur, entre les zones de culture notamment du pommier à Sidi Lakhdar. Le réchauffement pendant la dormance et la période printanière présente une vulnérabilité marquée aux impacts du réchauffement au cours des 40 dernières années en Méditerranée tempérée (Malagi, 2014).

IV.2.Impacts biologiques des changements climatiques sur le pommier et la vigne, dans des régions à climats contrastés

IV.2.1.Tendances phénologiques

Deux espèces fruitières ont fait l'objet de cette étude, le pommier dans les sites de Sidi Lakhdar (SD) et Benchicao (MD) et la vigne dans les sites de Boumedfaa (BM) et Benchicao (MD). Deux stades phénologiques ont été étudiés, le début du débourrement et le début de la floraison. La tendance générale de l'évolution des deux stades a montré une forte irrégularité spatio-temporelle chez ces deux espèces.

IV.2.1.1. Pommier

Des comparaisons des tendances phénologiques du pommier de la variété 'Golden Delicious', (début du débourrement et début de floraison) dans les deux sites contrastés ont été effectuées pendant les 17 années d'observation.

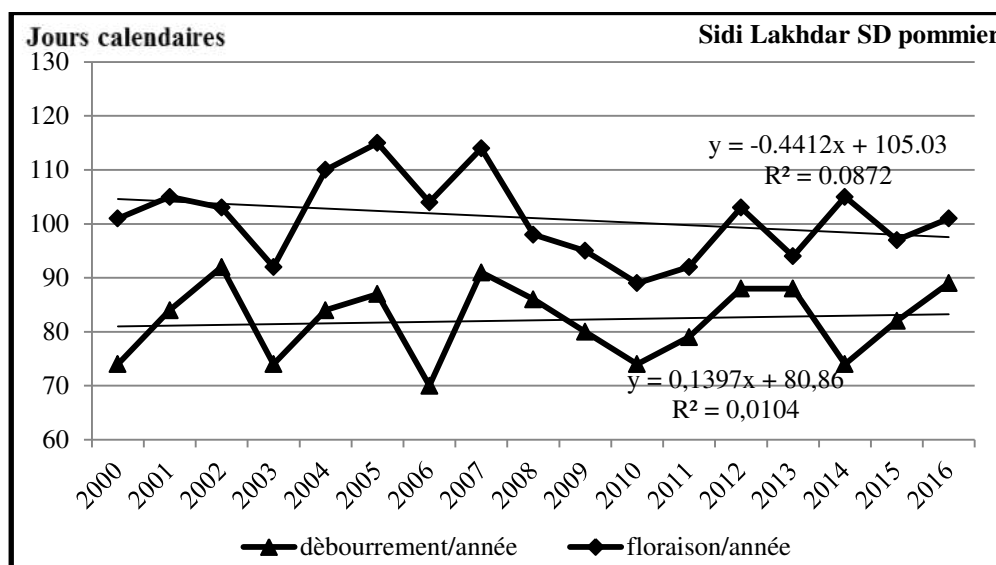
Pour les dates de débourrement des bourgeons floraux du site de Sidi Lakhdar, une certaine irrégularité entre les années a été révélée avec une tardivité marquée durant les années 2002, 2007, 2012, 2013 et 2016, où on a enregistré un débourrement à la fin du mois de mars et les premiers jours du mois d'avril et une précocité pour 2000, 2003, 2006. De même, les années les plus précoces des dates de floraison, étant 2003, 2009, 2010, 2011 et les plus tardives 2005, 2004 et 2001 à la fin mars. Les résultats de corrélation de Spearman entre la série des années de 2000 à 2016 et la série chronologique des dates de débourrement et de floraison correspondantes, ont révélé une tendance globale non significative pour l'ensemble des années concernant le débourrement et la floraison, ou le coefficient de corrélation est respectivement, 0.42 et -0.07 (voir tableau 13).

Sur le site de Benchicao, une tendance significative (0.60*) à une tardivité plus accentuée des dates de floraison du pommier est à signaler par rapport aux dates de débourrement. En effet, l'ensemble des dates de floraison ont été enregistrées dans la 3^{ème} semaine du mois d'avril vers le début de mois de mai. En revanche, les dates de débourrement ont été marquées par une irrégularité dans leur évolution, oscillant entre un

avancement dans les années de 2000 à 2003, 2009 et 2015 et ce pendant la dernière semaine du mois de mars, et un retard dans les années 2004 à 2008 et 2010 à 2016 généralement durant la première semaine du mois d’avril (figure 31).

Tableau 13: Tendence de l’évolution des deux stades de débourrement et de floraison pour la variété ‘Golden Delicious’ du pommier de 2000 à 2016 et la variété ‘Muscat Italia’ de la vigne de 2000 à 2016 au site de Boumedfaa et de 1988 à 2016 au site de Benchicao.

Sites	Pommier		Vigne	
	Débourrement	Floraison	Débourrement	Floraison
Benchicao	0.43	0.60*	0.40*	-0.34
Sidi Lakhdar	0.42	-0.07		
Boumedfaa			-0.45*	-0.12



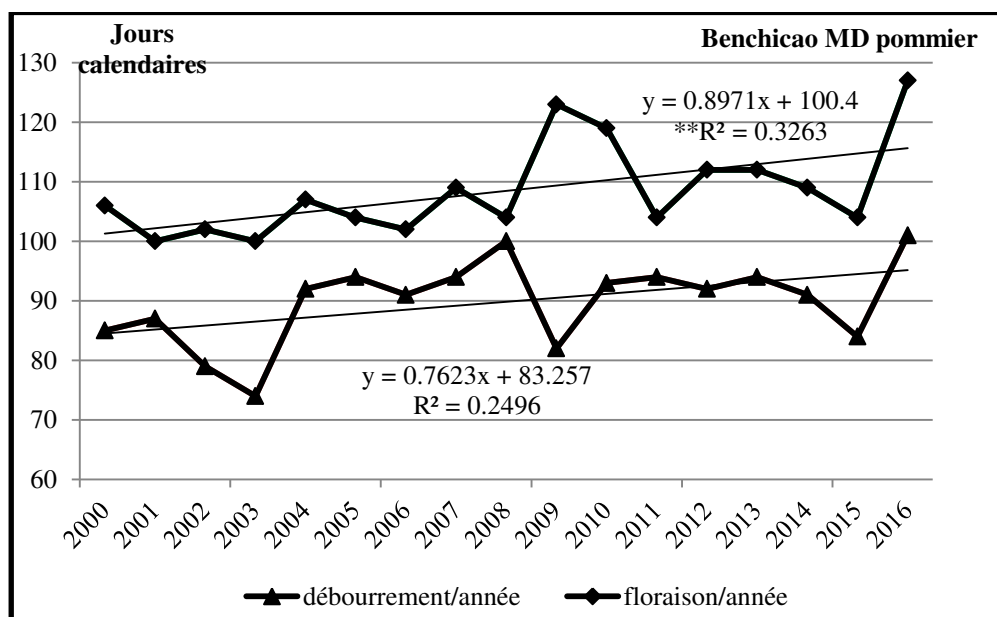


Figure 31 : Evolution des dates de débourrement et de floraison de la variété ‘Golden Delicious’ du pommier aux sites de Sidi Lakhdar et de Benchicao pendant la période 2000 - 2016.

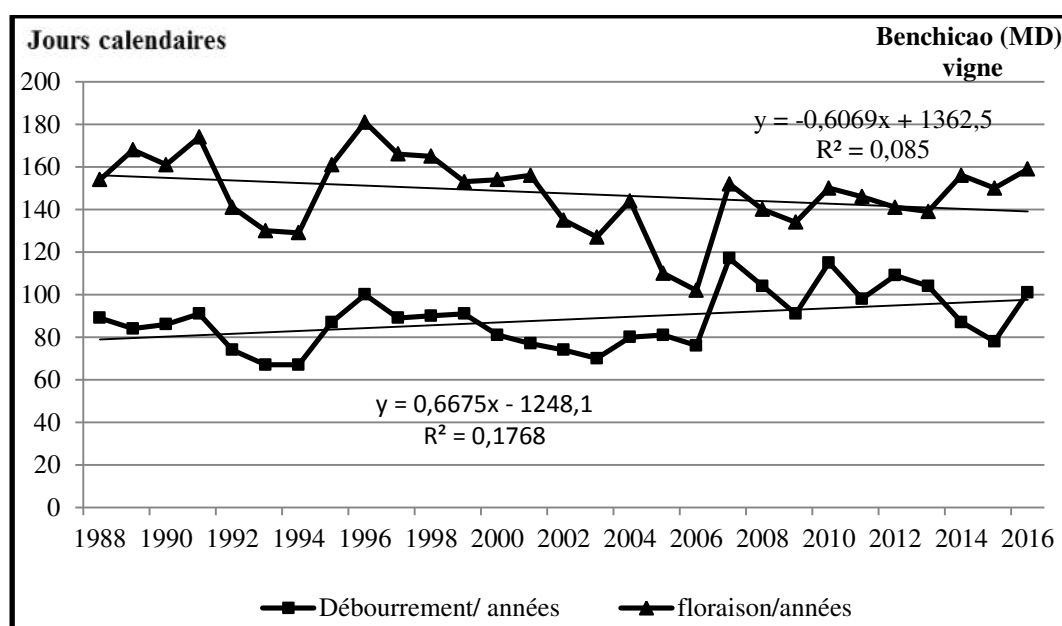
IV.2.1.2. Vigne

Une forte irrégularité a caractérisé le comportement de la variété ‘Muscat Italia’ de la vigne en termes de début de débourrement et de début floraison, au sein du site et entre les deux sites à climat contrasté.

Au site de Benchicao, l’évolution phénologique qui s’est étalée sur 28 ans, soit de 1988 à 2016, a été caractérisé par une tendance à une tardivité des dates de débourrement des bourgeons floraux dans l’ensemble des années allant de la dernière semaine du mois de mars à la fin du mois d’avril, d’où une corrélation positive et significative entre les dates de début de débourrement et les années (0.40*). Il s’agit des années 2007, 2010, 2012 où le débourrement est venu plus tardif durant la dernière décade d’avril (117 à 109). Cependant, les années les plus précoces ont été 1993, 1994 et 1991 allant de 67 jours à 74 jours (voir figure 32). La date moyenne de début de débourrement était la dernière semaine du mois de mars. Néanmoins, une tendance légère à une précocité des dates de la floraison a été observée à ce site (-0.34), où les dates ont été avancé presque d’un mois, allant du début de juin vers le début de mois de mai arrivant même à la dernière semaine du mois d’avril. Les années les plus précoces ont été 2006, 2005 et 2004 oscillant entre 102 jours à 115 jours respectivement,

alors que les années les plus tardives ont été 1996 (181 jours), 1991 (174 jours) et 1989 (168 jours). De même, la date moyenne de début de floraison était la fin du mois de mai.

Au site de Boumedfaa (BM), les corrélations négatives mais non significatives entre les dates de début de débourrement et les années (-0.45*) ont reflété un certain avancement des dates de débourrement allant de la mi-mars vers la troisième semaine du mois de février, avec un trait d'irrégularité entre les années (voir figure 32). Les années les plus précoces ont été 2016 (48 jours), 2007 (55 jours), 2008 et 2012 (61 jours) et celles, les plus tardives ont été 2001 (79 jours) et 2002 (92 jours). La date moyenne de débourrement à ce site était entre le 9 et le 10 mars. En outre, la tendance de l'évolution des dates de floraison de la vigne à ce site a été non significative (-0.12), avec une légère précocité allant de la première semaine du mois de mai vers la dernière semaine de mois d'avril. Les années les plus précoces ont été 2002, 2003, 2007 et 2015 avec 122 jours, et l'année 2016 avec 117 jours. Cependant, la date de floraison la plus tardive était enregistrée en 2006 (149 jours). La date moyenne de floraison était le 9 mai (figure 32).



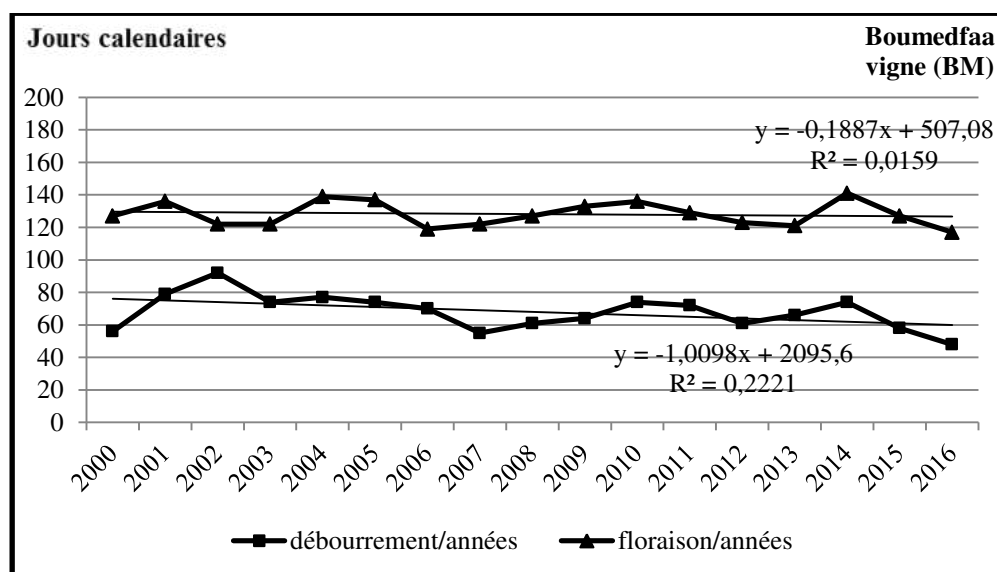


Figure 32: Evolution des dates de débourrement et de floraison de la variété ‘Muscat Italia’ de la vigne aux sites de Boumedfaa de 2000 à 2016 et de Benchicao de 1989 à 2016.

IV.2.2. Déterminisme du temps de débourrement et de floraison

IV.2.2.1. Pommier, variété ‘Golden Delicious’

IV.2.2.1.1. Satisfaction des besoins en unités de froid et en chaleur

Les corrélations de Spearman entre les températures mensuelles, moyennes, minimales et maximales et les deux stades phénologiques ; le début débourrement et le début floraison dans les sites d’étude, Benchicao (Médéa) et Sidi Lakhdar (Ain defla), ont révélé des tendances, qui peuvent être résumées ainsi :

Au site de Benchicao, les corrélations positives et significatives entre le débourrement et la floraison et les températures mensuelles moyennes et maximales de mois de janvier et la période qui s’étale entre novembre et janvier d’un côté et novembre et février d’un autre côté ne font que refléter l’importance d’une forte influence de ces températures sur la satisfaction des besoins en unités de froid. Plus il fait chaud, plus le débournement/floraison est tardif, alors que ce n’est pas le cas de novembre et décembre (octobre restant assez neutre) qui ont

une corrélation négative. L'impact du mois de janvier est prépondérant car si on regarde l'influence de la période de novembre à janvier, on retrouve un effet négatif des températures élevées sur la précocité (0.40*), alors que les mois de novembre et décembre ont isolément un effet inverse.

A Sidi Lakhdar, le bilan est globalement le même. Les corrélations entre les températures maximales dans un premier ordre et les températures moyennes du mois de janvier d'une part, et les dates de débourrement d'autre part, sont significativement positives, indiquant l'importance des températures de ce mois pour la satisfaction des besoins en unités de froid. Un mois de janvier chaud retarde la satisfaction des besoins en froid et le débourrement. Un effet négatif des températures élevées de la période de novembre à janvier sur la précocité (0.30) a été enregistré. Hormis le mois d'octobre qui reste peu déterminant, des corrélations négatives et significatives ont été soulevées durant les mois de novembre et de décembre indiquant que ces mois vont plutôt dans le sens d'un gain de précocité. Des liaisons significatives et négatives ont été observées entre les températures maximales du mois de décembre et la floraison, avec un coefficient de corrélation de -0.50*.

Concernant le rôle des températures moyennes, minimales et maximales dans la satisfaction des besoins en chaleur pendant la période printanière, ce sont plutôt les températures du mois de mars qui jouent le rôle principal pour les deux sites. Pour Benchicao, seules les températures de mars présentent une corrélation négative et significative avec les dates de débourrement et de floraison. Les corrélations négatives obtenues entre les températures moyennes de la période mars-avril (-0.44*) montrent un lien entre la précocité de la floraison et la température moyenne de la période, avec une prédominance très forte des températures de mars.

Au site de Sidi Lakhdar, les corrélations significatives et négatives entre les températures moyennes et maximales de mars et avril séparément et la période entre mars et avril montrent une forte influence de celles-ci sur la précocité (voir tableau 14).

Tableau 14 : Corrélations de Spearman entre les températures mensuelles et les deux stades phénologiques du pommier (débourrement et floraison) avec la période d'octobre à avril (deb : débourrement, flor : floraison).

Variable	Sidi Lakhdar						Benchicao					
	T°moy		T°min		T°max		T°moy		T°min		T°max	
	deb	flor	deb	flor	Deb	flor	deb	flor	deb	flor	deb	flor
Octobre	-0.031	0.11	-0.21	0.13	-0.20	0.033	0.015	0.019	-0.106	0.135	0.081	0.14
Novembre	-0.41*	-0.12	-0.55*	-0.21	-0.38	-0.036	-0.54*	-0.225	-0.57*	-0.23	-0.47*	0.18
Décembre	-0.18	-0.43*	-0.11	-0.232	-0.2	-0.50*	-0.40*	0.054	-0.52*	-0.11	-0.322	0.18
Janvier	0.31	-0.002	0.006	-0.24	0.46*	0.14	0.46*	0.3	0.232	0.15	0.54*	0.41
Février	0.10	0.01	-0.09	0.12	0.01	0.13	0.063	0.073	0.021	-0.02	0.13	0.15
Mars	-0.43*	-0.34	-0.27	-0.147	-0.36	-0.36	-0.60*	-0.65*	-0.60*	-0.64*	-0.55*	-0.56*
Avril	-0.45*	-0.30	-0.41*	-0.145	-0.50*	-0.33	0.08	-0.072	-0.101	-0.30	0.12	0.041
Nov-Jan	0.30	-0.26	0.14	-0.45*	0.30	-0.30	0.43*	0.40*	0.28	0.33	0.52*	0.53*
Nov-Fev	0.06	-0.052	0.21	-0.14	0.18	-0.14	0.48*	0.44*	0.233	0.212	0.30	0.21
Nov-Mar	0.041	-0.29	0.01	-0.20	0.132	-0.30	0.184	0.27	0.062	0.104	0.33	0.30
Mar-Avr	-0.56*	-0.45*	0.08	-0.025	-0.54*	-0.330	-0.26	-0.44*	-0.30	-0.54*	-0.13	-0.20

Les * indiquent le niveau de signification de la corrélation (* P<0.05 ; ** P<0.01).

Des corrélations de Spearman ont été établies entre les dates annuelles de débourrement et de floraison et les quantités annuelles et mensuelles accumulées de froid et de chaleur. Ces dernières ont été calculées par plusieurs modèles mathématiques (tableau 15 et le tableau 16).

Au site de Benchicao, hormis une valeur de corrélation négative plus ou moins importante enregistrée entre les dates de débourrement et les quantités annuelles de froid calculées par le modèle Weinberger (0-7°C) (-0.41), des petites valeurs de corrélations non significatives ont été obtenues avec les autres modèles de calcul de froid. Cependant, de

valeurs de corrélation négatives et importantes sont soulevées entre les dates de floraison et les quantités de froid avec les modèles Utah, Dynamique et Caroline du Nord (de -0.46 à -0.42) indiquant que la satisfaction au froid était inversement un facteur déterminant du temps de floraison. L'obtention d'une importante corrélation négative (-0.43) entre les quantités de chaleur calculées avec le modèle GDH_{4,5} et les dates de floraison ne peut que donner un accent sur l'importance de la chaleur au cours de la période post dormance sur la précocité de la floraison.

Sur le site de Sidi Lakhdar, des valeurs faibles de corrélation et non significatives ont été soulevées entre les dates de débourrement et de floraison et les quantités de froid accumulées, mise à part celle enregistrée avec le modèle dynamique et les dates de débourrement (-0.41). Cela peut renseigner sur la fiabilité de ce modèle dans un climat semi-aride et sur l'importance des basses températures durant la période d'accumulation des besoins en froid dans le déterminisme du temps de débourrement et où celles-ci ont été souvent non satisfaisantes. Des corrélations négatives faibles et non significatives avec l'accumulation de chaleur suggéraient une faible influence des températures pendant l'écodormance sur la précocité de la floraison (Tableau 15).

Tableau 15 : Valeurs de corrélation de Spearman entre les quantités annuelles de froid et de chaleur et les deux stades phénologiques du pommier (débourrement et floraison) pendant la période d'octobre à avril (Weinb : Weinberger, Dyn : Dynamique, C.N : Caroline du nord).

Pommier	Période d'accumulation des besoins en unités de froid								Période d'accumulation des besoins en unités de chaleur	
	Débourrement				Floraison				Débourrement	Floraison
	Weinb	Utah	Dyn	C.N.	Weinb	Utah	Dyn	C.N.	GDH	GDH
Benchicao	-0.41	-0.27	-0.07	-0.1	-0.28	-0.46	-0.42	-0.45	-0.26	-0.43
Sidi Lakhdar	-0.01	-0.32	-0.41	-0.03	-0.04	0.07	-0.06	-0.04	-0.3	-0.18

Les résultats de corrélations entre les quantités mensuelles de froid et de chaleur et les dates de débourrement et de la floraison dans les deux sites ont pris le même sens que ceux obtenus entre celles-ci et les quantités annuelles de froid et de chaleur (voir tableau 15 et 16).

Sur le site de Benchicao, des corrélations significatives et négatives entre le froid accumulé durant les mois de janvier allant de (-0.30 à -0.60**) et février (-0.40* à -0.60**), traduisant ainsi le rôle primordiale des températures de ces deux mois sur la précocité de débourrement pour le mois de janvier et de floraison pour le mois de février.

Bien que des corrélations importantes ont été soulevées pour chaque mois séparément, de faibles valeurs négatives et non significatives ont été signalées au cours de la période s'étalant entre octobre et février. De même, une corrélation négative assez importante a été enregistrée durant le mois de novembre, ce qui explique que l'accumulation de froid débute pendant ce mois dans ce site. Une autre corrélation significative et positive est apparue toujours dans ce mois, reflétant d'une façon inverse le rôle de la température de ce mois dans la précocité de la floraison. Des corrélations positives et significatives inattendues ont été obtenues durant le mois d'octobre au niveau des modèles Dynamique et Caroline du Nord, dues peut être à des défauts de modélisation pour ce mois, ou que les fortes températures d'octobre peuvent retarder le débourrement.

Pour les résultats de corrélation entre les quantités de chaleur et les dates de débourrement et de floraison, hormis les corrélations négatives et significatives obtenues au cours du mois de mars (-0.50** et -0.56**) avec le modèle GDH, de faibles valeurs de corrélation ont été apparues pour les mois de février, d'avril et le mois de mai. La corrélation négative de -0.43* obtenue durant la période entre février et mai contribue à donner un accent sur l'importance des températures du mois de mars durant la phase d'écodormance sur la précocité de la floraison.

Les corrélations présentées dans le tableau 16 pour le site de Sidi Lakhdar, ont donné une image complètement différente à celle présentée pour le site de Benchicao. De faibles valeurs non significatives et négatives pour l'ensemble des mois et même pour la période allant d'octobre à février et au niveau de tous les modèles de calcul durant la période d'accumulation de froid, ne serait-ce que des corrélations entre les besoins en froid du mois de janvier avec les deux modèles, Dynamique et Caroline du Nord (-0.40*) et les dates de

débourrement, cela peut être induit à une défaillance des modèles de calcul pour ce site qui a connu un degré assez important de réchauffement. Toutefois, Il est à noter que les températures de janvier contribuent à la progression du débourrement et la floraison. D'autres corrélations négatives ont été soulevées au cours du mois de mars allant de -0.44* à -0.46* pour la période d'accumulation de la chaleur, ce qui suggère que la satisfaction des besoins en chaleur pour le déclenchement du débourrement et la précocité de la floraison ne peut être accompli que par les températures au mois de mars (tableau 16).

Tableau 16 : Valeurs de corrélation de Spearman entre les quantités mensuelles de froid et de chaleur et les deux stades phénologiques (débourrement et floraison) du pommier et de la vigne (deb : débourrement, flor : floraison).

Variété	'Golden Delicious' du pommier				Variété 'Muscat Italia' de la vigne			
	MD		SD		MD		BM	
	Deb	Flor	Deb	Flor	Deb	Flor	Deb	Flor
Mois / modèle								
Octobre								
Weinberger	0.27	-0.23	/	/	0.14	-0.21	-0.07	-0.02
Utah	0.44	0.064	/	/	-0.27	-0.35	0.18	0.00
Caroline	0.53*	0.13	0.07	-0.07	0.25	-0.15	0.06	0.29
Dynamique	0.60*	0.07	0.15	-0.25	0.12	-0.40*	0.18	0.13
Novembre								
Weinberger	-0.20	-0.26	-0.08	0.01	-0.11	-0.24	0.17	-0.01
Utah	-0.25	-0.40	-0.10	-.032	-0.15	-0.33	0.15	0.20
Caroline	0.25	0.53*	-0.10	0.18	-0.20	0.30	0.24	0.21
Dynamique	-0.23	-0.50	-0.04	0.006	-0.17	-0.40*	0.16	0.27
Decembre								
Weinberger	-0.28	-0.29	-0.20	-0.12	-0.20	-0.33	-0.004	0.084
Utah	-0.12	0.014	0.12	0.18	-0.18	-0.20	-0.08	0.02
Caroline	-0.07	0.13	0.16	0.03	-0.15	-0.06	-0.13	0.04
Dynamique	-0.23	-0.06	0.05	0.14	-0.11	-0.24	-0.23	0.001
Janvier								
Weinberger	-0.52*	-0.30	-0.21	-0.003	-0.40*	-0.46*	0.04	-0.05
Utah	-0.60*	-0.35	-0.33	-0.16	-0.42*	-0.18	0.014	-0.05
Caroline	-0.38	0.30	-0.40*	0.12	-0.31	0.32	0.05	-0.03
Dynamique	-0.22	-0.19	-0.40*	-0.20	-0.23	0.12	-0.01	-0.03

Fevrier								
Weinberger	-0.06	-0.024	0.08	-0.17	0.15	-0.30	0.06	-0.10
Utah	-0.20	-0.50*	0.007	-0.09	-0.05	-0.20	0.001	-0.05
Caroline	-0.05	-0.54*	0.09	-0.24	-0.05	-0.01	-0.06	-0.02
Dynamique	-0.09	-0.57*	-0.03	-0.05	0.02	-0.20	0.04	0.10
Mars								
Weinberger	0.54*	0.50*	0.25	0.31	0.33	-0.23	-0.40*	0.04
Utah	0.34	0.40	0.51*	0.51*	0.30	-0.006	-0.45*	-0.07
Caroline	0.19	0.28	0.50*	0.50*	0.20	-0.10	-0.31	-0.12
Dynamique	0.35	0.46	0.50*	0.51*	0.32	-0.04	-0.30	-0.03
Octobre-fevrier								
Weinberger	-0.40	-0.30	-0.01	-0.04	-0.20	-0.50**	0.05	-0.01
Utah	-0.27	-0.45	0.06	-0.09	-0.21	-0.40*	-0.07	0.06
Caroline	-0.10	-0.44	0.03	-0.09	-0.12	-0.28	-0.06	0.07
Dynamique	-0.08	-0.42	-0.04	-0.05	-0.04	-0.44*	-0.07	0.11
Octobre-mars								
Weinberger	-0.31	-0.24	-0.12	-0.004	-0.10	-0.54**	0.04	-0.05
Utah	-0.19	-0.33	0.13	0.19	0.08	-0.02	-0.08	0.16
Caroline	-0.01	-0.15	0.06	0.22	0.05	-0.23	-0.04	0.03
Dynamique	-0.02	-0.19	0.10	0.10	0.06	-0.45*	-0.02	0.15
Fevrier								
GDH _(4,5)	0.08	0.15	-0.16	0.13	-0.03	0.40*	-0.03	-0.08
Mars								
GDH _(4,5)	-0.50*	-0.56*	-0.46	-0.44	-0.40*	0.09	0.40*	0.01
Avril								
GDH _(4,5)	0.011	-0.12	-0.11	-0.21	-0.05	0.11	-0.03	-0.02
Mai								
GDH _(4,5)	-0.40	-0.30	-0.20	-0.33	-0.34	-0.03	-0.33	-0.04
fevrier-Mai								
GDH _(4,5)	-0.26	-0.43	-0.27	-0.19	-0.40*	-0.23	-0.02	0.07

IV.2.2.2.Vigne

IV.2.2.2.1. Satisfaction des besoins en froid et en chaleur

Pour la variété ‘Muscat Italia’ de la vigne considérée comme une variété semi-précoce, les corrélations effectuées entre les dates annuelles de débourrement et de floraison et les températures mensuelles moyennes, minimales et maximales (tableau 17) ont laissé surgir une forte fluctuation dans la réponse de la variété à l’égard des deux sites contrastés, Benchicao (climat tempéré et chaud) et Boumedfaa (climat continentale et humide).

Au site de Benchicao, des corrélations positives et significatives entre les dates de floraison et les températures moyennes, minimales et maximales du mois de janvier et les températures moyennes et maximales du mois de février allant de 0.40* à 0.60** ont été obtenues.

De même, des corrélations significatives entre les dates de floraison et les températures moyennes, minimales et maximales des trois périodes s’étalant respectivement de novembre à janvier, de novembre à février et de novembre à mars, allant de 0.42* à 0.60** ont été révélés. Ces résultats indiquent que la satisfaction en froid était inversement un facteur déterminant du déclenchement de la floraison durant les mois de janvier et février.

Les corrélations négatives et significatives signalées entre les températures du mois de mars et les dates de débourrement et de floraison oscillant entre -0.40* et -0.44* ainsi que les fortes corrélations significatives et positives qui ont caractérisé la période de novembre à mars, signifient peut être qu’une accumulation de chaleur plus élevée durant l’écodormance pourrait déterminer la précocité de ces deux stades phénologiques.

En revanche, l’ensemble des corrélations obtenues au site de Boumedfaa ont reflété une certaine divergence dans la réponse phénologique de la variété à l’égard des températures enregistrées (tableau 17). Ce sont les températures moyennes, minimales et maximales du mois de décembre qui semblent jouer le rôle principale dans le processus de gain de temps de débourrement et de floraison avec des corrélations significatives et négatives de -0.40* et -0.44*.

Il semble que, les températures du mois de décembre à elles seules ont un effet dans la satisfaction des besoins en froid plus important que celui des températures durant les périodes de novembre-janvier et novembre-février, où des valeurs de corrélations faibles et non significatives ont été enregistrées.

Pour la satisfaction des besoins en chaleur, les corrélations positives et significatives avec les températures moyennes et minimales du mois de mars (0.40 et 0.45*) et les dates de débourrement reflètent l'effet des fortes chaleurs sur la tardivité des dates de débourrement et de floraison.

Tableau 17 : Corrélations de Spearman entre les températures mensuelles, moyennes, minimales et maximales et les deux stades phénologiques (débourrement et floraison) pendant la période d'octobre à mai chez la vigne (Deb : débourrement, Flor : floraison).

Mois	Benchicao						Boumedfaa					
	T° moy		T° min		T° max		T° moy		T° min		T° max	
	deb	flor	deb	flor	deb	flor	deb	flor	deb	flor	deb	flor
Octobre	-0.19	-0.25	-0.24	-0.36	-0.12	-0.11	0.32	-0.08	0.44*	0.10	0.21	-0.12
Novembre	-0.35	0.1	-0.27	0.03	-0.35	0.10	-0.05	-0.03	0.04	-0.006	-0.006	0.02
Décembre	-0.07	0.18	-0.08	0.10	-0.05	0.24	-0.40*	-0.32	-0.24	-0.25	-0.44*	-0.40*
Janvier	0.24	0.32	0.32	0.60**	0.40*	0.44*	-0.04	-0.02	0.14	0.05	-0.24	-0.05
Février	0.07	0.40*	-0.18	0.40*	-0.08	0.40*	-0.01	0.07	-0.03	0.011	-0.03	0.10
Mars	-0.40*	0.12	-0.43*	0.01	-0.30	0.23	0.40	-0.02	0.45*	-0.1	0.24	0.11
Avril	-0.05	0.11	-0.08	0.01	0.02	0.20	-0.02	-0.02	-0.03	-0.10	-0.001	0.08
Mai	-0.40*	-0.05	-0.36	-0.14	-0.34	-0.01	-0.30	-0.05	-0.25	-0.15	-0.33	-0.10
Nov-Jan	0.21	0.42*	0.22	0.29	0.20	0.50**	-0.15	-0.29	0.004	-0.18	-0.14	-0.22
Nov-Fev	0.17	0.53**	-0.06	0.60**	0.17	0.60**	-0.01	-0.05	0.07	-0.09	-0.08	-0.02

Nov-Mars	-0.08	0.60**	0.07	0.40*	0.033	0.60**	0.07	-0.06	0.15	-0.09	-0.15	-0.01
Mars-Avr	-0.28	0.19	-0.27	0.02	-0.26	0.24	0.22	0.12	0.31	0.30	0.14	0.17

Les * indiquent le niveau de signification de la corrélation (* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$).

Dans le but de déterminer le lien entre les deux stades phénologiques, soit le débourrement et la floraison avec les quantités de froid et de chaleur annuelles et mensuelles, des corrélations ont été établies et les valeurs ont été synthétisées dans le tableau 16 et le tableau 18. De faibles valeurs de corrélation non significatives ont été relevées sur le site de Benchicao entre le débourrement et les quantités de froid accumulées. Il semble que les quantités d'unités de froid annuelles n'ont pas constitué un facteur déterminant pour le déclenchement de ce stade phénologique (tableau 18). Cependant, des corrélations significatives et négatives entre les quantités d'unités de froid calculées avec les modèles Weinberger, Utah et Caroline du Nord avec les dates de floraison ont été soulevées (-0.44* à -0.54**). Cela peut suggérer que l'action du froid donne un gain important en termes de précocité de début de floraison. Une corrélation significative et positive a été enregistrée entre les quantités de chaleur et les dates de la floraison (0.40*).

Au site de Boumedfaa, des valeurs de corrélation faibles, négatives et non significatives ont caractérisé les liens entre les quantités annuelles d'unités de froid et d'unités de chaleur avec les deux stades phénologiques pour l'ensemble des modèles (tableau 18). Ce résultat pourrait être attribué à l'inefficacité de ces modèles dans un climat caractérisé par à un réchauffement climatique.

Tableau 18 : Valeurs de corrélation de Spearman entre les quantités annuelles d'unités de froid et de chaleur et les deux stades phénologiques de la vigne (débourrement et floraison) pendant la période d'octobre à mai (Weinb : Weinberger, Dyn : Dynamique, C.N : Caroline du Nord).

Site	Période d'accumulation des besoins en froid								Période d'accumulation des besoins en chaleur	
	Débourrement				Floraison				Débourrement	Floraison
	Weinb	Utah	Dyn	C.N.	Weinb	Utah	Dyn	C.N.		
									GDH	GDH
Benchicao	-0.10	0.08	0.05	0.06	-0.54**	-0.44*	-0.23	-0.45*	-0.30	0.40*
Boumedfaa	0.04	0.1	-0.04	-0.02	-0.051	0.04	0.05	0.15	-0.17	0.07

Les corrélations entre les dates de débourrement et de floraison de la vigne et les quantités mensuelles d'unités de froid et de chaleur accumulées sont présentées dans le tableau 16. Des corrélations significatives et négatives ont été révélées allant de -0.40* à -0.46* entre les quantités d'unités de froid calculées avec les modèles Weinberger et Utah et les dates de débourrement et de floraison, durant le mois de janvier. Il semble que le froid du mois de janvier joue un rôle prépondérant dans la précocité de ces deux phases au site de Benchicao. Les corrélations significatives et négatives durant les périodes, octobre-février et octobre-mars allant de -0.40* à -0.54* au niveau des modèles, Utah, Weinberger et Dynamique ont donné un accent sur l'importance des unités de froid accumulées au mois de janvier dans la précocité des deux stades phénologiques, notamment les dates de floraison. Il est à signaler que des corrélations significatives et négatives ont été obtenues au cours du mois de novembre entre les dates de floraison et les quantités d'unités de froid avec le modèle Dynamique. Il semble que les unités de froid accumulées en novembre pourraient avoir un effet sur la précocité de la floraison.

Les quantités d'unités de chaleur des mois de février et de mars semblent avoir un effet notable durant la phase post-dormance et sur la floraison et ce par le biais des corrélations négatives et significatives sur le débourrement et la floraison (voir tableau 16) à Benchicao.

L'analyse des corrélations mensuelles entre les quantités d'unités de froid et de chaleur avec les stades de débourrement et de floraison au site de Boumedfaa, n'a révélé que des valeurs faibles et non significatives durant tous les mois et avec tous les modèles de froid mise à part le mois de mars, où des corrélations négatives et significatives allant de -0.40^* à -0.45^* entre les dates de débourrement et les quantités d'unités de froid calculées par les modèles Weinberger et Utah. Hormis une valeur de corrélation significative entre les quantités d'unités de chaleur et les dates de débourrement pendant le mois de mars, l'ensemble des valeurs de corrélations ont été non significatives pour les deux stades (tableau 16). Cela suggère que les unités de chaleur n'étaient pas un facteur déterminant dans ce site, qui s'est caractérisé par une tendance au réchauffement.

IV.2.3. Détermination des périodes affectant les dates de floraison

Pour plus d'informations sur les périodes de l'année affectant le plus les dates de floraison des deux espèces étudiées, le pommier avec la variété 'Golden Delicious' et la vigne avec la variété 'Muscat Italia', une analyse de régression des moindres carrés partiels (RMCP) ou PLS (Partial Least Squares) a été effectuée. Cela a mené à une détermination des périodes d'accumulation d'unités de froid et de chaleur pour ces deux espèces.

Chez le pommier, les résultats de régression PLS (annexe 3) dans les deux régions contrastées Benchicao et Sidi Lakhdar, ont révélé, des divergences notables concernant les dates de floraison. Deux périodes ont été notées, durant lesquelles le début floraison avait une corrélation significative avec la température moyenne. Ces deux périodes ont laissé apparaître une variation spatiale de la floraison. Les corrélations positives des coefficients normalisés (courbes en vert) des figures (33a et b) signifient que l'augmentation de la température moyenne induit des dates plus tardives de début floraison. Alors que les corrélations négatives (courbes en rouge) indiquent que les avancées de la floraison sont liées à des augmentations des températures moyennes. La régression RMCP a montré des corrélations négatives au cours de la deuxième période. Un meilleur ajustement du modèle avec les données a été obtenu tel qu'indiqué par les faibles valeurs de l'erreur quadratique (Root Mean Square Error, RMSE).

A Benchicao, la première période allant de 3 novembre jusqu'au 31 janvier (figure 33a) était caractérisée par des corrélations significatives et positives entre le retardement des dates de floraison et les températures moyennes, notamment celles enregistrées dans la première décennie de novembre, la dernière décennie de décembre et en début de janvier, reflétant l'importance de cette période dans l'accumulation des unités de froid. Des corrélations négatives et significatives ont été identifiées au cours de la deuxième période qui s'est étalée du 29 février au 29 avril avec une RMSE de 3.24 jours.

Au site de Sidi Lakhdar connu par sa tendance au réchauffement climatique, les résultats d'analyse PLS (figure 33b) ont montré une grande divergence entre la floraison à ce site et celle à Benchicao. En effet, deux périodes ont été décelées, la première période allant de 19 octobre au 6 novembre avec des corrélations positives et significatives entre la tardivité des dates de début de floraison et les températures moyennes et une deuxième avec des corrélations négatives et significatives indiquant l'avancement des dates de floraison avec l'augmentation des températures moyennes allant de 21 décembre jusqu'au 24 avril avec une RMSE de 4.92 jours.

Le comportement de la variété 'Muscat Italia' de la vigne s'est montré assez différent entre les deux sites d'étude, Benchicao et Boumedfaa, marquant ainsi une variation spatiale des dates de début de floraison. A Benchicao, deux périodes ont caractérisé la réponse de la vigne vis-à-vis des températures moyennes, la première a été caractérisée par des corrélations positives entre la tardivité des dates de floraison et l'augmentation des températures moyennes, elle s'est étalée de 7 novembre au 23 avril. Néanmoins, cette signification était plus importante au cours des mois de décembre, janvier et février, c'est la période d'accumulation des unités de froid. De même, des corrélations négatives, sont apparues dans la deuxième période indiquant un lien entre l'avancement des dates de floraison et l'augmentation des températures moyennes allant de 12 mars au 28 mars avec une RMSE de 10.2 jours. Il est à retenir qu'une troisième période a été révélée, marquée par des corrélations positives entre le retard des dates de floraison et les températures moyennes. Elle s'est étalée entre 11 avril et 23 avril (figure 34a).

Au site de Boumedfaa, deux périodes ont été apparues, la première période a été caractérisée par des corrélations négatives reflétant un avancement des dates floraison sous l'effet de l'accroissement des températures moyennes, allant de 14 novembre jusqu'au 6 mars avec une RMSE 5.7 jours. Des corrélations positives ont caractérisé la deuxième période,

s'étalant du 11 mars au 9 avril, reflétant ainsi une tardivité de la floraison induite par l'augmentation des températures moyennes (figure 34 b).

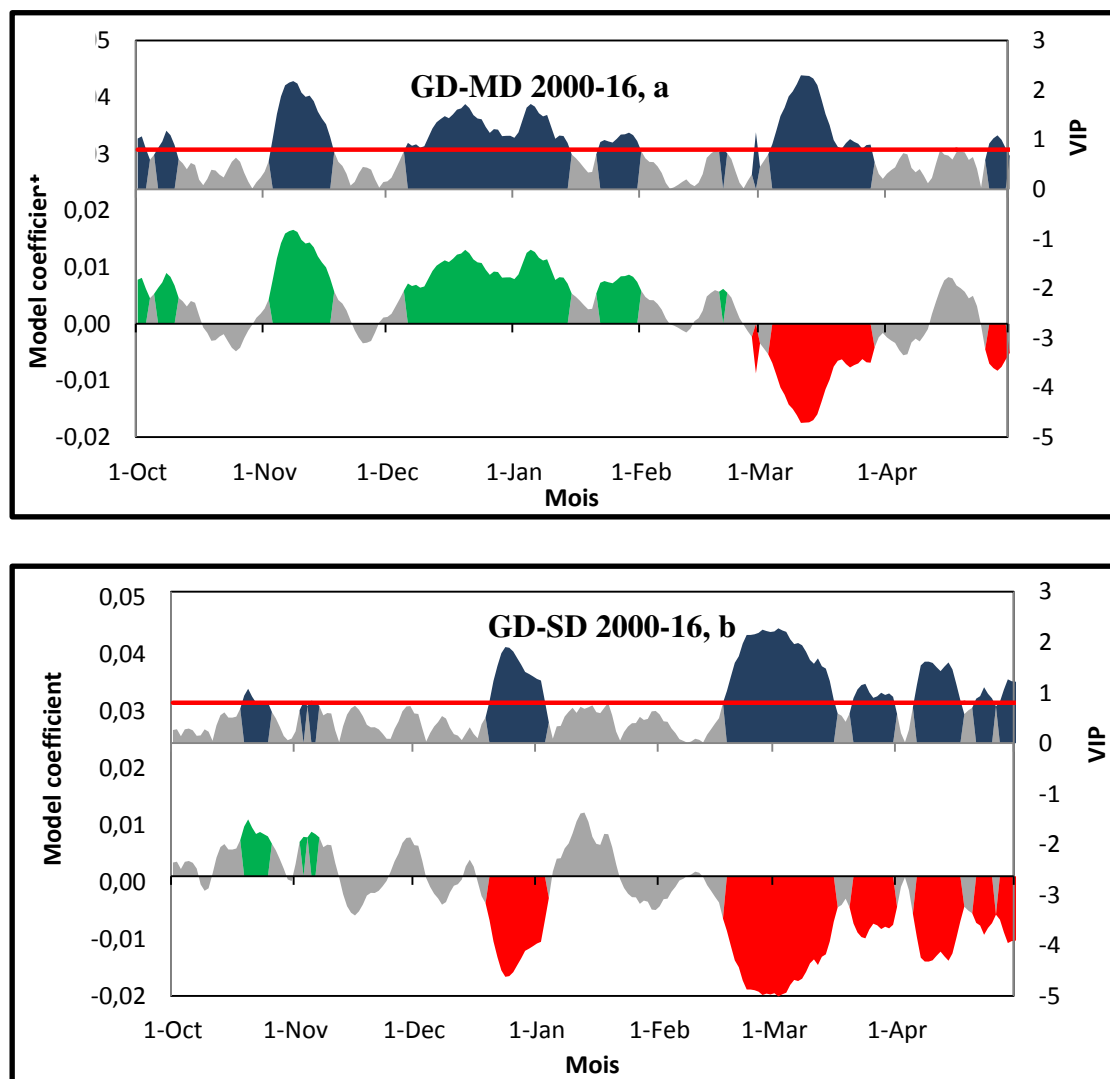


Figure 33 : autocorrélation par PLS entre la moyenne mobile de 11 jours des températures moyennes journalières de la période octobre- mai et les dates de début de floraison de la variété 'Golden Delicious' du pommier, a) Benchicao et b) Sidi Lakhdar.

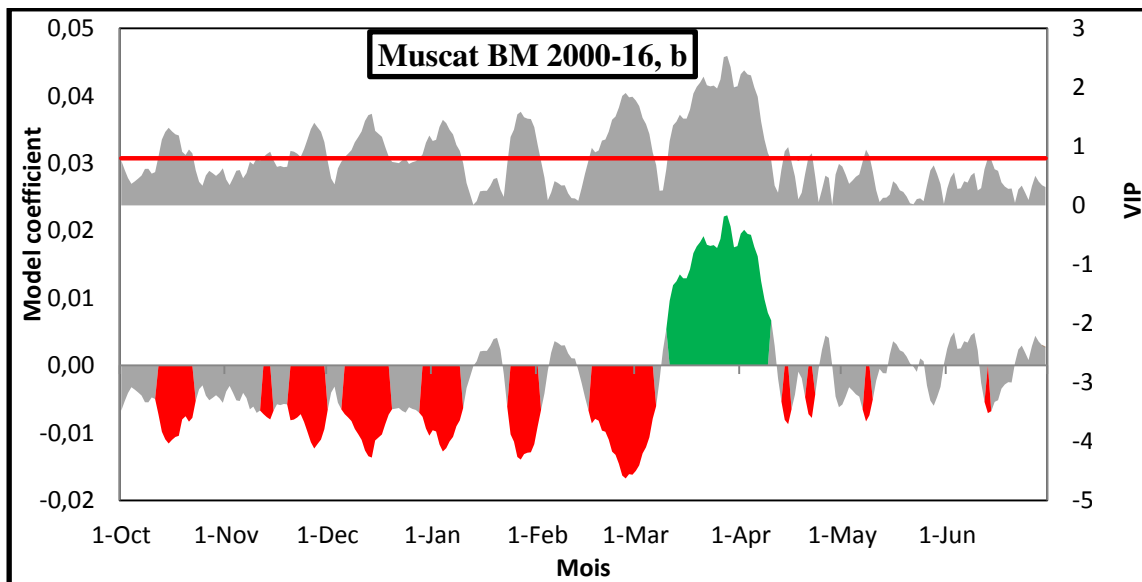
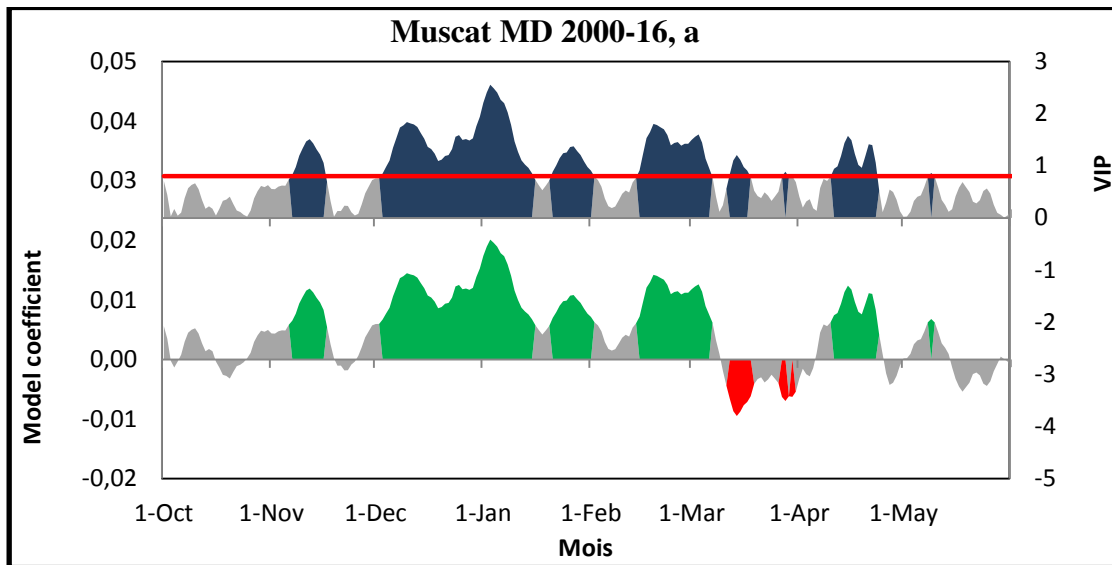


Figure 34 : autocorrélation par PLS entre la moyenne mobile de 11journs des températures moyennes journalières de la période octobre- mai et les dates de début de floraison de la variété ‘Muscat Italia’ de la vigne, a) Benchicao et b) Boumedfaa.

IV.2.4. Discussion

La sensibilité des phénophases aux variations de température est un bon indicateur des impacts biologiques du changement climatique à long terme et sur les écosystèmes terrestres (Richardson et al, 2013). Plusieurs études ont montré que les phénophases les plus sensibles aux variations de températures sont celles se déroulant au printemps ou en été et qu'il existe une relation relativement linéaire entre l'occurrence de ces phénophases et la température (Gordo et Sanz, 2005; Beaubien et Hamann, 2011; Morin et al, 2010). Notre étude est une première tentative visant à évaluer l'impact du réchauffement climatique sur le débourrement et la floraison de deux cultures, soit le pommier et la vigne dans le nord de l'Algérie.

Le réchauffement très prononcé des mois d'octobre et avril au site de Sidi Lakhdar (SD) est susceptible de perturber fortement l'entrée en endodormance et l'écodormance de la variété 'Golden Delicious' du pommier d'où une tendance vers une tardivité du débourrement et de la floraison de la variété du pommier. A l'opposé, le réchauffement signalé durant les mois d'octobre et d'avril, en plus du mois de mai à Boumedfaa, a accordé une précocité plus ou moins modérée au débourrement des bourgeons floraux de 'Muscat Italia' de la vigne. Selon Pouget (1966), la vitesse de débourrement varie selon une loi de nature exponentielle en fonction de la température, mais seulement dans l'intervalle de 15-25°C. Au-dessus de 25°C, la vitesse croît beaucoup plus lentement et paraît même atteindre un palier au voisinage de 30°C. Au-dessous de 15°C, elle décroît d'autant plus rapidement que la variété est plus tardive. Il semble donc exister, entre 10°C et 15°C, une discontinuité dans la variation de la vitesse de débourrement. De plus, les processus physiologiques qui déterminent la croissance interne des bourgeons et le débourrement sont d'autant plus fortement freinés par l'abaissement de la température, au-dessous de 15°C, que la variété est plus tardive.

Cependant, le site de Benchicao (MD) ne montre pas de réchauffement global et tend même vers une tendance au refroidissement des mois de novembre et février qui pourrait favoriser une entrée en endodormance et un début de satisfaction en unités de froid puis une accélération de la reprise de croissance conduisant à une plus grande précocité du débourrement pour le pommier. Ce refroidissement ne favorisait pas le débourrement de la variété 'Muscat Italia' de la vigne qui a été caractérisé par une tendance significative à la tardivité, mais il lui a attribué une certaine précocité à la floraison. L'établissement du moment de la levée d'endodormance est importante (Guerriero et al, 2002), mais est entravé

par la complexité du processus, notamment par le fait que, dans les conditions naturelles, les températures froides et chaudes alternent, pouvant provoquer des «inversions» dans le processus de levée d'endodormance (Overcash et Campbell, 1955; Couvillon et Erez, 1985; Erez et Couvillon, 1987). Certains résultats suggèrent qu'une insatisfaction partielle en unités de froid peut être compensée par un supplément en unités de chaleur pour conduire au débourrement (Dantec, 2014).

Pour lever l'endodormance, le bourgeon doit accumuler suffisamment d'unités de froid (Campoy et al, 2011). Quand la plante a atteint ses besoins en unités de froid, l'endodormance est levée et les bourgeons peuvent reprendre leur croissance dès que les conditions deviennent favorables, c'est à dire sous certaines conditions de températures plus chaudes, d'humidité du sol et de nutriment, et pour les espèces photosensibles, certaines conditions de photopériode (Körner et Basler, 2010; Polgar et Primack, 2011). Ces conditions favorables doivent durer pendant un certain temps pour que l'éclatement des bourgeons apparaisse.

Le déclenchement du débourrement et de la floraison du pommier au site de Benchicao ou au site de Sidi Lakhdar est fortement lié à l'évolution des températures moyennes minimales et maximales des mois de la période allant d'octobre à février, correspondant à la période d'accumulation des besoins en unités de froid et de chaleur, sachant qu'on a pris en considération que les années qui correspondent aux observations phénologiques. Etant donné que les besoins en unités de froid n'ont pas été souvent satisfaits notamment pour les années 2001, 2007, 2010 et 2016 à Sidi Lakhdar, où on a obtenu des valeurs sous le seuil de satisfaction des besoins en unités de froids estimés à 900 UF pour le pommier 'Golden Delicious', quand elle a lieu, la satisfaction des besoins en unités de froid est plus tardive, vers la mi-février et ne démarre vraiment que vers la fin novembre. Tout conduit à une importance prépondérante du mois de janvier dans le déroulement du processus de la levée d'endodormance et il sera intéressant de regarder ce que donnent les scénarios climatiques du futur pour cette période particulière pour le choix des futures variétés du pommier.

Les besoins en unités de froid ont été toujours comblés pour lever l'endodormance du pommier au site de Benchicao, et ceci dès la fin du mois de décembre ou la première moitié du mois de janvier. Les mois de novembre et décembre jouent un rôle sur la précocité au site de Benchicao (corrélation négative avec la date de débourrement ou de floraison). Cela ne peut se comprendre que si l'organogénèse dans les bourgeons se prolonge pendant ces deux

mois et donc qu'il n'y a pas encore d'endormance à cette période. L'augmentation observée des températures moyennes de novembre et des minimales d'octobre est cohérente avec cela.

Au site de Benchicao, le mois de mars est crucial pour la précocité, ce sont les températures de ce mois qui permettent la croissance après la satisfaction des besoins en unités de froid vers la fin de décembre et le début de janvier d'autant que les températures de février restent assez basses (et tendent vers un refroidissement). La tendance à la tardivité au site de Benchicao est donc cohérente avec le refroidissement du mois de février. Comme la satisfaction des besoins en unités de froid peut déclencher l'entrée en floraison et induire la précocité de ce dernier, la hausse des températures en période d'accumulation des besoins en unités de chaleur peuvent raccourcir aussi la durée de la floraison et crée un avancement des dates de celle-ci. Les tendances à l'avancement des dates de floraison de nombreux arbres indiquent que les processus de rupture de la dormance sont en effet en train de changer, probablement en réponse au changement climatique (Guédon et Legave, 2008; Legave et al, 2009).

Le réchauffement d'octobre au site de Sidi Lakhdar peut expliquer une entrée en endormance plus tardive. Les températures douces (12°C) dès février peuvent ensuite accélérer le débourrement et la floraison, du moins pour les années où les besoins en unités de froid ont été satisfaits. Si non, la levée d'endormance sera fortement retardée ou perturbée. Selon une étude de Legave et al (2015), réalisée dans trois pays géographiquement contrastés de la région méditerranéenne, au Maroc (Meknès), en France (Nîmes) et en Italie (Forlì) au cours des 40 dernières années dans le but de comprendre l'impact du changement climatique, en particulier l'augmentation de la température, sur le pommier 'Golden Delicious', il s'est avéré que la période de forçage est plus courte à Meknès. Legave et al (2013) ont également mis en évidence une tendance marquée vers des durées simulées plus courtes de période de forçage et de retard de la période d'endormance.

Le fonctionnement physiologique du pommier 'Golden Delicious' durant la période de dormance et de croissance peut expliquer, en partie, les différences régionales observées dans les dates de floraison (Heide, 1993). El Yaacoubi et al (2014) ont aussi rapporté que la température printanière semble être essentielle à la floraison complète dans les climats doux. Dans ce dernier cas, des dates de pleine floraison précoces sont survenues lorsque la température moyenne pendant la période de forçage dépasse rapidement les 15°C, sous réserve d'une satisfaction suffisante des besoins en unités de froid.

Selon Malagi (2014), quatre modèles de temps de floraison différents ont été observés synthétiquement pour la variété 'Golden Delicious' du pommier, quel que soit la phase phénologique, en réponse à différentes conditions de température dans l'espace et dans le temps:

- Un réchauffement printanier marqué pendant l'écodormance dans les régions continentales de l'Europe occidentale, principalement sous l'effet des conditions de température de février, mars ou même avril expliquant les avancées de la floraison depuis la fin des années 1980.
- Un réchauffement printanier marqué pendant l'écodormance dans les régions méditerranéennes et océaniques de l'Europe occidentale associé à des baisses en cumul des unités de froid pendant la dormance, a entraîné une diminution des avances moyennes de floraison depuis la fin des années 1980.
- Des relations relativement faibles ont été trouvées avec l'accumulation d'unités de chaleur au cours de la période mars-avril en Afrique du Nord et moins nettes que dans les régions européennes. Le réchauffement printanier ayant également eu lieu au Maroc, bien que plus tardif qu'en Europe. Cela peut expliquer les avancées de la floraison depuis le début des années 1990. Des relations ont été décelées avec l'accumulation d'unités de froid en octobre ainsi qu'en novembre et décembre suggéraient des besoins supplémentaires en cumul d'unités de froid (choix des variétés plus tolérantes). C'est le cas de site au Sidi Lakhdar.
- Un manque en cumul d'unités de froid dans le sud du Brésil, principalement entraîné par les conditions de température de juin mais aussi par celles d'avril, mai et juillet suggéraient une période de non satisfaction en unités de froid relativement longue dans des conditions douces. L'absence de réchauffement significatif ou faible pendant l'endodormance et l'écodormance peut expliquer les tendances inchangées de la période de floraison, à l'exception de légères avancées possibles à Caçador (Brésil) dues à des augmentations des températures douces de septembre.

Le manque d'accumulation d'unités de froid est associé actuellement à des troubles phénologiques dans les régions douces, communément appelés les symptômes de refroidissement inadéquat. Ils sont nombreux et varient selon les espèces. En général, ils apparaissent comme des retards excessifs du débourrement et de la floraison, et des périodes prolongées de floraison conduisant à une nouaison irrégulière (Atkinson et al, 2013). Selon Oukabli et Mahhou (2007), des symptômes de refroidissement inadéquat du pommier au Maroc sont actuellement observés pour des besoins en unités de refroidissement comme ceux de 'Golden Delicious' à des sites comme Meknès (Maroc) où la température moyenne pendant la période de refroidissement était d'environ 14°C. Ces symptômes sont moins observés dans la zone de culture montagnaise où la satisfaction des besoins en unités de refroidissement était un problème plus marginal (température moyenne pendant la période d'accumulation en unités de chaleur autour de 12 ° C).

Hormis le modèle Dynamique qui a présenté une certaine fiabilité dans la quantification des besoins en unités froid du pommier dans le site de Sidi Lakhdar, les autres modèles utilisés (Weinberger, Utah et Caroline du Nord) se sont montrés déficients en terme de calcul des unités de froid. Le modèle Dynamique est le seul parmi les modèles couramment utilisés qui peut être appelé «basé sur les processus» (par opposition à purement empirique), même si le développement du modèle était basé sur des processus hypothétiques (Fishman et al, 1987a, 1987b), plutôt que sur des processus ayant une base scientifique solide (Luedeling, 2012). Les mises en relation des modèles des heures de froid (Cossa-Raynaud, 1955; Weinberger, 1950), Utah et Dynamique ont révélé que ce dernier est le plus approprié aux conditions hivernales chaudes des régions de production de la Tunisie avec le plus faible coefficient de variation (Elloumi et al, 2013 ; Ghrab et al, 2014a). Dans une étude faite par Benmoussa (2018) sur l'estimation des besoins en unités de froid et en chaleur de 37 variétés d'amandier et sur l'effet des hivers doux sur la floraison, le modèle Dynamique a fourni les estimations des besoins en unités de froid les plus précises même s'il semblait encore avoir des limites.

Le schéma de l'évolution des stades phénologiques de la vigne en fonction des températures est globalement le suivant : au site de Benchicao la satisfaction des besoins en unités de froid débute au mois de janvier et arrive au maximum vers le mois de février. Néanmoins, les corrélations positives résultantes entre les températures des périodes s'étalant de novembre à janvier et de novembre à février traduisent une importance inversement

proportionnelle des températures du mois de novembre dans la satisfaction des besoins en unités de froid. Selon Pellegrino et al (2020), il est admis qu'une période de 200 heures (huit jours) avec une température moyenne quotidienne $\leq 8^{\circ}\text{C}$ permet le débourrement des bourgeons de la vigne dans un délai raisonnable et à un niveau acceptable.

Les besoins en unités de froid pour lever l'endodormance sont stables pour un cépage donné, que la période froide soit entrecoupée de périodes chaudes ou non. Toutefois, ces besoins en froid varient entre les variétés. Les températures chaudes ($>10^{\circ}\text{C}$) permettent le débourrement et le développement des rameaux. De même, les températures du mois de mars jouent un rôle important dans l'accumulation des besoins en unités de chaleur pour lever l'écodormance et déclencher le débourrement et la floraison ainsi que la précocité de celle-ci. Cependant, il semble que les températures du mois de février contribuent aussi à accroître l'activité des bourgeons en terme de floraison d'où les corrélations significatives et négatives obtenues durant ce mois.

L'endodormance implique des événements de perception contrôlant la croissance qui sont entièrement dans le bourgeon floral. Les températures de refroidissement, en automne et en hiver, sont perçues par le bouton floral et les effets cumulatifs de refroidissement (besoin en unités de froid) sont généralement considérés comme le principal facteur du processus de rupture d'endodormance (Tromp, 2005). Après la libération de l'endodormance, la phase d'écodormance est associée à des conditions environnementales inadaptées à la croissance active du bourgeon floral, en raison des basses températures, carence en nutriments ou stress hydrique.

Dans la pratique standard des vergers, les effets cumulatifs des températures modérées et élevées en hiver et au printemps (besoin en unités de chaleur) sont généralement considérés comme les principaux facteurs qui déterminent la phase de croissance active (débourrement), entraînant l'ouverture des boutons floraux. Le matériel génétique italien de *Vitis vinifera* L. est caractérisé par une grande diversité génomique, résultant d'une sélection naturelle et humaine qui a établi une relation stricte entre le cultivar et l'environnement (Andreini et al, 2009).

Au site de Boumedfaa, qui a une tendance vers un réchauffement climatique, le comportement de la variété semble différent de celui à Benchicao. En effet, ce sont les températures moyennes du mois de décembre qui semblent avoir un effet sur la levée de

l'écodormance et l'entrée en débourrement, ajouté à cela les températures maximales qui ont un gain de précocité pour la floraison. Il est à noter que l'effet cumulatif d'unités de froid a été poursuivi jusqu'au mois de mars, ce qui a pu donner un gain de précocité à cette variété. Cette relation entre les besoins en unités de froid et les dates de débourrement durant le mois de mars peut refléter les besoins de la plante en unités de froid pendant la période qui s'étale entre la dormance des bourgeons jusqu'à la croissance. Les températures moyennes et minimales du mois d'octobre affecte d'une manière inversement proportionnelle sur l'avancement de débourrement.

L'accumulation des besoins en unités de chaleur débute au mois de mars pour ce site aussi. L'effet le plus marquant d'une augmentation des températures est une avancée des cycles végétatifs et reproductifs de la vigne. Les différents stades phénologiques (débourrement, floraison, véraison, maturité) sont atteints plus précocement, ce qui a pour répercussion que la maturation se déroule plus tôt en saison (Van Leeuwen, 2016).

Le contexte actuel du changement climatique questionne sur ses impacts sur les cultures, notamment la vigne. La vigne est une plante très sensible à la variabilité des conditions climatiques (Nigond, 1968 ; Tonietto, 1999 ; Galet, 2000 ; Chuine et al, 2004). La variabilité inter- et intra-annuelle du climat agit sur le déroulement du cycle végétatif via l'occurrence précoce ou retardée des principaux stades phénologiques (débourrement, floraison, véraison, maturité) et sur les différences de typicité des vins produits d'une année sur l'autre (Jones, 2005).

D'après Cuccia et al (2010), la précocité et/ou la tardivité d'un stade ne s'accompagne pas systématiquement d'une précocité et/ou de la tardivité du stade qui le suit. En effet, la variabilité intra-annuelle agit de façon considérable sur la succession des stades.

Les impacts attribuables au changement climatique sont déjà notables sur les cultures pérennes, en particulier la viticulture. Ils varient selon la région viticole, mais en général une avancée importante des stades phénologiques de la vigne et une évolution significative de la composition des raisins ont été observées (Jones et Davis, 2000 et Jones, 2006 ; Duchêne et Schneider, 2005; de Cortazar Aauri, 2006). La poursuite du changement climatique au cours des prochaines décennies pose la question sur des stratégies d'adaptation (Barbeau, 2014).

L'efficacité des modèles de calcul des besoins en unités de froid et en chaleur pour la vigne semblent ne pas être fiables au site de Boumedfaa, même le modèle Dynamique qui a

présenté une efficacité de quantification acceptable au site de Sidi Lakdar pour le début débourrement et le début floraison du pommier.

Selon Benmoussa (2018), bien que le modèle Dynamique soit souvent avéré le plus approprié parmi les modèles de quantification des besoins en unités de froid, en particulier dans les régions chaudes, il ne semble pas bien adapté au climat chaud de Sfax (Tunisie). L'absence d'une période initiale pendant laquelle les portions de froid s'accumulent mais ne sont pas encore efficaces peut indiquer que le modèle Dynamique n'a pas capturé l'accumulation d'unités de froid avec suffisamment de précision pour détecter tout froid efficace dans les conditions chaudes de la Tunisie. De même, Benmoussa et al (2017) ont constaté qu'avec le modèle Dynamique, il était difficile de déterminer le début de la période de refroidissement pour de nombreux cultivars d'amandiers à Sfax (Tunisie).

Sur la base des sorties de régression des moindres carrés partiels (PLS), les périodes d'accumulation d'unités de froid et de chaleur ont été identifiées. Les résultats ont montré que les phases d'accumulation d'unités de froid et de chaleur déduites des sorties de la régression étaient discontinues pour les deux variétés étudiées 'Golden Delcious' du pommier et 'Muscat Italia' de la vigne dans les sites d'étude.

Pour la variété du pommier, la période d'accumulation des besoins en unités de froid est apparue plus longue au site de Benchicao que celle à Sidi Lakhdar. Cependant, la période de forçage (accumulation des besoins en unités de chaleur) a été raccourcis à ce site (Benchicao) par rapport à Sidi Lakhdar (≈ 4 mois). L'élongation de la période de forçage au site de Sidi Lakhdar a induit une certaine précocité et raccourcissement de la période de floraison, contrairement au site de Benchicao. El Yaacoubi (2016), a signalé que la période d'accumulation des unités de froid pour la variété 'Golden Délicious' à Meknés (Maroc), s'est étalée de 9 octobre au 26 février, alors que la période d'accumulation des unités de chaleur, était de 27 février au 29 avril. Le même auteur a rapporté que la période d'accumulation des unités de chaleur a été plus longue dans les sites à Forli en Italie qui ont connu une tendance vers un réchauffement climatique et où les températures moyennes durant la période de satisfaction des besoins en unités de chaleur ont joué un rôle important dans le développement floral. Les changements dans le comportement du pommier seraient en lien avec l'augmentation des températures moyennes, notamment dans les climats chauds. Cette évolution reflète une tendance vers une vulnérabilité plus importante du climat.

Les résultats de la régression partielle des dates de début floraison de la variété 'Muscat Italia' de la vigne en fonction des températures moyenne durant les périodes d'accumulation des besoins en unités de froid et chaleur ont reflété une forte variation spatiale. La longue période d'accumulation des besoins en unités de froid au site de Benchicao, a fortement influencé le développement floral, d'où une dormance profonde des bourgeons, renforcé par un abaissement des températures moyennes s'étalant jusqu'à la fin mars, induisant ainsi une tardivité marquée de la floraison. Au site de Boumedfaa, où une tendance de réchauffement climatique a été signalée, l'augmentation des températures moyennes pendant la période d'accumulation de froid s'étalant entre novembre et mars a fortement perturbé la dormance des bourgeons de la vigne, d'où une précocité de débourrement et de floraison.

IV.3. Modélisation phénologique du pommier et de la vigne via PMP 5.5

Deux facteurs ont été pris en considération dans La modélisation phénologique des deux variétés, 'Golden Delicious' du pommier et 'Muscat Italia' de la vigne,

- 1) Site :
 - a) Modélisation phénologique de la variété aux sites confondus (les deux sites ensemble)
 - b) Modélisation phénologique de la variété pour chaque site individuellement.

- 2) Mode de modélisation :
 - c) A une phase, pour la période de cumul en unités de chaleur à l'aide des fonctions, Richardson (1974), Smoothed Utah (Bonhomme et al. 2010), Sigmoid (Hänninen, 1990b) et Threshold superior, GDD (Reaumur, 1735), Parabolic (Chuine et Beaubien, 2001) et Wang (Wang et Engel, 1998) pour le débourrement et la floraison.

 - d) A deux phases successives en mode séquentiel, où la fin de la première phase (atteinte en cumul d'unités de froid) est le début de la deuxième phase (atteinte en cumul d'unités de chaleur) pour le débourrement et la floraison. Six modèles ont été testés, Chuine / Sigmoïde, Chuine / Wang, Smoothed Utah / Sigmoïde, Smoothed Utah / Wang, Richardson Inverse / Sigmoïde et Richardson Inverse / Wang.

Chaque analyse intégrant une valeur à expliquer (date de débourrement ou date de floraison), une fonction (Chuine, Richardson inverse, Sigmoïde, SmoothedUtah, Wang) et un critère climatique (température moyenne) (ou des combinaisons de fonctions et de critères), génère plusieurs modèles dans lesquels les paramètres des modèles sont ajustés grâce à 20 répétitions par modèle.

Le modèle le plus adapté est choisi pour visualiser la prédiction des données. Le choix du modèle le plus est basé sur (1) l'efficacité du modèle qui représente la part de variabilité expliquée par le modèle par rapport à la variabilité totale et sur (2) les paramètres donnés par le modèle, soit les paramètres de la fonction étudiée (la pertinence physiologique des courbes de réponse à la température pour la phase de cumul d'unités de froid et la phase de cumul d'unités de chaleur), la date T0 prédite (La date T0 nous indique à partir de quel jour de l'année la plante prend en compte la température) et le SStar (somme des jours où la

variable choisie a atteint le stade phénologique étudié) et l'erreur quadratique (Root Mean Square Error» RMSE).

IV.3.1. Modélisation phénologique de la variété 'Golden Delicious' du pommier.

IV.3.1.1. Modélisation pour les sites confondus (deux sites ensemble) Benchicao

(Médéa) et Sidi Lakhdar (Ain Defla).

a) A une seule phase

La modélisation des dates de débourrement et de floraison à une phase a émis des résultats allant de très faibles à moins bonnes, à raison des valeurs d'efficacité faibles oscillant entre 0.12 à 0.30 et de RMSE allant de 5.8 à 6.3. Cependant, il est à noter que les modèles Smoothed Utah, Threshold Superior et Wang ont enregistré des résultats plus ou moins importants par rapport aux autres modèles (tableau 19). La figure 35 présente les deux modèles, Smoothed Utah et Wang de débourrement et de floraison où l'axe des abscisses présente les dates relevées et l'axe des ordonnées présente les dates prédites.

Tableau 19 : Résultats de modélisation à une phase des dates de débourrement et de floraison du pommier des deux sites ensemble.

Deux sites		Pommier,					
Stades phénologiques	Modèle	Débourrement				Floraison	
		Smoothed Utah	Theshold Superior	Threshold Superior	Wang		
	T0	60	55	60	58.3		
	SStot	1946.97	1946.97	1946.9	1526.11		
	SSres	1388.8	1388.15	1392.3	1112.8		
	RMSE	6.3	6.38	6.3	5.7		
	EFF	0.28	0.28	0.28	0.27		
	Paramètres	Tm1 6.40	Vb 5.05	Vb 5.09	Topt 15.25	Tmin 3.06	Tmax 49.21
		Topt 15.1					
		Tn2 49.9					
		Min 0					

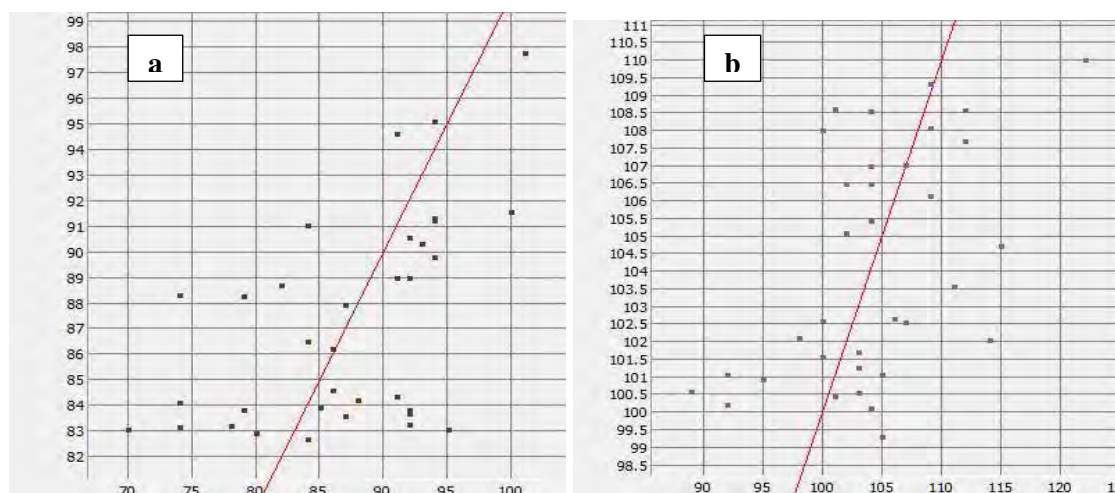


Figure 35 : Comparaison entre les dates observées de débourrement et de floraison et les dates prédites pour le pommier, a) dates de débourrement par le modèle Smoothed Utah dans les deux sites, b) dates de floraison par le modèle Wang (abscisse : dates observées, ordonnée : dates prédites).

b) A deux phases

Afin d'avoir une vision globale sur la succession des deux périodes d'accumulation des unités de froid et de chaleur en mode séquentielle pour les deux stades phénologiques, le débourrement et la floraison dans les deux sites, deux modèles ont été retenus en se basant sur les valeurs d'efficacité des modèles, les valeurs de RMSE et la pertinence physiologique des courbes de réponse à la température. Le modèle Chuine / Wang a donné une meilleure modélisation des dates de débourrement avec une valeur d'efficacité de 0.49 et une RMSE de 5.3 (voir tableau 20). De même, le modèle Chuine / Sigmoid a été plus représentatif avec une RMSE de 4.8 et une efficacité de 0.47 (figure 36).

Les RMSE peuvent sembler acceptables (~ 5 jours) pour la floraison mais les efficacités sont moins bonnes. La corrélation entre les valeurs observées et les valeurs prédites confirme ce diagnostic (Figure 36).

On améliore très légèrement l'efficacité (en atteignant une différence de 0.03 à 0.09) et en essayant de réduire la valeur de RMSE, par retrait des années ou le cumul des unités de froid n'est pas satisfaisant au site de Sidi Lakhdar, il s'agit des années d'anomalies, 2001, 2007, 2010 et 2016. En effet la suppression des années d'anomalies a augmenté

légèrement l'efficacité et le RMSE, notamment au niveau de la floraison. Selon le tableau 20, c'est toujours le modèle Chuine / Wang qui a donné le meilleur résultat pour le débourrement avec une RMSE de 5.4 et une efficacité de 0.50, alors qu'une meilleure modélisation des dates de floraison a été obtenue avec le modèle Smoothed Utah/ Sigmoid où l'efficacité et le RMSE ont atteint respectivement 0.47 et 0.56 (voir figures 37a et b).

Tableau 20: Résultats de modélisation à deux phases des dates de débourrement et de floraison du pommier dans les deux sites ensemble.

Deux site	Pommier avec toutes les années				Pommier sans les années 2001, 2007, 2010 et 2016			
Stade phénologique Modèle	Débourrement		Floraison		Débourrement		Floraison	
	Chuine/ Wang		Chuine/	Sigmoid	Chuine /Wang		Smoothed Utah/Sigmoid	
T0	-107.8		-81.1		-110.6		61.4	
SStot	1946.9		1526.1		1745.4		1190.3	
SSres	986.18		807.08		873.88		518.00	
RMSE	5.39		4.87		5.40		4.1	
EFF	0.49		0.47		0.50		0.56	
Paramètres	Chuine A 0.50 B 12.70 C 27.04	Wang Top 20.6 Tmin 3.3 Tmax43.1	Chuine A 0.20 B 4.67 C 24.28	Sigmoid D -40 E 6.4	Chuine A -0.68 B -28.90 C 15.36	Wang Top 17.09 Tmin 2.4 Tmax 26.36	Smoothed Tm1 9.72 Top 18.45 Tn ₂ 27.52 min -0.87	Sigmoid D 27.52 E -0.867

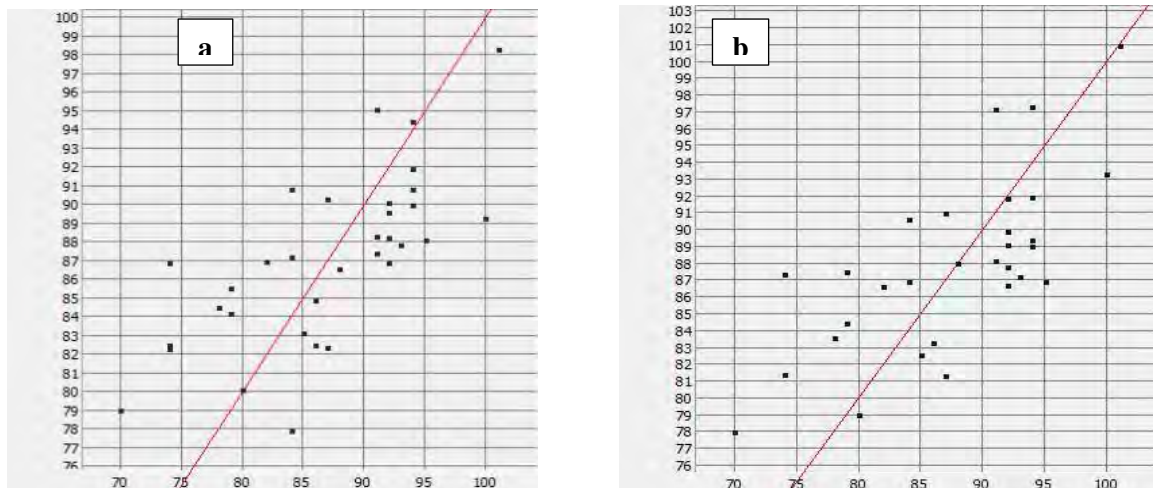


Figure 36: Comparaison entre les dates observées de débournement et les dates prédites pour le pommier. Par le modèle Chuine / Wang, a) dans les deux sites pour toutes les années, b) dans les deux sites sans les années où le cumul des unités de froid n'est pas satisfait (abscisse : dates observées ; ordonnée : dates prédites).

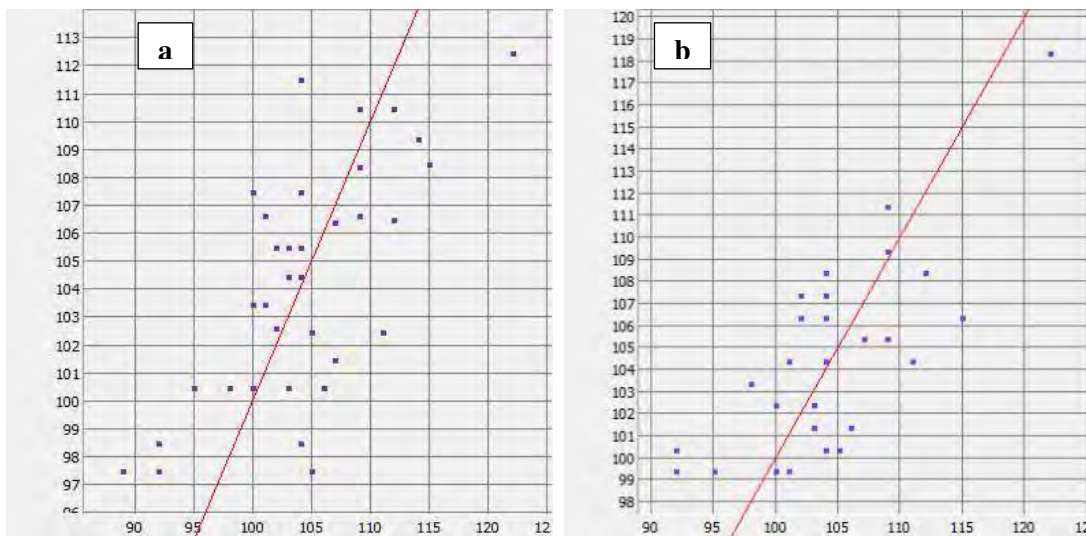


Figure 37 : Comparaison entre les dates observées de floraison et les dates prédites pour le pommier, a) dans les deux sites pour toutes les années par le modèle Chuine / Sigmoid, b) dans les deux sites sans les années où le cumul des unités de froid n'est pas satisfait par le modèle Smooth Utah / Sigmoid (abscisse : dates observées ; ordonnée : dates prédites).

IV.3.1.2. Modélisation à sites séparés, Benchicao (Médéa) et Sidi Lakhdar (Ain Defla)

IV.3.1.2.1. Au site de Benchicao

a) A une phase

La modélisation à une phase des dates de débourrement et de floraison au site de Benchicao a engendré des résultats moins bons pour l'ensemble des modèles testés du point de vue d'efficacité, d'une façon plus prononcée pour le débourrement et même pour les dates de floraison. Hormis le modèle Parabolic qui a donné une meilleure efficacité (0.52) au niveau de la floraison (figure 38), les modèles Sigmoid, GDH et Wang n'ont présenté que des efficacités faibles que ce soit pour le débourrement ou la floraison. Des difficultés ont été relevées dans la prédiction de quelques années précoces et une légère supériorité auprès du modèle Smoothed Utah au niveau de la floraison toujours (voir tableau 21).

Tableau 21 : Résultats de modélisation à une phase des dates du débourrement et de la floraison du pommier au site de Benchicao.

Site Benchicao		Pommier,		
Stades phénologiques Modèle	Débourrement		Floraison	
	Wang		Parabolic	Smoothed Utah
T0	60.4		101	58
SStot	814.47		499.52	499.52
SSres	487.04		238.10	265.29
RMSE	5.3		3.7	3.95
EFF	0.40		0.52	0.46
paramètres	Wang		Parabolic	Smoothed Utah
	Topt	12.79	Topt 3.86	Tm1 4.3
	Tmin	2.87		Topt 4.3
	Tmax	20.31		Tn2 50
				Min 0

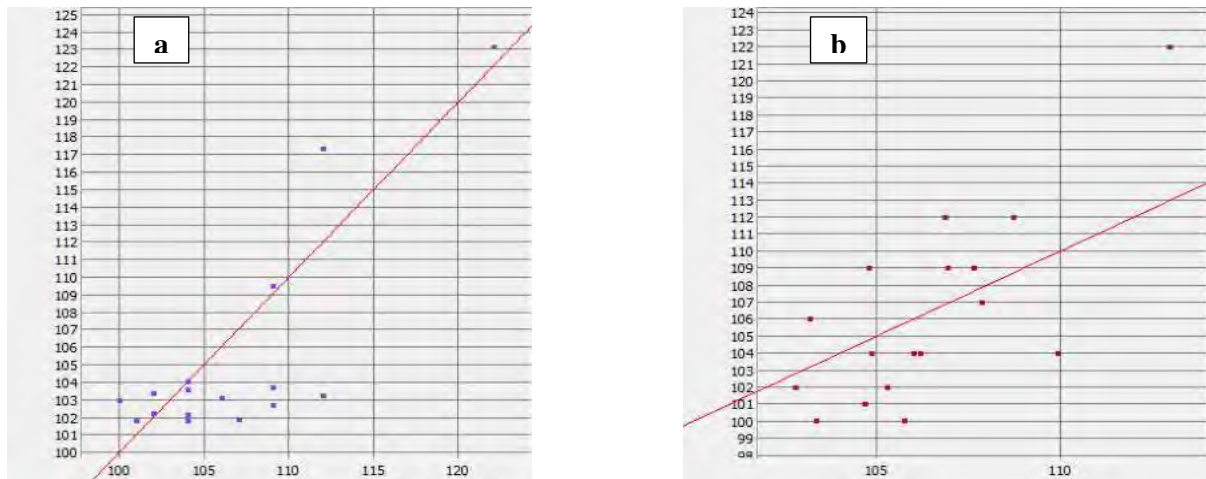


Figure 38 : Comparaison entre les dates observées de floraison et les dates prédites par, a) le modèle Parabolic, b) le modèle Smoothed Utah au site de Benchicao (Médéa) (axe des abscisses ; dates observées, axe des ordonnées ; dates prédites).

a) A deux phases

Le modèle à deux phases ne fait guère mieux qu'un modèle à une phase sur le débourrement et pas mieux pour la floraison (figure 39). De faibles valeurs d'efficacité ont été obtenues de la modélisation du débourrement et de la floraison du pommier dans ce site, où il était difficile d'avoir une bonne prédiction des années précoces. Néanmoins deux modèles ont été retenus pour le débourrement et un modèle pour la floraison, Smoothed Utah / Wang et Chuine / Wang, ainsi que Chuine / Sigmoid, respectivement (voir tableau 22).

Tableau 22 : Résultats de modélisation à deux phases des dates du débourrement et de la floraison du pommier au site de Benchicao.

Site Benchicao		Pommier,				
Stade phénologi- que Modèle	Débourrement		Floraison			
	SmoothedUtah / Wang	Chuine / Wang	Chuine / Sigmoid			
T0	-104.9	-108.5	-78.7			
SStot	1946.97	1946.97	1526.11			
SSres	1048.84	989.27	812.26			
RMSE	5.43	5.43	4.96			
EFF	0.48	0.49	0.46			
paramètres	Smoothed Utha Tm1 -34.85 Topt 21.15 Tn2 29.42 Min -0.8	Wang Topt 22.31 Tmin 3.60 Tmax 49.9	Chuine A 0.59 B -19.2 C -5.57	Wang Topt 20.62 Tmin 3.5 Tmax 31.6	Chuine A 0.45 B -10.5 C 1.03	Sigmoid Topt 20.62 Tmin 3.5 Tmzx 43.16

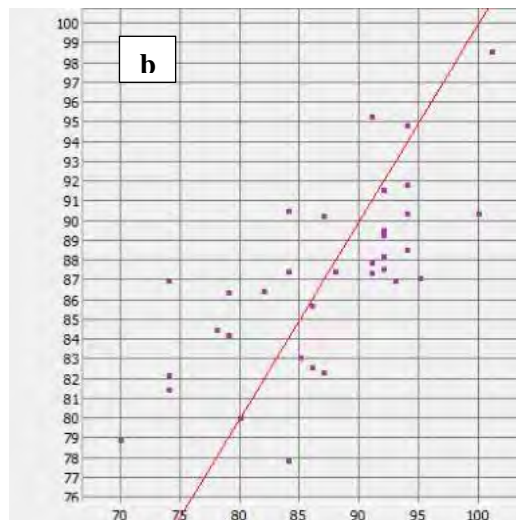
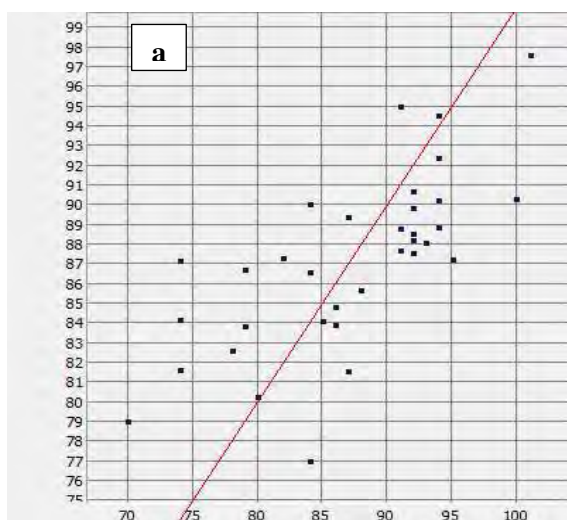


Figure 39 : Comparaison entre les dates observées de débourrement et les dates prédites du pommier au site de Benchicao par, a) le modèle Smoothed Utah /Wang, b) le modèle Chuine /Wang (abscisse : dates observées ; ordonnée : dates prédites).

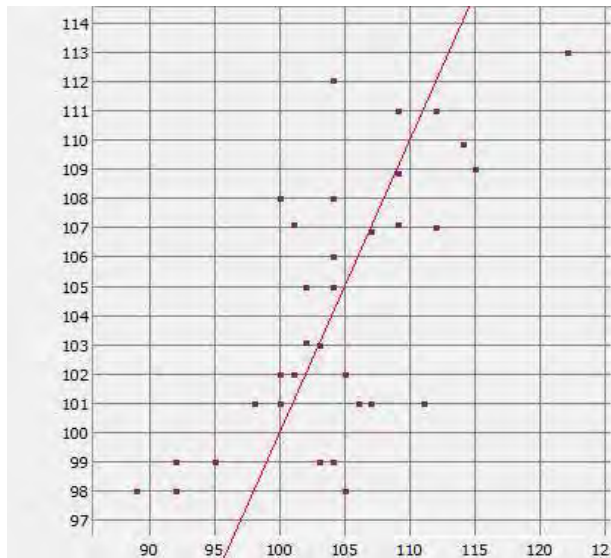


Figure 40 : Comparaison entre les dates observées et les dates prédites de floraison du pommier au site de Benchicao par le modèle Chuine /Sigmoid (abscisse : date relevée ; ordonnée : date prédite).

IV.3.1.2.2. Au site de Sidi Lakhdar

a) A une phase

La modélisation à une phase par les différents modèles n'a émis que de faibles résultats par rapport à l'efficacité pour les deux stades phénologiques, le débourrement et la floraison. Cependant, le modèle Smoothed Utah a présenté un résultat acceptable pour la floraison avec une efficacité de 0.40 et une RMSE de 5.5 (voir tableau 23 et la figure 41).

Tableau 23 : Résultats de modélisation à une phase des dates du débourrement et de floraison du pommier au site de Sidi Lakhdar.

Site Sidi Lakhdar	Pommier	
	Débourrement	Floraison
Stade phénologique		
Modèle	Smoothed Utah	Smoothed Utah
T0	-106	-76
SStot	867.05	882.47
SSres	484.35	523.50
RMSE	5.33	5.54
EFF	0.44	0.40
paramètres	Smoothed Utah	Smmothed Utah
	Tm1 - 40	Tm1 8.34
	Topt 19.75	Topt 24.23
	Tn2 29.12	Tn2 24.23
	Min -1	Min 0.34

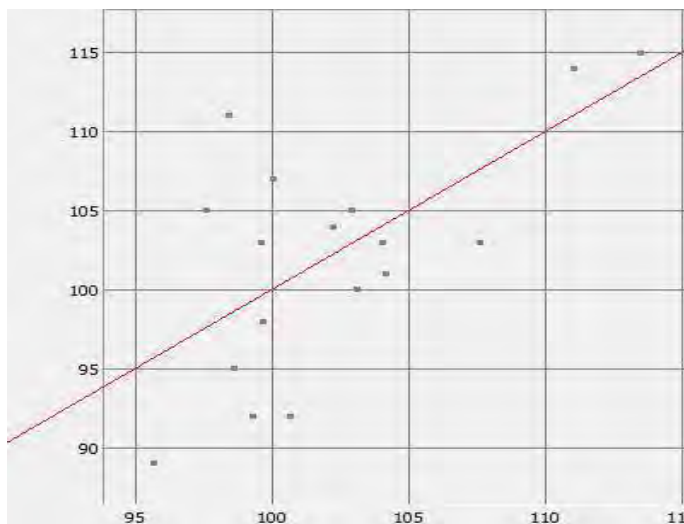


Figure 41: Comparaison entre les dates observées et les dates prédites de floraison du pommier au site de Sidi Lakhdar par le modèle à une phase Smoothed Utah (abscisse : dates observées ; ordonnée : dates prédites).

b) A deux phases

b1) Avec toutes les années.

La modélisation à deux phases des stades de débourrement et de floraison a mis le point sur le problème de prédiction des années où les besoins en unités de froid n’ont pas été satisfaits, notamment pour la floraison où de faibles valeurs d’efficience ont été soulevées.

Le tableau 24 a engendré les modèles qui ont montré plus de fiabilité en terme d’efficience, de RMSE et une pertinence physiologique des courbes de réponse à la température pour la phase de cumul des unités de froid et la phase de cumul des unités de chaleur. En effet, le modèle Chuine / Sigmoid a donné une meilleure valeur d’efficience et de RMSE pour le débourrement, contrairement à la floraison où l’efficience était faible (0.44) (voir figure 42)

Tableau 24 : Résultats de modélisation à deux phases des dates de débourrement et de floraison avec toutes les années et sans les années où les besoins en unités de froid n’ont pas été satisfaits chez le pommier au site de Sidi Lakhdar.

Site Sidi Lakhdar	Pommier avec toutes les années				Pommier sans les années 2001, 2007, 2010 et 2016.							
Stade phénolo Modèle	Débourrement		Floraison		Débourrement		Floraison					
	Chuine/ Sigmoid		Chuine /Sigmoid		Chuine/ Sigmoid		Smoothed utah/ Sigmoid		Chuine/ Sigmoid		Chuine/ Wang	
T0	-102.3		61		-119		-105.5		-59.7		12	
SStot	867.05		1526.11		713.07		713.07		534.76		534.76	
SSres	244.11		856.96		142.30		149.69		57.61		68.89	
RMSE	3.79		5.02		3.30		3.39		2.10		2.30	
EFF	0.72		0.44		0.80		0.80		0.90		0.87	
Paramètres	Chuine	Sigm	Chuine	Sigmo	Chuin	Sigmoid	Smoothed	Sigm	Chuine	Sigmo	Chuin	Wang
	A 1.61	D	A 3	D -12	A 1	D -21	Tm ₁ 24	D	A 3.21	D -40	A 2.47	Topt
	B -5.67	-32.	B -25.5		B -30		Topt14.08	-11.2	B12.47		B -17	6.62
	C 19.42	E	C 8.60	E 0.5	C -7	E -25.4	Tn ₂ 27.3	E	C 17	E 15	C 15	Tmin
		21.6					Tmin -1	-2.5				2.36
												Tmax
												28.47

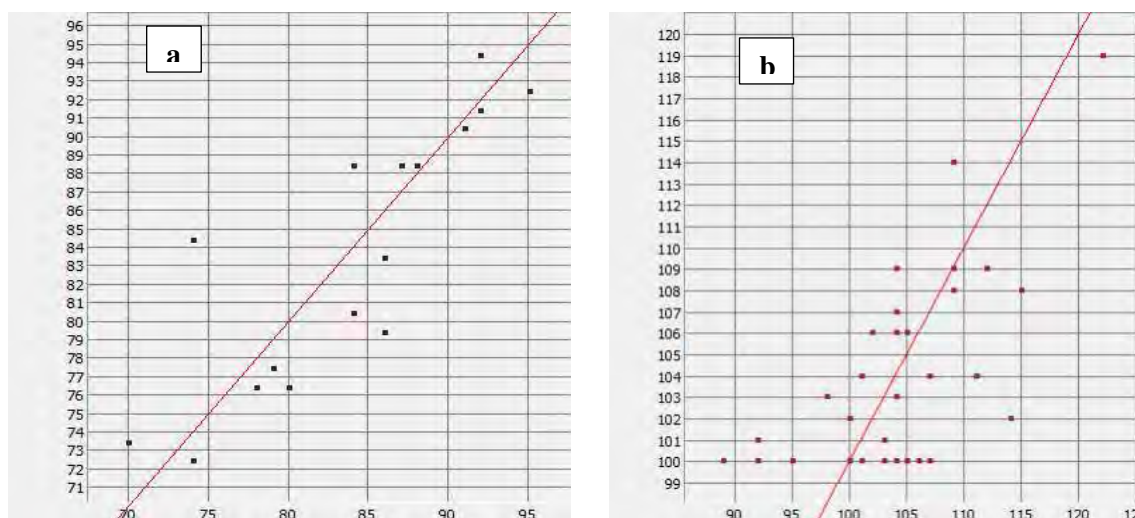


Figure 42 : Comparaison entre les dates observées et les dates prédites par le modèle Chuine/Sigmoid au site de Sidi Lakhdar avec toutes les années : a) débourrement et b) floraison (axe des abscisses ; dates observées, axe des ordonnées ; dates prédites).

b2) A deux phases sans les années où les besoins en cumul d'unités de froid n'ont pas été satisfaits.

Le retrait des années où le cumul en unités de froid n'a pas été satisfait, améliore grandement les résultats de modélisation (Figure 43 et 44), notamment les dates de floraison. La pertinence de la courbe de réponse obtenue pour la fonction des unités de froid a été aussi grandement améliorée (Tableau 24). Deux modèles ont montré une forte fiabilité dans la prédiction des dates observées du débourrement, Chuine / Sigmoid et Smoothed Utah / Sigmoid avec des valeurs d'efficacité et de RMSE de 0.80 et 3.30, 0.80 et 3.4, respectivement (voir tableau 24 et figure 43). Pour les dates de floraison, ce sont les deux modèles Chuine / Wang et Chuine / Sigmoid qui ont donné les meilleurs résultats : 0.87 et 2.3, 0.89 et 2.10 pour l'efficacité et le RMSE, respectivement (voir figure 44 et tableau 24).

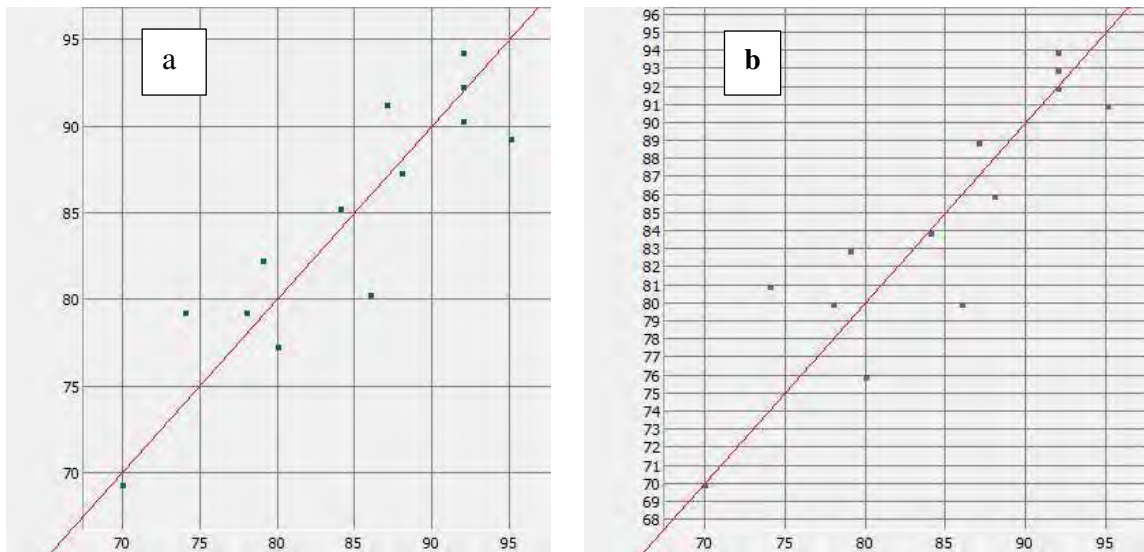


Figure 43 : Comparaison entre les dates observées et prédites de débournement du pommier au site de Sidi Lakhdar sans les années où le cumul en unités de froid n'a pas été satisfait par, a) le modèle Chuine / Sigmoid et b) le modèle Smoothed Utah /Sigmoid (abscisse : dates observées, ordonnée : dates prédites).

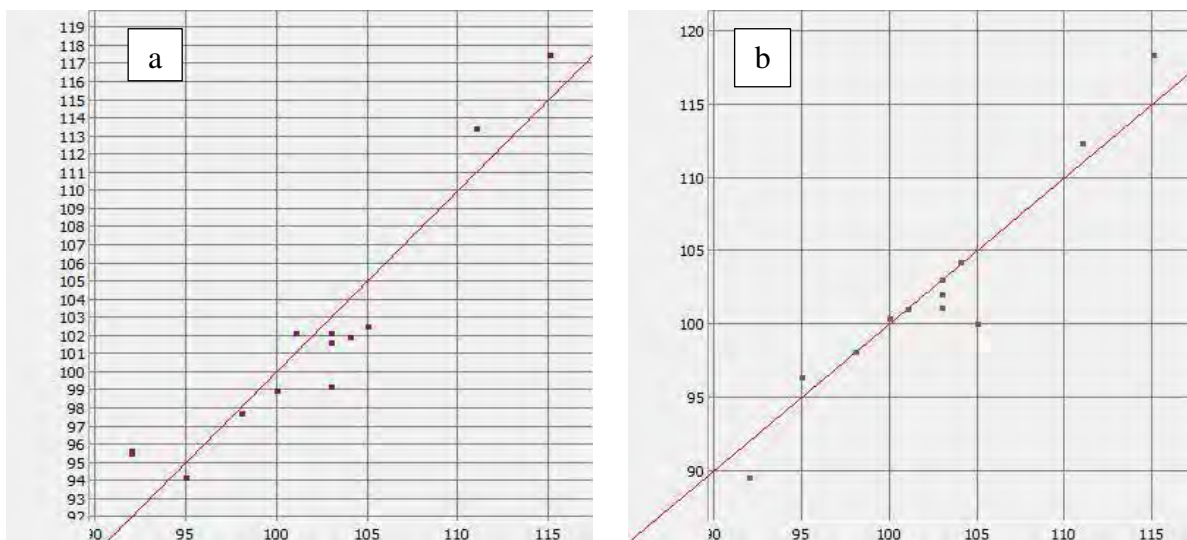


Figure 44 : Comparaison entre les dates observées et prédites de la floraison du pommier au site de Sidi Lakhdar sans les années où le cumul en unités de froid n'a pas été satisfait par, a) le modèle Chuine / Sigmoid et b) le modèle Chuine / Wang (abscisse : dates observées ; ordonnée : dates prédites).

IV.3.2. Modélisation phénologique de la variété ‘Muscat Italia’ de la vigne.

IV.3.2.1. Modélisation pour les sites confondus (deux sites ensemble) Benchicao (Médéa) et Boumedfaa (Ain Defla).

a) A une seule phase

La modélisation des deux stades phénologiques de la vigne, le débourrement et la floraison a engendré des résultats assez faibles où l’efficacité et la valeur de RMSE ont été moins bonnes avec l’ensemble des modèles (tableau 25). La comparaison entre les résultats obtenus a laissé apparaître un certain gain pour le modèle Sigmoid pour les deux stades phénologiques (voir figure 45).

Tableau 25: Résultats de modélisation à une phase des dates de débourrement et de floraison de la vigne dans les deux sites ensemble (Benchicao et Boumedfaa), Benchicao et Boumedfaa séparés.

Site	Vigne avec deux sites		Vigne au site Benchicao		Vigne au site Boumedfaa	
Stade phenolog	Débourrement	Floraison	Débourrement	Floraison	Floraison	
Modèle	Sigmoid	Sigmoid	Smoothed utah	Wang	Parabolic	Smoothed Utah
T0	60,5	103,1	67.7	68.2	146.5	180
SStot	11389,32	13738,43	5114.75	5114.75	8793.24	910.43
SSres	7821.67	9443.70	3587.54	3463.53	4145	562.48
RMSE	13	14.3	11.12	10.92	11.95	5.92
Eff	0.31	0.31	0.30	0.32	0.52	0.40
paramètres	sigmoid	sigmoid	smoothedutah	wang	Parabolic	Smoothed utah
	D - 40	D -40	Tm1 9.97	Topt	Topt	Tm1 -1
	E 10,30	E 18,73	Topt 10.7	12.04	4.66	Topt 20.25
			Tn2 20.3	Tmin		Tn2 22.70
			Min -1	9.84		Min -0.28
				Tmax		
				20.8		

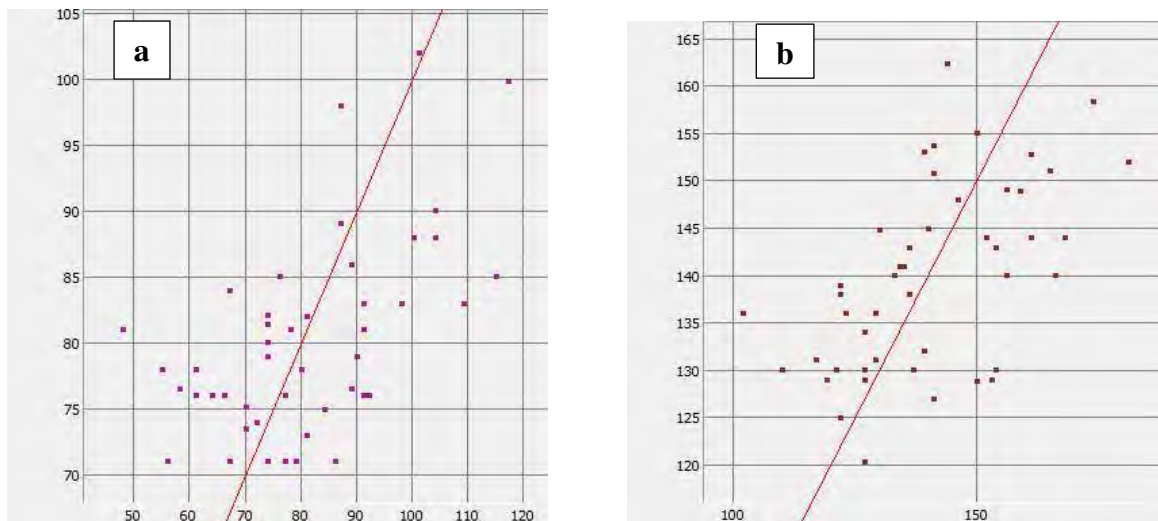


Figure 45 : Comparaison entre les dates observées et prédites de débourrement et de floraison de la vigne dans les deux sites d'étude (Boumedfaa et Benchicao) par le modèle à une phase Sigmoid, a) débourrement et b) floraison (abscisse : dates observées ; ordonnée : dates prédites).

b) A deux phases

A l'opposé, la modélisation à deux phases a attribué une légère amélioration des valeurs d'efficacité et de RMSE concernant la prédiction des dates de débourrement et de floraison. Les modèles séquentiels Smoothed Utha / Sigmoid et Chuine / Wang ont présenté une meilleure modélisation des dates de débourrement et de floraison par rapport aux autres modèles (voir tableau 26).

Tableau 26 : Résultats de modélisation à deux phases des dates de débourrement et de floraison de la vigne dans les deux sites d'étude ensemble (Benchicao et Boumedfaa).

Site	Vigne deux sites			
	Stade phénologique	Débourrement		Floraison
modèle	Smoothed Utah / Sigmoid	Chuine / Wang		
T0	-97	107.6		
SStot	11389.32	13738.43		
SSres	6139.64	7461.43		
RMSE	11.55	12.7		
Eff	0.46	0.46		
Paramètres	Smoothed Utah	Sigmoid	Chuine	Wang
		D -33.18	A 4.42	Topt 9
	Tm1 3.06	E 10.40	B -	Tmin 8.50
	Topt 26.28		27.05	Tmax
	Tn2 31.74		C 17.67	30.34
	Min -1			

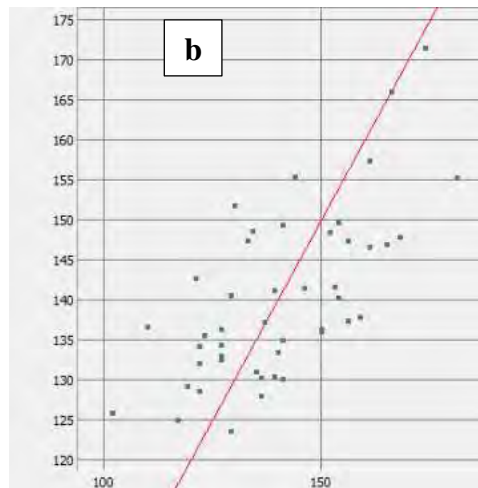
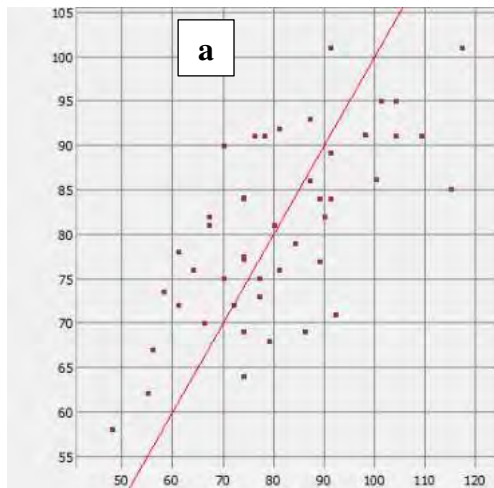


Figure 46 : Comparaison entre les dates observées et prédites de débourrement et de floraison de la vigne pour les deux sites (Benchicao et Boumedfaa), a) débourrement par le modèle Smoothed Utha / Sigmoid et b) floraison par le modèle Chuine /Wang (abscisse : dates observées ; ordonnée : dates prédites).

IV.3.2.2. Modélisation pour les sites séparés, Benchicao (Médéa) et Boumedfaa

(Ain Defla).

IV.3.2.2.1. Au site de Benchicao

a) A une phase

Il semble que la modélisation des deux stades phénologiques à une phase est venue presque identique à celle des deux sites ensemble. Cependant, une légère amélioration est survenue au niveau de la valeur d'efficacité et de RMSE et même sur la courbe physiologique de la réponse à la température pour la floraison. Le modèle Parabolic a donné une efficacité de 0.52 et où la valeur de RMSE a dépassé celle de débourrement d'un jour à peu près (voir tableau 25 et figure 48). La modélisation à une phase pour le débourrement n'a pas donné de résultats remarquables. Les meilleures valeurs de réponse ont été obtenues avec le modèle Wang avec une efficacité de 0.32 et une RMSE de 10.92 (voir figure 47).

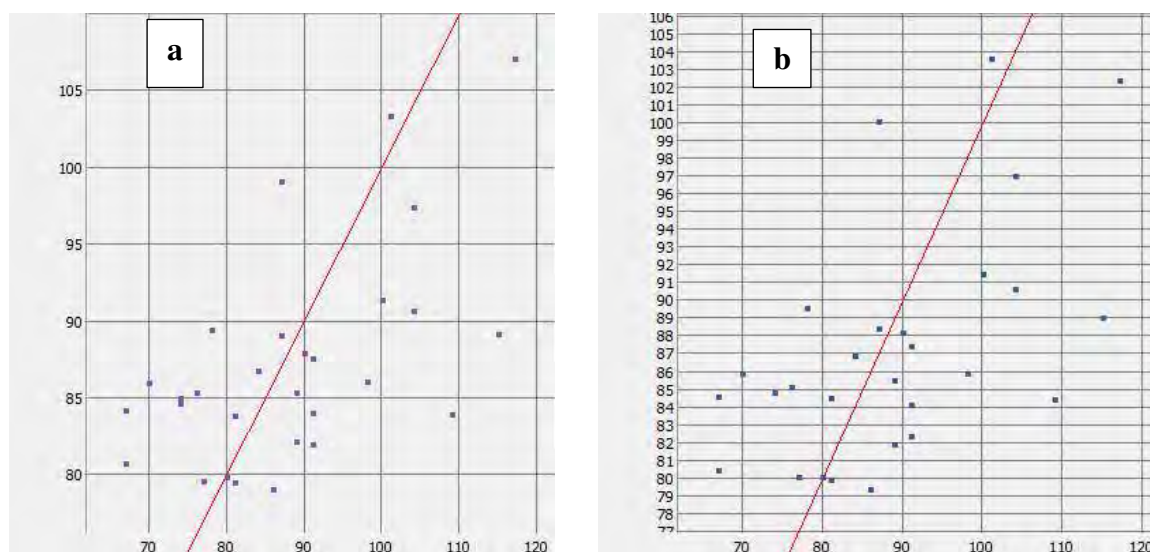


Figure 47 : Comparaison entre les dates observées et prédites du débourrement de la vigne au site de Benchicao par, a) le modèle Wang et b) le modèle Smoothed Utah (abscisse : dates observées ; ordonnée : dates prédites).

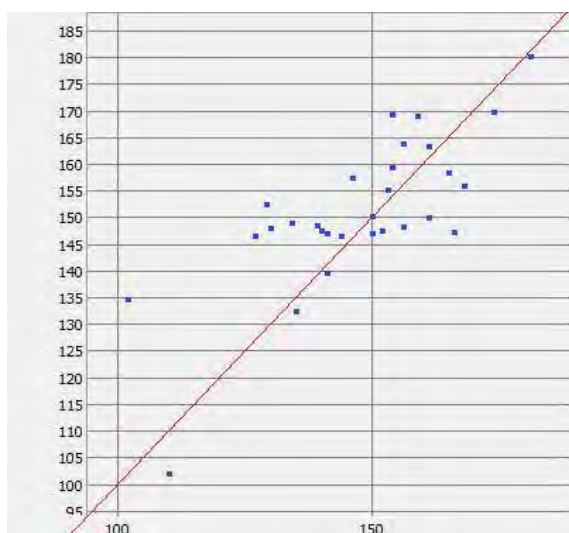


Figure 48: Comparaison entre les dates observées et prédites de floraison de la vigne au site de Benchicao par le modèle Parabolic (abscisse : dates observées ; ordonnée : dates prédites).

b) A deux phases

La modélisation à deux phases a amélioré les valeurs de l'efficacité et de RMSE et les courbes physiologiques de réponse pour le débournement. Les modèles Chuine / Wang et Chuine / Sigmoid ont engendré des résultats notables concernant la modélisation des dates de débournement, où l'efficacité a atteint 0.51 et où la valeur de RMSE a diminué de 3 à 5 jours (9 jours) par rapport à celle obtenue avec la modélisation à une phase (tableau 27).

A l'opposé, aucune amélioration n'est observée pour la modélisation de la floraison, que ce soit pour la valeur d'efficacité où la RMSE et ce par rapport au débournement et à la modélisation à une phase (tableau 25 et tableau 27). Le modèle Chuine / Wang a donné des résultats acceptables par rapport aux autres modèles. Les figures 49 et 50 représentent la comparaison entre les dates observées et prédites de débournement et de floraison à Benchicao.

Tableau 27 : Résultats de modélisation à deux phases des dates de débourrement et de floraison de la vigne à Benchicao.

Site Benchicao		Vigne				
Stade phenologique	Débourrement		Floraison			
modèle	Chuine/ Wang		Chuine/ Sigmoid	Chuine/ Wang		
T0	63.7		67	113		
SStot	5114.75		5114.75	8793.24		
SSres	2531.24		2512.88	4931.04		
RMSE	9.34		9.30	13.04		
Eff	0.51		0.51	0.44		
paramètres	Chuine	Wang	Chuine	Sigmoid	Chuine	Wang
	A 8.82	Topt 21.26	A 1.39	D-26.10	A 9.23	Topt 8
	B 10.46	Tmin 1	B -9.80	E 10.5	B -22	Tmin 1
	C 12.98	Tmax 38	C 6.86		C 19.37	Tmax 32

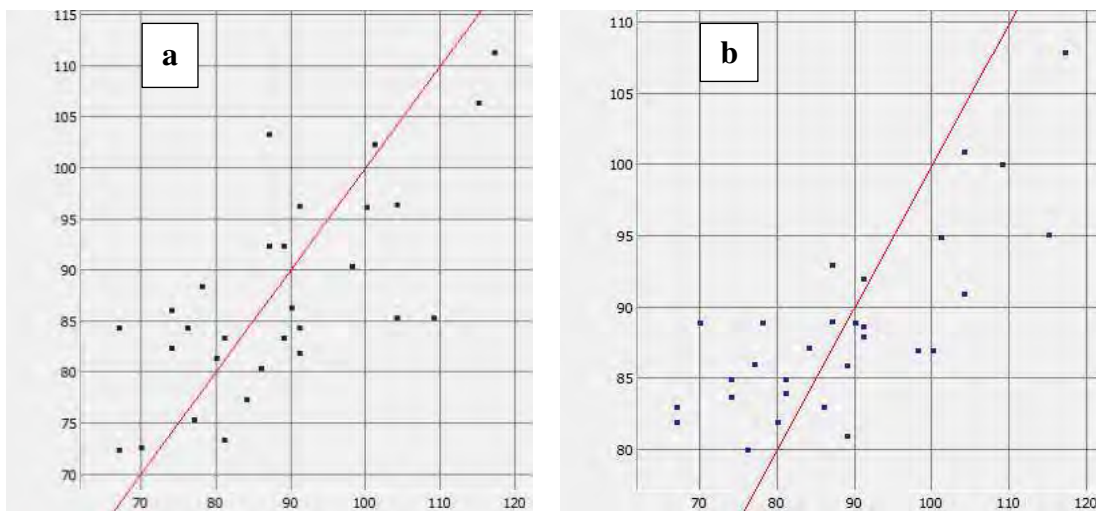


Figure 49 : Comparaison entre les dates observées et prédites de débourrement de la vigne au site de Benchicao par, a) le modèle Chuine /Wang et b) le modèle Chuine / Sigmoid (abscisse :dates observées ; ordonnée : dates prédites).

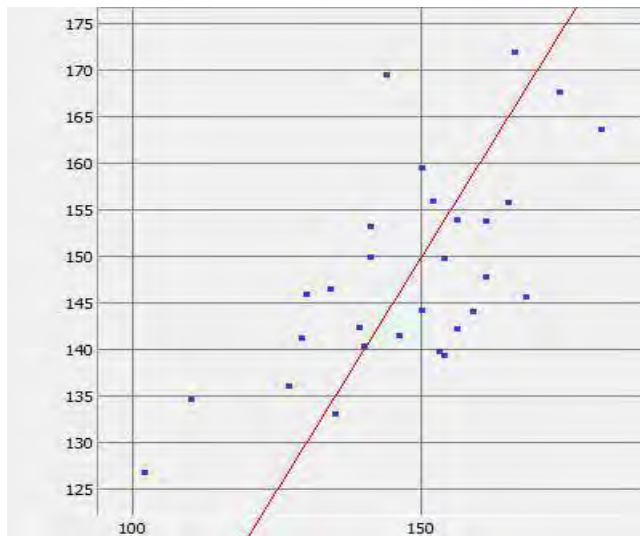


Figure 50 : Comparaison entre les dates observées et prédites de floraison de la vigne au site de Benchicao, par le modèle Chuine / Wang (abscisse : dates observées ; ordonnée : dates prédites).

IV.3.2.2.2. Au site de Boumedfaa

a) A une phase

Les résultats de la modélisation à une phase des dates de débourrement et de floraison ont été très faibles et non significatifs en efficacité et RMSE pour l'ensemble des modèles. Néanmoins des résultats acceptables ont été retenus avec le modèle Smoothed Utah pour la modélisation des dates floraison, avec une efficacité de 0.40 et une RMSE de 5.9 (voir tableau 25). La figure ci-dessous (figure 51) représente la comparaison entre les dates observées et prédites de la floraison avec le modèle Smoothed Utah.

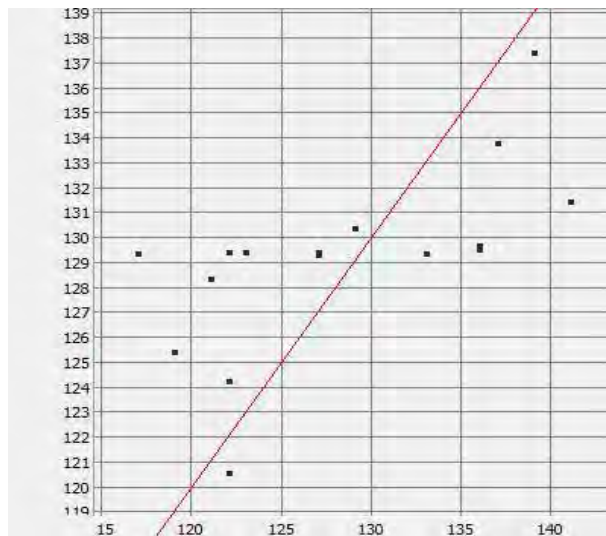


Figure 51 : Comparaison entre les dates observées et prédites de floraison au site de Boumedfaa par le modèle Smoothed Utah (abscisse : dates observées ; ordonnée : dates prédites).

b) A deux phases

La modélisation à deux phases des dates de débourrement et de floraison a engendré une certaine amélioration aux valeurs de l'efficacité et de RMSE, notamment pour le débourrement par rapport à la modélisation à une phase. En effet, les modèles Chuine / Sigmoid et Richardson inverse / Sigmoid ont donné des résultats acceptables parmi tous les modèles et où l'efficacité a atteint 0.50 (voir tableau 28). De même une légère amélioration a été révélée au niveau de la modélisation des dates de floraison. Deux modèles ont été retenus, Chuine /Wang et Richardson inverse / Wang avec une efficacité oscillant entre 0.50 et 0.53 et une légère diminution de RMSE (voir tableau 28 et figures 52 et 53).

Tableau 28 : Résultats de modélisation à deux phases des dates de débourrement et de floraison de la vigne à Boumedfaa.

Site		Vigne							
Boumedfaa									
Stade phenologique		Débourrement				Floraison			
Modèle		Richardson inverse/ Sigmoid		Chuine/ Sigmoid		Chuine/ Wang		Richardson /Wang	
T0		-87.4		-54.1		96		80.2	
SStot		1721.43		1721.43		910.43		910.43	
SSres		889.26		863.51		429.32		464.18	
RMSE		7.45		7.34		5.18		5.38	
Eff		0.50		0.50		0.53		0.50	
paramètres		Richardson	Sigm	Chuine	Sigmoi	Chuine	Wang	Richardson	Wang
		Tlow 14.7	D -40	A 3.01	D -9.6	A 1.45	Topt	Tlow 6.30	Topt 20.7
		Thigh 20.1	E3.35	B 14.51	E -13.3	B 12.51	17.31	Thigh 44	Tmin -39
				C 17.44		C 16.26	Tmin 9.42		Tmax 22.2
							Tmax 32.48		

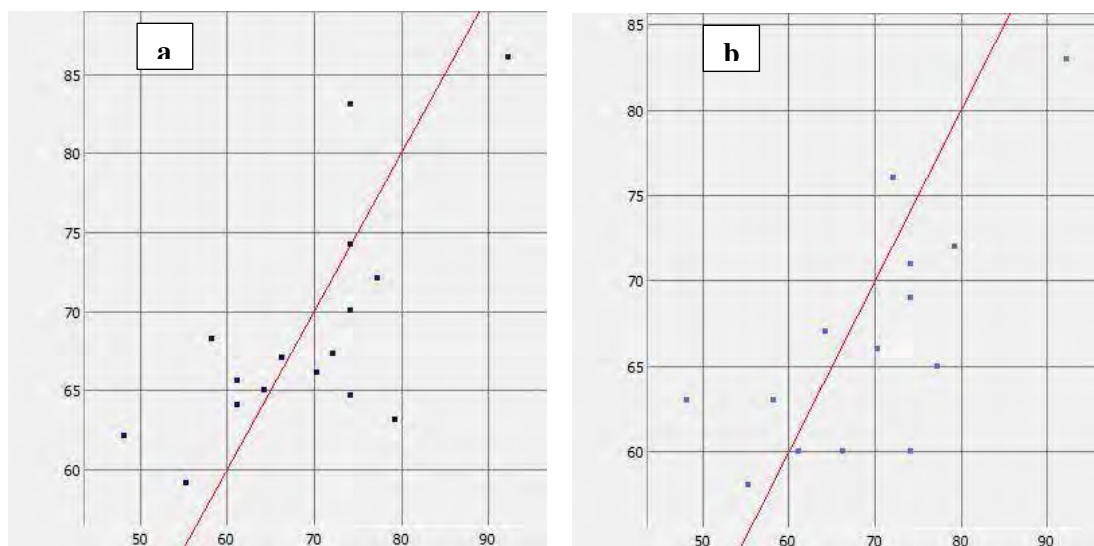


Figure 52 : Comparaison entre les dates observées et prédites de débourrement de la vigne au site de Boumedfaa par, a) le modèle Richardson inverse / Sigmoid et b) le modèle Chuine / Sigmoid (abscisse : dates observées ; ordonnée : dates prédites).

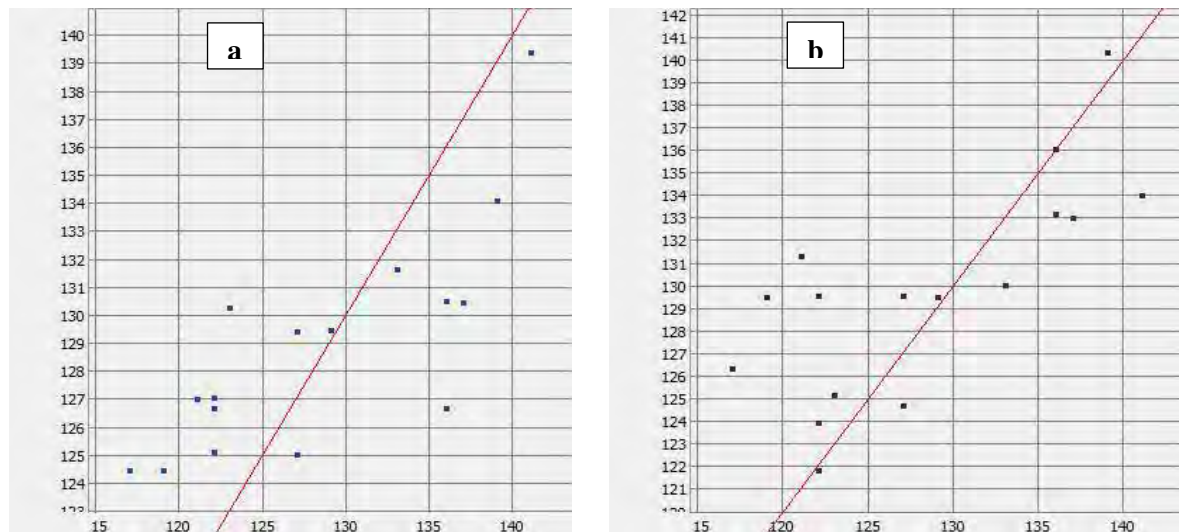


Figure 53 : Comparaison entre les dates observées et prédites de floraison de la vigne au site de Boumedfaa par, a) le modèle Chuine / Wang et b) le modèle Richardson inverse / Wang (abscisse : dates observées ; ordonnée : dates prédites).

IV.3.3. Discussion

L'effet des températures sur la phénologie des plantes n'est pas linéaire, car ce facteur a un effet double sur le développement des bourgeons (Arora et al, 2003, Horvath, 2009). D'un côté, des températures basses sont nécessaires à la sortie de la dormance, et d'un autre côté des températures plus élevées sont nécessaires à la croissance cellulaire. Différents modèles basés sur ces processus ont été développés au cours des deux dernières décennies pour prédire les dates de débournement et de floraison des arbres (Chuine et al, 2013). Ces derniers prédisent que le réchauffement climatique pourrait retarder voire compromettre la levée de dormance et de ce fait retarder voire compromettre le débournement et la floraison (Caffarra et al, 2012, Morin et al, 2009).

La modélisation de la phénologie en fonction des données environnementales, la température (moyenne, minimale, maximale) pour notre cas, nécessite des modèles mathématiques rigoureux. Le logiciel de la plateforme de modélisation phénologique version 5.5 (PMP5.5) (Chuine et al, 2013) permet de construire ou d'adapter un modèle phénologique aux données recueillies. Il permet également de faire des simulations à l'aide de modèles

préexistants. Il procure des fonctions déjà définies, elles ont été utilisées pour créer le modèle de prédiction.

La modélisation des dates de débourrement et de floraison du pommier a engendré des divergences spatio-temporelles dans la réponse de la variété 'Golden Délicieux' à la variation de la température. Les résultats de la prédiction à une phase des deux stades phénologiques sont venus faibles à moyennement bons, notamment avec le modèle Smoothed Utah pour la modélisation des dates de débourrement et de floraison au site de Sidi Lakhdar, avec une RMSE de 5 jours entre les dates observées et prédites. Le modèle Smoothed Utah a permis l'élargissement de l'intervalle de réponse de la variété en termes de température. En effet, la température moyenne idéale prédite pour le débourrement est de 19.75°C et 24.23 °C pour la date de floraison. Un tel résultat paraît cohérent avec ce site qui connaît une tendance à un réchauffement. A l'opposé, la modélisation à une phase s'est avérée meilleure au site de Benchicao pour le débourrement et la floraison, notamment avec les modèles de cumul en unités de chaleur Wang et Parabolic respectivement. Un gain notable au niveau de la valeur de RMSE entre les dates observées et prédites arrivée à 3 jours est à signaler. Les valeurs des températures (moyenne, minimale et maximale) obtenues par le modèle Wang semblent être plus cohérentes au climat de ce site pour le déclenchement de débourrement, que celle obtenue par le modèle Parabolic (voir tableau 21).

La modélisation à deux phases des stades phénologiques au niveau des deux sites ensemble, n'a apporté aucune amélioration au niveau des paramètres physiologiques et même de l'efficacité pour l'ensemble des modèles combinés, mise à part le modèle Chuine / Wang pour les dates de débourrement.

Le retrait des années où les besoins en cumul d'unités de froid ne sont pas satisfaits a donné une légère amélioration à la prédiction des dates de débourrement et de floraison avec les deux modèles Chuine / Wang pour le débourrement (une température optimale de 17.09°C et une efficacité de 0.50) et Smoothed Utah / Sigmoid pour la floraison. La valeur de RMSE pour la floraison a été améliorée, en atteignant 4 jours de différence entre les dates observées et les dates prédites.

Au site de Sidi Lakhdar, les résultats ont été meilleurs que ceux des deux sites ensemble. Une progression de l'efficacité est décelée au niveau des dates de débourrement mais pas pour la floraison. Les meilleures prédictions ont été obtenues avec le modèle Chuine / Sigmoid pour les deux stades. La prédiction sans les années où la satisfaction en cumul d'unités de froid n'est pas atteinte a donné une nette amélioration avec une valeur de 0.80 d'efficacité et une RMSE de 2 à 3 jours entre les dates observées et prédites du débourrement et de la floraison (voir tableau 24). De même, il est à signaler que le modèle Chuine / Sigmoid, a donné une bonne réponse après le retrait des années où les besoins en cumul d'unités de froid n'est pas satisfait.

A Benchicao, des difficultés de prédiction ont été relevées avec de faibles résultats pour l'ensemble des modèles. Cependant, les modèles Chuine / Wang et Chuine / Sigmoid, ont donné des valeurs d'efficacité et de RMSE plus ou moins acceptables pour la modélisation des dates de débourrement et de floraison respectivement (voir tableau 22). Cela pourrait être expliqué par les besoins en unités de froid qui ont été souvent satisfaits. Seule la période de forçage peut avoir un effet sur la précocité. Selon une étude de modélisation des dates de débourrement et de floraison de quelques variétés de fraisier faite par Fouquin (2020), le modèle Chuine a donné des résultats plus cohérents avec la physiologie de cette culture. Les températures entre -30°C et 15°C sont considérées comme un indicateur de la pertinence de modèle et doivent s'éloigner de 0°C pour donner plus d'efficacité à la réponse de la variété.

De façon globale, la précocité ou la tardivité de débourrement ainsi que la floraison dépend essentiellement de la période d'accumulation d'unités de froid au site de Sidi Lakhdar alors qu'elle dépend de la période d'accumulation d'unités de chaleur au site de Benchicao. Selon Chuine et al (2015), la fiabilité des modèles phénologiques est de 2 à 14 fois meilleure avec un ajustement des modèles avec les dates de lever de dormance que des modèles intégrant seulement des dates de débourrement et de floraison.

Chez la vigne la modélisation à une phase des dates de débourrement et de floraison n'a pas abouti à de bons résultats avec les modèles utilisés (Wang, GDH, Parabolic, Richardson, Sigmoid et Smoothd Utah) dans les deux sites ensemble ou pour chaque site à part.

Deux modèles ont donné des efficacités acceptables lors de la modélisation des dates de floraison au site de Benchicao et Boumedfaa, Parabolic et Smoothed Utah respectivement (voir tableau 25). Néanmoins, les paramètres de ces deux fonctions sont incohérents avec la physiologie de la vigne, notamment le T_0 .

Les modèles séquentiels à deux phases, ont fourni une légère amélioration au niveau des courbes de réponse physiologique dans les deux sites ensemble concernant les dates de débourrement et de floraison avec les modèles Smoothed Utah / Sigmoid et Chuine / Wang. Les réponses physiologiques des fonctions semblent être adéquates au déclenchement de débourrement et de la floraison des bourgeons floraux. Une différence non négligeable s'est avérée entre les dates observées et les dates prédites (RMSE de 11 jours).

La modélisation des dates de débourrement et de floraison dans les deux sites séparés n'est guère différente de celle obtenue dans les deux sites combinés. L'efficacité des modèles est toujours dans les alentours de 0.50. Une légère diminution est obtenue en termes de RMSE de 2 à 3 jours entre les dates prédites et les dates observées de débourrement (voir tableau 27 et 28) et de 6 jours pour la floraison au site de Boumedfaa (voir tableau 28).

Au site de Benchicao, le modèle Chuine / Sigmoid semble être meilleur que les autres modèles concernant les paramètres de réponse de la courbe physiologique pour les dates de débourrement. Cependant, l'efficacité n'a pas dépassé 0.50. La modélisation des dates de floraison n'a pas engendré de bons résultats. La non-satisfaction des besoins en unités de chaleur nécessaires pour déclencher le débourrement et la floraison peut avoir un effet non négligeable sur l'obtention de ces résultats.

Au site de Boumedfaa le schéma était le même, le modèle Chuine / Sigmoid a donné une prédiction des dates de débourrement avec une meilleure valeur de RMSE atteignant 7 jours, un T_0 qui correspond mieux à la date physiologique où la température commence à avoir un effet et une valeur d'efficacité qui a atteint 0.50 (voir tableau 28). La prédiction des dates de floraison avec le modèle Chuine / Wang était meilleure que celle obtenue à Benchicao, avec une bonne amélioration de la valeur de RMSE allant jusqu'à 5 jours de différence entre les dates observées et les dates prédites de la floraison, comparée à 13 jours au site de Benchicao et 11 jours dans les deux sites ensemble

Synthétiquement, il est à retenir que la prédiction des dates de débourrement et de floraison de la vigne dans les deux sites d'étude n'était pas vraiment meilleure avec tous les modèles utilisés de point de vue efficacité mise à part les deux modèles Chuine / Sigmoid et Chuine / Wang qui ont apporté une légère amélioration. Les paramètres de réponse des courbes physiologiques ont été cohérents avec la physiologie de la vigne. Une variation spatiale dans la réponse de la variété 'Muscat Italia' est obtenue avec la modélisation par l'outil PMP5.5. Une tardivité prononcée des dates de débourrement au site de Benchicao induite peut être par un manque des besoins en unités de chaleur, comparée à une précocité des dates de débourrement et de floraison au site de Boumedfaa, résultant d'une tendance à un réchauffement. Les facteurs environnementaux (Températures, précipitations, photopériodisme) ont un effet sur le comportement des espèces végétales (Agrawal, 2001 et Schlichting, 2014). La température joue un rôle majeur dans la date de floraison (Verheul and al, 2007 ; Sonsteby and Heide, 2008).

Les modèles phénologiques sont de bons outils pour décrire la phénologie des espèces. Ils peuvent être utilisés pour la compréhension de mécanismes physiologiques et prédire les évolutions des variétés modélisées sous l'évolution de leur environnement (Prost, 2008). Ces modèles prennent en compte les effets du climat (température moyenne et rayonnement globale) (Jeuffroy, 2008). En effet, pour la floraison, les modèles de prédiction procurent des dates très proches de la réalité même lorsqu'il y a présence d'interaction génotype/ environnement. Selon Fouquin (2020), l'importance de la température dans la prédiction de la date de floraison a été confirmée par le modèle Chuine sur l'ensemble des fraisiers. Grâce à ces modèles, il a pu identifier des paramètres de la fonction Chuine spécifiques à chacune des variétés, soit la date T₀, le début de la phase de floraison, et l'intervalle de températures favorables. Ces paramètres permettraient d'expliquer la différence de précocité entre les variétés.

***CONCLUSION GENERALE ET
PERSPECTIVES***

Il y a aujourd'hui un consensus de la communauté scientifique sur la réalité des changements climatiques. Celui-ci se manifeste principalement par une augmentation des températures. Le phénomène est observé sur l'ensemble du globe, même si l'amplitude de l'augmentation des températures présente des différences régionales majeures. L'effet le plus marquant d'une augmentation des températures est une avancée des cycles végétatifs et reproducteurs des arbres fruitiers. C'est dans ce contexte que cette étude s'est inscrite ayant pour objectif la mise en évidence d'un éventuel changement climatique dans le nord de l'Algérie à travers trois régions complètement contrastées par leur climat, en utilisant comme indicateur biologique la phénologie de deux espèces, le pommier et la vigne.

Des analyses de corrélation, des tests de tendances, des analyses de régression PLS ainsi que des modélisations via une plateforme phénologique utilisée pour la première fois en Algérie PMP5.5, ont été mises en œuvre, pour détecter toutes variations de la température et voir leurs impacts sur l'évolution des dates de deux stades phénologiques clés ; le débourrement et la floraison.

De multiples résultats ont été émis des trois parties qui ont constitué cette étude.

En effet, cette étude a permis une mise en évidence d'un réchauffement climatique très prononcé au site Sidi Lakhdar suivi par le site de Boumedfaa, dû à une forte augmentation des températures minimales (Sidi Lakhdar) et des températures maximales (Boumedfaa) comparé à une tendance au refroidissement dans le site de Benchicao (Médéa).

De forts gradients interannuels des températures dans le même site et entre les sites ont révélé une augmentation accentuée des températures moyennes annuelles notamment au cours des dernières années d'étude (dès 1990), reflétant ainsi à un réchauffement des régions de la plaine (Sidi Lakhdar et Boumedfaa).

Un réchauffement très marqué de la période automno-printanière a été détecté dans les sites de Sidi Lakhdar et Boumedfaa qui coïncide avec la période d'accumulation des unités de froid. La tendance au refroidissement dans le site de Benchicao est due à la baisse des températures durant les mois de novembre, février et mars. L'accumulation des besoins en unités de froid débute à partir de mois de novembre jusqu'au janvier au site

de Benchicao avec des quantités en unités de froid plus importantes, alors qu'elle n'avait lieu qu'à la fin du mois de décembre pour les sites de Sidi lakhdar et Boumedfaa avec une régression notable des quantités accumulées.

Le mois de mars joue rôle primordiale dans le début d'accumulation des besoins en unités de chaleur et ce pour les trois sites étudiés. Il est à retenir qu'un gain très important de cumul des unités de chaleur a été révélé dans le site de Sidi Lakhdar renforçant le résultat d'être un site qui évolue vers un réchauffement très prononcé.

L'utilisation de quatre modèles de quantification des cumuls en unités de froid et un modèle de quantification des cumuls en unités de chaleur sans désignation de l'espèce, a laissé apparaître une fiabilité de deux modèles, Caroline du Nord et Utah.

En projetant nos résultats avec d'autres résultats similaires obtenus à travers le monde, trois modèles du réchauffement climatique (MR) ont été ressortis, MR1 à Boumedfaa, MR2 à Sidi Lakhdar et MR3 à Benchicao.

L'expression de la variété 'Golden Delicious' du pommier a été caractérisée par une variation spatiotemporelle dans cette étude. Les périodes critiques pour l'accumulation des unités de froid ont été identifiées, il s'agit de la période qui s'étale entre novembre et janvier au site de Benchicao, où les températures du mois de janvier se sont avérées plus importantes pour lever la dormance. Au site de Sidi Lakhdar, les bourgeons entrent tardivement en endodormance et il en résulte une action tardive du froid qui se prolonge jusqu'au mois de février sans toujours être suffisante.

Coté forçage (besoins en unités de chaleur), ce sont les températures du mois de mars qui ont un effet discriminant sur le débourrement et la floraison au site de Benchicao combinées à celles d'avril au site de Sidi Lakhdar. Sur ce site, malgré un réchauffement en avril, on ne gagne pas en précocité probablement à cause d'une satisfaction des besoins de froid aux limites et leur accumulation était souvent plus tardive vers la mi-février. Ce sont les températures douces du mois de février qui ont été impliquées dans le processus de débourrement et de floraison par la suite. Cependant, des processus physiologiques plus complexes doivent être à l'œuvre au site Sidi Lakhdar, notamment les années de faible cumul en unités de froid. Il n'est pas exclu que

d'autres facteurs, non inclus dans ce travail, puissent être impliqués dans le processus de débourrement comme la photopériode ou les précipitations. A Benchicao, un gain de précocité de débourrement, résultant d'un cumul en unités de froid toujours comblé suite aux températures des mois de novembre et décembre.

Le modèle Dynamique a montré son efficacité dans le calcul des besoins en froid notamment à Sidi Lakhdar.

Une précocité de débourrement a été signalée pour la variété 'Muscat Italia' de la vigne à Boumedfaa ce qui n'a pas été le cas à Benchicao, ou celle-ci a connu une tendance significative à la tardivité de débourrement à côté d'une certaine précocité à la floraison.

Les besoins en unités de froid s'accroissent dès le mois de novembre pour atteindre leur maximum durant le mois de janvier jusqu'au mois de février au site de Benchicao. Le mois de décembre semble avoir un effet sur la levée de dormance et l'entrée en débourrement au site de Boumedfaa, et où les températures maximales ont un gain de précocité pour la floraison. Un effet cumulatif et continu de froid jusqu'au mois de mars, a donné un gain de précocité à cette variété.

Le modèle Dynamique n'était pas fiable dans la quantification des besoins en unités de froid au site de Boumedfaa.

L'analyse de la régression par la méthode des moindres carrés (PLS) peut être un outil fiable et efficace pour dériver les exigences climatiques des variétés du pommier et de la vigne avec beaucoup de précision que n'importe quel modèle notamment dans des régions à climat doux comme celui de Sidi Lakhdar et Boumedfaa.

Les modèles de prédiction sont des bons outils pour étudier la phénologie des espèces. En effet, la modélisation des dates de débourrement et de floraison des deux espèces étudiées dans les trois sites contrastés a abouti à des résultats plus ou moins cohérents aux conditions des sites étudiés.

La modélisation à une phase des stades de débourrement et de floraison du pommier a révélé une bonne efficacité du modèle Smoothed Utah au site de Sidi Lakhdar, et des résultats meilleurs au site de Benchicao, avec les modèles Wang et Parabolic.

Le modèle à deux phases Chuine/ Sigmoid a donné une meilleure prédiction des dates de débourrement et de floraison au site de Sidi Lakhdar après le retrait des années où les besoins en unités de froid n'étaient pas satisfaits, cela confirme indirectement la non prise en compte d'une complexité de facteurs associés au fonctionnement physiologique pour des sites chauds comme celui de Sidi Lakhdar.

La prédiction des dates de débourrement et de floraison de la vigne avec les modèles à une phase n'a pas émis de bons résultats dans les deux sites d'étude. Une nette amélioration a été obtenue avec la modélisation à deux phases. Le modèle Chuine / Sigmoid semble être meilleur pour la prédiction des dates de débourrement dans les deux sites, Benchicao et Boumedfaa. Le modèle Chuine / Wang a donné une bonne prédiction des dates de floraison au site de Boumedfaa seulement. Aucun modèle n'a donné une prédiction acceptable pour les dates de floraison à Benchicao.

L'utilisation de l'outil PMP 5.5 a permis de détecter une tardivité des dates de débourrement au site de Benchicao qui semble être induite par un manque des besoins en unités de chaleur, comparée à une précocité des dates de débourrement et de floraison au site de Boumedfaa, résultant d'une tendance à un réchauffement.

L'étude des impacts du réchauffement climatique sur le pommier ou la vigne nécessite une détermination précise des cumuls en unités de froid nécessaires à la levée de dormance et le débourrement dans divers milieux. Cela implique une mise en évidence de ces deux phases par des techniques de forçage au niveau de laboratoire et des études anatomiques des tissus meristématiques des bourgeons, pour voir l'aptitude de ces derniers au débourrement notamment dans les climats à hivers doux comme ceux de Sidi Lakhdar et Boumedfaa.

L'analyse des données phénologiques en fonction des températures par la technique PLS a déjà prouvé son efficacité dans la détermination des périodes d'accumulation des unités de froid et des périodes d'accumulation des unités de chaleur. Un appui plus accentué mérite d'être entrepris concernant cette méthode pour d'autres espèces et dans d'autres régions.

L'utilisation des outils de modélisation s'avère très importante dans les études abordant les effets du réchauffement climatique, néanmoins il est nécessaire d'introduire d'autres facteurs abiotiques comme la pluviométrie, la photopériode pour avoir plus d'explication, sans omettre l'ajustement des modèles par l'introduction des dates de levée de dormance pour avoir plus de fiabilité (Chuine et al, 2015).