

République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE d'ORAN Mohamed Boudiaf



Faculté de Chimie
Département de Chimie Organique Industrielle
Spécialité : Génie des procédés *Option: Génie de l'environnement*

THESE
Présentée par

M. ABDERRAHMANI BELAID

Pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences
Génie des Procédés
Génie de l'environnement

Thème

LES RISQUES CLIMATIQUES ET LEURS IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT

Soutenue ledevant la commission d'examen composée de :

| <u>Qualité</u> | <u>Nom et Prénoms</u> | <u>Grade</u> | <u>Etablissement</u> |
|----------------|-----------------------|--------------|----------------------|
| Président | M. KAMECHE M | Professeur | USTO-MB |
| Rapporteur | M. HADJEL M | Professeur | USTO-MB |
| Examineur | M. MOKHBI A | MCA | Univ. Mostaganem |
| Examineur | M. HASSINI N | Professeur | Université d'Oran |
| Examineur | M. BENDRAOUA A | MCA | USTO-MB |
| Examineur | M. BELKHODJA M | Professeur | Université d'Oran |

Année universitaire: 2014-2015

REMERCIEMENTS

Je ne saurais exposer ce modeste travail sans exprimer toute ma reconnaissance au Professeur Mohamed Hadjel pour sa disponibilité son aide fructueuse et les nombreux conseils qu'il m'a prodigués tout au long de ma formation.

Je remercie Monsieur le Professeur Kamèche d'avoir accepté de présider le jury de soutenance, ainsi que les Professeurs Moulay Belkhodja, Abdelaziz Bendraoua, Noureddine Hassini et Abdelouahab Mokhbi d'avoir accepté de juger ce travail.

Mes remerciements s'adressent également au responsable du Centre Météorologique National pour l'accès et l'utilisation de données climatologiques, au Professeur Labdi du Centre de Recherches de Sidi Bel Abbès, au Docteur Derk Rijks , expert en agrométéorologie auprès de l'OMM (Genève) , d'avoir bien voulu à un moment ou un autre répondre à mes questionnements.

Enfin, je remercie tous ceux qui de près ou de loin ont manifesté un intérêt ou apporté une aide de quelque nature que ce soit à la réalisation de ce travail.

| DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à mes défunts parents en guise d'éternelle reconnaissance, à ma femme et mes enfants pour leur soutien indéfectible et leur encouragement permanent ...

Et ma petite fille « CHERINE »

SOMMAIRE

| | |
|--|----|
| RESUME | 1 |
| INTRODUCTION..... | 2 |
| CHAPITRE I : L'EVOLUTION DU CLIMAT ET SES CONSEQUENCES | 6 |
| Introduction..... | 6 |
| I.1. Changement climatique à l'échelle planétaire | 6 |
| I.2. Evolution du climat en Algérie | 8 |
| I.3. Conséquences du changement climatique | 10 |
| I.3.1. Sur les ressources naturelles..... | 10 |
| I.3.1.1. Ressources en eau | 10 |
| I.3.1.2. Sol et écosystèmes..... | 12 |
| I.3.2. Sur la santé..... | 13 |
| I.4. Phénomènes climatiques et leurs actions..... | 14 |
| I.4.1. Les ouragans et les cyclones | 14 |
| I.4.2. Les oscillations australes | 14 |
| I.5. Effets du changement climatique sur la santé..... | 17 |
| I.5.1. Effets directs et indirects du changement climatique sur la santé | 19 |
| I.5.2. Changements sanitaires liés au changement climatique | 20 |
| I.6. Effets du changement climatique sur l'agriculture et la sécurité alimentaire..... | 21 |
| I.6.1. Impacts sur le milieu | 22 |
| I.6.2. Impacts sur le fonctionnement des cultures | 23 |
| I.6.3. Impacts sur la production agricole | 25 |
| I.7. Adaptation de l'agriculture aux changements climatiques | 25 |
| Conclusion | 28 |
| CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)..... | 29 |
| Introduction..... | 29 |
| II.1. Définition et généralités..... | 29 |

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| II.2. Historique de la maladie | 29 |
| II.2.1. Situation générale | 29 |
| II.2.2. Situation et évolution de la FCO | 30 |
| II.3. Caractérisation de la maladie | 34 |
| II.3.1. Répartition géographique | 34 |
| II.3.2. Le tableau clinique | 35 |
| II.3.3. Source de contagion | 36 |
| II.3.4. Les acteurs de la maladie | 37 |
| II.3.4.1. L'agent pathogène | 37 |
| II.3.4.2. Les espèces animales sensibles | 38 |
| II.3.4.3. Les insectes vecteurs | 38 |
| II.3.4.4. L'environnement | 41 |
| II.3.4.5. Le vecteur principal afro-européen : Culicoide Imicola | 43 |
| II.3.4.6. Transmission | 45 |
| II.4. La fièvre catarrhale ovine en Algérie | 46 |
| II.4.1. Situation en juillet 2000 | 46 |
| II.4.2. Situation en août et septembre 2000 | 46 |
| II.4.3. Situation en juillet 2006 | 47 |
| II.4.4. Situation en août 2006 | 47 |
| II.4.5. Origine de la maladie | 48 |
| II.4.6. Evolution de la maladie | 49 |
| II.5. Analyse des facteurs climatiques liés à l'émergence de la FCM | 52 |
| II.5.1. Cas de l'année 2000 | 53 |
| II.5.2. Cas de l'année 2006 | 66 |
| II.5.2.1. Représentation de la région d'étude | 66 |
| II.5.2.2. Influence des paramètres climatiques | 67 |
| Conclusion | 74 |

SOMMAIRE

| | |
|--|-----|
| GLOSSAIRE..... | 75 |
| CHAPITRE III : IMPACT DE LA SECHERESSE SUR LES PARAMETRES AGRONOMIQUES DU BLE | 78 |
| Introduction..... | 78 |
| III.1. Théorie du modèle..... | 79 |
| III.1.1. L'évapotranspiration potentielle | 79 |
| III.1.2. La transpiration de la plante | 81 |
| III.1.3. L'évaporation du sol..... | 82 |
| III.1.4. Le rayonnement solaire maximal en jour clair..... | 83 |
| III.1.5. L'intensité du rayonnement solaire..... | 84 |
| III.1.6. Les facteurs de gelée | 84 |
| III.1.7. Thermopériodisme journalier | 86 |
| III.1. 8. La vernalisation | 87 |
| III.1.9. Les pluies..... | 88 |
| III.1.10. Bilan hydrique | 89 |
| III.2. Utilisation du modèle | 89 |
| III.2.1. Entrées du modèle | 91 |
| III.2.2. Sorties du modèle | 93 |
| III.2.3. Exécution de la simulation..... | 94 |
| III.2.4. Application du modèle..... | 95 |
| III.2.5. Comparaison des variables | 110 |
| III.2.6. Impact de la sécheresse sur le cycle du blé | 111 |
| III.2.6.2. Indice de surface verte | 113 |
| III.2.6.3. Evolution du poids de l'épi..... | 114 |
| III.2.6.4. Evolution du poids total des feuilles, de la tige et de la plante..... | 116 |
| III.3. Commentaires..... | 118 |
| Conclusion | 119 |

SOMMAIRE

| | |
|--|-----|
| CHAPITRE IV : ADAPTATION A LA SECHERESSE | 120 |
| Introduction..... | 120 |
| IV.1. Hypothèses de travail | 120 |
| IV.2. Données et méthode | 121 |
| IV.3. Analyse des données | 121 |
| IV.3.1. Période de référence | 121 |
| IV.3.2. Période 1994-2004 | 122 |
| IV.4. Détermination d'une date optimale de semis..... | 125 |
| IV.4.1. Début de la saison des pluies | 125 |
| IV.4.2. Fin de la saison des pluies | 129 |
| IV.4.3. Début de la Floraison | 129 |
| IV.4.4. Estimation des séquences sèches à partir de la floraison | 130 |
| IV.4.5. Probabilités associées aux séquences sèches | 138 |
| IV.5. Commentaires | 141 |
| Conclusion | 142 |
| CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS | 143 |
| BIBLIOGRAPHIE | 146 |
| ANNEXE I: ORGANIGRAMME DU MODELE SIMTAG..... | 155 |
| ANNEXE II: LEXIQUE DES NOMS DE VARIABLES UTILISEES | 156 |
| ANNEXE III: EXEMPLES DE SORTIES DU MODELE..... | 164 |
| ANNEXE IV: LISTE DES ABREVIATIONS..... | 166 |
| ANNEXE V: LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES..... | 167 |

RESUME

Les risques climatiques sont liés aux phénomènes extrêmes tels les vagues de chaleur, les vagues de froid, les pluies excessives, les sécheresses qui, initialement considérés comme exceptionnels, ont tendance aujourd'hui à devenir de plus en plus fréquents et à augmenter en intensité (GIEC, 2011).

Ces phénomènes, en modifiant les facteurs du milieu, favorisent l'apparition de maladies émergentes et leur propagation. C'est le cas de la fièvre catarrhale ovine (ou Blue Tongue), maladie typique des régions tropicales qui est apparue à la faveur de conditions climatiques particulières à El-Tarf et qui s'est propagée selon un itinéraire particulier pour atteindre le Sud-ouest algérien.

De même, les sécheresses récurrentes observées ces dernières années à l'ouest du pays s'accompagnent d'un déficit hydrique qui affecte la croissance et le développement des plantes et s'accompagne d'une réduction appréciable de la production agricole. Ces deux cas d'étude constituent le point focal de nos travaux développés en détail dans les prochains chapitres.

L'objectif de l'étude est de montrer l'impact du changement climatique sur la santé d'une part et les incidences de la sécheresse sur la physiologie des cultures d'autre part, dans la perspective d'élaborer une stratégie de prévention et de préconiser des mesures d'atténuation ou d'adaptation ensuite, compte tenu du caractère structurel du changement du climat.

La zone d'étude comprend naturellement la région Est et la région Ouest où ces deux faits marquants ont été observés.

Les résultats obtenus dans la première partie de l'étude montrent une prévalence élevée de la fièvre catarrhale ovine en période post-humide, soit quelques jours après une pluie abondante, caractérisée par une forte humidité de l'air, associée à des températures de l'ordre de 25 à 30°C ; tandis que la répartition spatiale des aires d'infestation est déterminée par la force et la direction du vent.

D'autre part, la simulation effectuée sur les diverses variétés de blé montrent des différences significatives entre la majorité des variables compilées, à l'exception du nombre de feuilles et de leur rythme d'apparition qui demeurent pratiquement identiques dans les deux cas.

Cependant, le poids des feuilles et par suite la surface foliaire est deux fois plus élevée en année humide qu'en année sèche : le déficit hydrique observé durant l'année 1993-1994 a provoqué la dégénérescence des feuilles pendant la phase végétative, réduisant ainsi le rayonnement photo synthétiquement actif absorbé par la plante, principal catalyseur dans l'élaboration de matière sèche.

Enfin, on constate que la précipitation annuelle est un facteur déterminant du rendement final qui passe de 270 g/m² à 47 g/m² pour une faible pluviométrie. Cet effet réducteur de la sécheresse peut, dans un premier temps, être atténué en fixant un itinéraire biologique préalable par le choix d'une date de semis convenable.

Mots clés : Changement climatique, sécheresse, maladies émergentes, itinéraire biologique.

| INTRODUCTION

Le changement climatique est un thème d'actualité au centre des préoccupations de la communauté scientifique à l'échelle mondiale.

La mobilisation des chercheurs autour de cette thématique est nécessaire, voire indispensable au regard de ses conséquences sur les diverses composantes de notre environnement. (GIEC, 2011).

Cette "évolution" du climat est, à l'instar de nombreuses régions du monde, perceptible dans notre pays et se manifeste différemment à travers le territoire.

Alors qu'au Centre et à l'Est du pays surviennent des pluies excessives (inondation de Bab-El-Oued en novembre 2001, inondation d'El-Tarf en février 2012), des sécheresses parfois sévères, s'observent de plus en plus en région Ouest.

Ces deux phénomènes seront considérés dans la présente étude pour leurs influences respectives sur la propagation des maladies infectieuses à transmission vectorielle et sur la productivité agricole.

Ainsi, une période post-humide, associée à une température élevée provoque momentanément des conditions propices à la prolifération d'insectes vecteurs chargés de transmettre et propager des maladies. C'est le cas de la fièvre catarrhale ovine, maladie à transmission vectorielle particulièrement sensible au changement climatique et qui est justement apparue dans la localité d'El-Tarf en juillet 2000.

Par contre, une sécheresse prolongée modifie l'état hydrique interne des plantes et empêche l'accomplissement de certains processus physiologiques. Ceci se traduit, pour la plupart des cultures pluviales, par de faibles rendements.

Notre travail scindé en deux parties consiste à déterminer l'impact de ces deux phénomènes témoins du changement climatique sur la santé et l'agriculture.

La méthodologie adoptée dans la première partie de l'étude consiste d'abord à établir l'épidémiologie de la maladie à partir de la consultation et le dépouillement d'archives ainsi que des investigations menées auprès des différents services vétérinaires.

| INTRODUCTION

Les données climatologiques disponibles au niveau des zones d'infestation ainsi délimitées seront ensuite analysées et confrontées aux exigences éco-climatiques de l'insecte pathogène.

Dans la seconde partie, il s'agit d'apprécier les incidences de la sécheresse sur la croissance, le développement et le rendement des céréales. Pour cela, nous avons procédé à la simulation de 23 variétés de blé tendre à l'aide du modèle de simulation de croissance SIMTAG (Simulation Model for Triticum Aestivum Genotypes), en conditions hydriques favorables et défavorables pour faciliter la comparaison. Celle-ci est effectuée au moyen d'une dizaine de variables caractéristiques de la physiologie du blé et des composantes de son rendement.

Les résultats obtenus dans ces deux cas d'étude aideront également les instances concernées, chacune dans son domaine, à prendre des mesures d'atténuation et/ou d'adaptation afin de se prémunir des risques émergents liés à d'éventuelles famines ou de nouvelles pathologies.

Cette étude comporte quatre principaux chapitres :

Le chapitre I explicite l'évolution du climat à différentes échelles spatiale et temporelle, en mettant l'accent sur la tendance du climat en Algérie à travers les deux principaux paramètres que sont les précipitations et la température. Les conséquences sur le sol et les écosystèmes, les ressources en eau, la santé et l'environnement en général y sont également exposées pour montrer l'existence d'une corrélation entre le phénomène épisodique El Niño et les poussées épidémiques de certaines maladies à transmission vectorielle dont la prévalence augmente avec les fortes précipitations, justifiant ainsi le choix porté sur la fièvre catarrhale ovine dans la thématique abordée.

Il comporte un certain nombre de généralités étayées par des faits et montrant l'interdépendance climat-santé, notamment dans le contexte du changement climatique actuel mis en évidence par de nombreux travaux de recherche et perceptible à travers des événements et phénomènes météorologiques exceptionnels. Il traite en particulier des incidences liées aux effets physiologiques de la chaleur et du froid sur la santé humaine, en citant l'exemple de la canicule à l'origine de 1500 décès en France en 2003. Des incidents de cette nature n'ont cependant pas été médiatisés dans notre pays.

Toujours dans le domaine de la santé humaine, on cite certaines maladies émergentes comme la schistosomiase localisée à El-Oued et le paludisme détecté récemment à Ghardaia

| INTRODUCTION

(Quotidien d'Oran du 19 février 2013), en rappelant que 39 personnes ont été infectées en 2012. Cependant les statistiques éditées jusque-là n'ont pas été alarmantes.

Il ressort de ce chapitre la nécessité d'adapter les systèmes sanitaires au contexte climatique du moment afin de prémunir la population contre de nouvelles pathologies et/ou répondre à de nouveaux besoins en matière de services de santé.

Le chapitre II expose dans le détail la première partie de notre thème, à savoir l'impact du climat sur la fièvre catarrhale ovine. Après la définition de la maladie, de son mode de transmission, et de l'insecte vecteur chargé de sa transmission, nous donnons un bref aperçu historique qui montre notamment que cette pathologie n'est signalée dans les pays du Maghreb qu'en 1999, soit une année après l'avènement de l'année la plus chaude à l'échelle planétaire. Dans un second temps, nous avons passé en revue la situation épidémiologique de la maladie en juillet-août-septembre 2000 et en juillet-août 2006 afin de suivre son évolution et déterminer les causes de cette trajectoire particulière. Enfin, nous avons confronté la prévalence de la pathologie avec les éléments climatiques en liaison avec la biologie de l'insecte vecteur.

Le chapitre III est relatif à l'effet de la sécheresse sur la physiologie du blé et son potentiel de production en conditions favorables et en conditions de déficit hydrique. Cet effet est apprécié grâce à l'utilisation d'un modèle de simulation de croissance.

La simulation montre une réponse spectaculaire de la plante en matière de rendement lorsque la pluie est suffisante et qu'une même pluviométrie sur deux années consécutives (91/92 et 93/94) ne se solde pas nécessairement par des rendements identiques, la bonne répartition dans le temps des pluies au cours de l'année 91/92 a assuré un meilleur développement de la plante, et par suite un bon rendement.

Ceci montre qu'il est possible de pallier au manque d'eau en zones arides par un ajustement de la saison agricole aux épisodes pluvieux de l'année.

Le chapitre IV expose la méthodologie à utiliser pour atténuer quelque peu les effets de la sécheresse par une adaptation dite du premier degré.

Pour cela, il convient d'ajuster le « calendrier agricole » aux principaux événements climatiques tels que le début et la fin de la saison des pluies, l'amorce d'un épisode sec etc. ; afin de déterminer des itinéraires techniques les plus favorables au développement des cultures.

| INTRODUCTION

Ceci est possible en déterminant, par une approche probabiliste, une date de semis optimale permettant de soustraire le plus possible la plante aux aléas du climat. Cette solution à court terme peut être d'un grand apport en attendant les résultats prometteurs de la génétique de l'évolution et leur mise à contribution dans l'adaptation des cultures à la sécheresse climatique.

Introduction

Le développement socioéconomique, les modes de production et de consommation etc. sont autant de facteurs humains à l'origine de l'évolution du climat, communément désignée sous le vocable de changement climatique. En outre, il est admis que tout changement dans les moyennes, même faible, implique une augmentation de la fréquence des extrêmes climatiques. (Katz & Brown, 1992) Cette évolution est, en effet, actuellement perceptible non seulement à travers l'apparition de phénomènes naturels extrêmes mais également au regard de nouveaux comportements inexistants jusqu'alors tels que la migration des populations vers des zones plus sécurisées pour « échapper » aux aléas du climat au point où l'on parle actuellement de réfugiés climatiques dont le nombre pourrait atteindre 150 millions d'ici 2050 selon la déclaration du président du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat).

Le fait que plusieurs changements résultants sont déjà perceptibles aux échelles continentales et régionales et ont concerné différents aspects du climat dont les événements extrêmes (IPCC, 2007)¹, a permis de tirer la sonnette d'alarme et a fortement contribué à la prise de conscience de la communauté internationale quant à la nécessité d'agir pour atténuer la menace grandissante sur les ressources biotiques et abiotiques de notre environnement.

Cette menace est d'autant plus à craindre que les ressources naturelles de notre pays, fort importantes par ailleurs, sont vulnérables et fragiles de par leur dépendance vis-à-vis du climat.

I.1. Changement climatique à l'échelle planétaire

Dans son quatrième Rapport d'évaluation, le GIEC, organisme coparrainé par l'OMM, expose les changements attendus, notamment une hausse de la fréquence et de l'intensité des crues, périodes de sécheresse, fortes tempêtes, vagues de chaleur et tempêtes de poussière, qui menacent la santé, l'hygiène, l'approvisionnement énergétique, les ressources en eau, la sécurité alimentaire etc. (GIEC, 2007).

Cette perception du climat futur repose sur les constats suivants :

- Les onze dernières années (1995-2006) figurent parmi les plus chaudes depuis qu'on dispose d'enregistrements de la température de surface (depuis 1850). La nouvelle valeur de la vitesse moyenne du réchauffement des cent dernières années (1906-2005) est de

¹ Intergovernmental Panel on Climatic Change.

CHAPITRE I : L'EVOLUTION DU CLIMAT ET SES CONSEQUENCES

0.74°C au lieu de 0.6°C. Il est aussi établi que l'année 1998 est l'année la plus chaude (0,59 °C au-dessus de la normale 1961-1990).

- La teneur moyenne de l'atmosphère en vapeur d'eau a augmenté depuis au moins les années 1980 tant au-dessus des terres émergées et des océans que dans la haute troposphère. L'accroissement est dans l'ensemble cohérent avec le supplément de vapeur d'eau qu'un air chaud peut contenir.
- La fréquence des fortes précipitations a augmenté dans la plupart des zones terrestres, en cohérence avec le réchauffement et les accroissements observés de vapeur d'eau atmosphérique.
- Les observations effectuées depuis 1961 montrent que la température moyenne des océans a augmenté jusqu'à des profondeurs d'au moins 3000 m, et que les océans absorbaient plus de 80 % de la chaleur ajoutée au système climatique. Un tel réchauffement entraîne la dilatation de l'eau de mer, contribuant à la montée du niveau des mers. En effet, le niveau global moyen de la mer s'est élevé à une vitesse moyenne de 1.8 [1.3 -2.3] mm/an, entre 1961 et 2003. Cette vitesse a été supérieure entre 1993 et 2003, soit environ 3.1 [2.4 -3.8] mm/an. L'élévation totale au XX^{ème} siècle est estimée à 0.17 [0.12-0.22].
- Des changements largement répandus des températures extrêmes ont été observés au cours des 50 dernières années. Les journées froides, les nuits froides et le gel sont devenus moins fréquents, tandis que les journées chaudes, les nuits chaudes et les vagues de chaleur sont devenues plus fréquentes.

Le pourcentage de la superficie de la planète où sévissent des conditions très sèches ou très humides quoique hautement variable, semble avoir augmenté depuis la fin des années 1970. Les précipitations connaissent des variations à différentes échelles de temps, on note une faible tendance à l'augmentation des précipitations dans l'hémisphère Sud et à l'échelon mondial.

A l'échelle régionale, de nombreuses études montrent des changements des régimes de précipitations, ce qui est une indication du changement de la circulation atmosphérique à une plus grande échelle.

Elles nous apprennent, entre autres, que le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord font partie désormais des premières régions affectées par les changements climatiques, d'autant plus qu'elles sont arides ou semi-arides.

Il faut remarquer qu'on ne pouvait pas, il y a seulement dix ans, être aussi franc et aussi tranché dans la description des changements climatiques et de la hausse des températures. (Najib Saab, 2009).

Ainsi, à l'échelle du Maghreb, le climat a connu un changement brutal à partir de 1973, date qui a coïncidé avec la sécheresse du Sahel (M.Tabet Aoul, 2011). Depuis 1973, on constate :

- une occurrence plus grande des sécheresses : une année sur trois
- une intensification des inondations : 1990 en Tunisie, 2001 en Algérie et en 2002 au Maroc
- un nombre croissant de vagues de chaleurs en toutes saisons
- des feux de forêts (perte annuelle de 25000 ha/an en Algérie et au Maroc
- une élévation du niveau de la mer

La période 1975-2004 a connu quelques années avec une pluviométrie excessive, concentrée sur de très courtes périodes de l'année. Les fortes précipitations qui se produisent en quelques jours seulement en régions arides sont à l'origine de catastrophes naturelles telles que les inondations (janvier 1990 en Tunisie, novembre 2001 en Algérie et novembre 2002 au Maroc).

Ces inondations ont occasionné d'importants dégâts sur les infrastructures et l'habitat et réduit notablement l'activité économique et sociale : les dégâts liés à l'inondation d'Alger en novembre 2001 sont estimés à près d'un milliard de dollars et à plus d'un millier de morts. Le réchauffement entraîne l'élévation du niveau de la mer en raison de la dilatation thermique des mers et de la fonte de la glace terrestre. Les mesures fournies par les marégraphes, montre que l'élévation moyenne annuelle était de 1 à 2 mm au cours du vingtième siècle. D'après les informations fournies par quelques stations Européennes disposant de données pratiquement continues sur le niveau de la mer sur 200 ans, confirment son élévation au cours du dernier siècle (Bouregba et al, 2009).

I.2. Evolution du climat en Algérie

La variation des deux paramètres fondamentaux que sont la température et les précipitations au cours du siècle dernier constitue un bon indicateur de l'aspect évolutif du climat en Algérie. On observe une tendance à la hausse des températures à travers tout le pays.

Les températures annuelles oscillent entre 21.5°C (1916) et 23.5°C (1985). Les années les plus froides sont respectivement 1904, 1907, 1916, 1917, 1925, 1974 et 1976, et les années les plus chaudes sont 1945, 1954, 1985, 1988 et 1997 (Figure 1).

CHAPITRE I : L'EVOLUTION DU CLIMAT ET SES CONSEQUENCES

L'évolution récente du climat sur les 30 dernières années montre que les températures moyennes annuelles ont subi une augmentation moyenne de 0.5 °C, avec un maximum durant les saisons chaudes (JJA) de 0.7 °C. L'année la plus chaude a été 2003 pour les zones côtières Est et Centre, 2006 pour les zones côtières Ouest et 2001 pour les hauts plateaux et le Nord Sahara (Source Office national de la Météorologie Alger Dar El Beida).

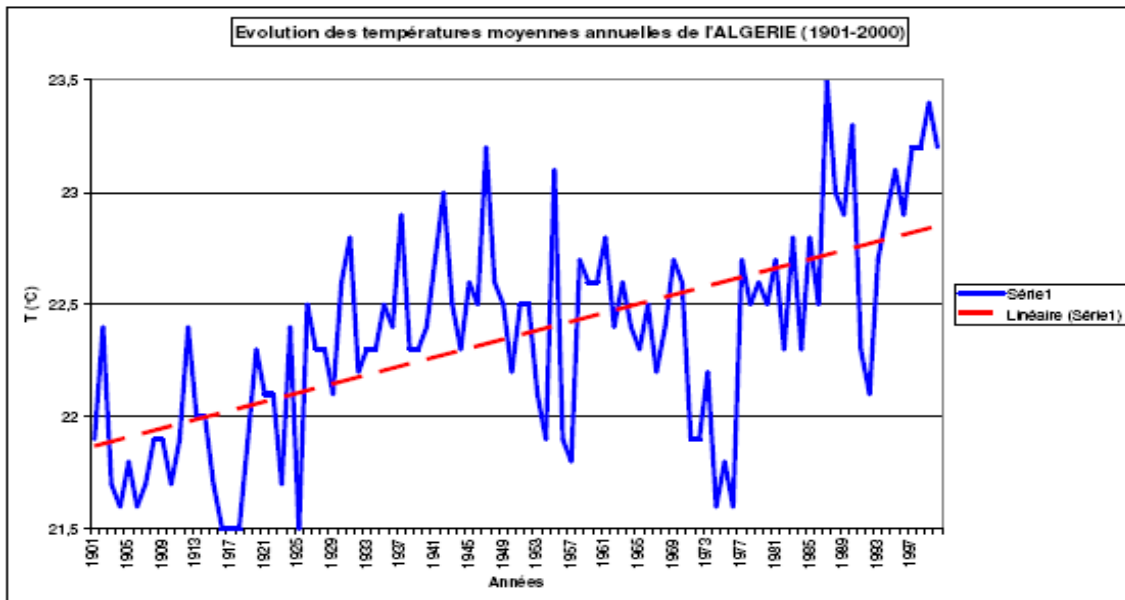


Figure 1. Evolution des températures moyennes annuelles de l'Algérie (1901-2000) (Djellouli, 2008).

La tendance générale des précipitations, quant à elle, est en baisse. Les précipitations annuelles oscillent entre 59mm (1984) et 128mm (1901). Les années où on a enregistré des hauteurs de précipitations minimum sont: 1914, 1926, 1938 et 1984. Les années où on a enregistré des hauteurs de précipitations maximum: 1901, 1952, 1957 et 1976 (Figure 2).

Durant cette même période, l'Algérie a connu plusieurs sécheresses, mais celles des dernières décennies sont encore plus remarquables compte tenu du déficit pluviométrique enregistré un peu partout sur le territoire, particulièrement à l'Ouest du pays.

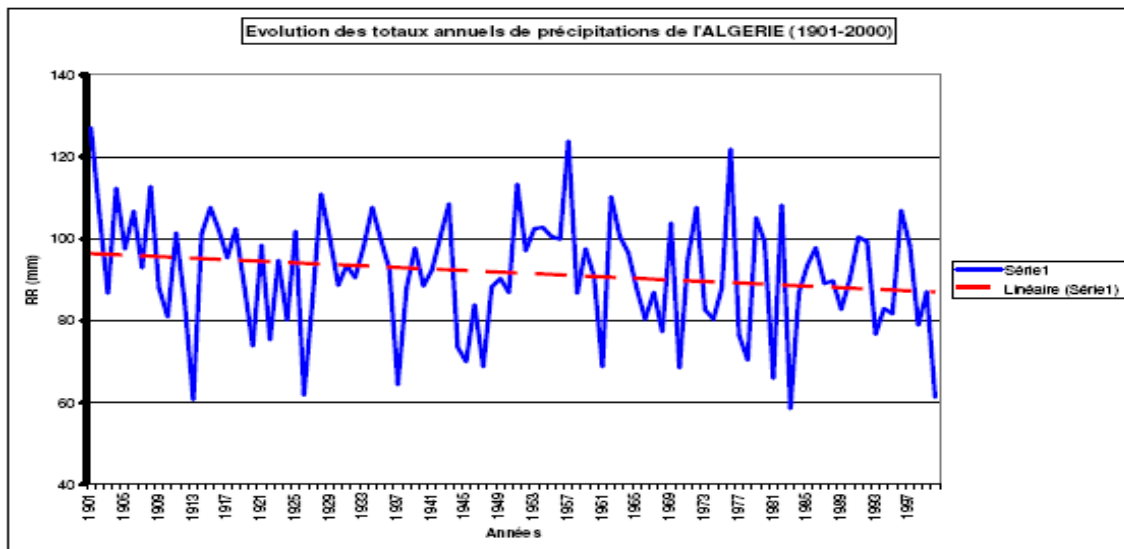


Figure 2. Evolution des totaux annuels de précipitations de l'Algérie (1901-2000) (Djellouli, 2008).

I.3. Conséquences du changement climatique

Ces tendances à la hausse des températures et à la baisse des précipitations affectent inmanquablement les composantes de notre environnement (ressources naturelles : eau, sols, forêts, parcours etc.), l'agriculture et contribuent à la réémergence de certaines maladies.

I.3.1. Sur les ressources naturelles

Les ressources naturelles, de par leur étroite dépendance vis-à-vis du climat, subissent directement les effets des fluctuations climatiques.

I.3.1.1. Ressources en eau

Les ressources hydriques sont vulnérables aux variations du climat. Selon le rapport du GIEC (2008), d'ici 2020, 75 à 250 millions de personnes seront confrontés au stress hydrique sous l'effet des changements climatiques.

L'eau et sa gestion posent déjà des problèmes indépendamment du changement climatique.

Aussi, un grand intérêt doit être accordé à la ressource hydrique, en effet, toute politique de développement est axée sur la disponibilité de l'eau.

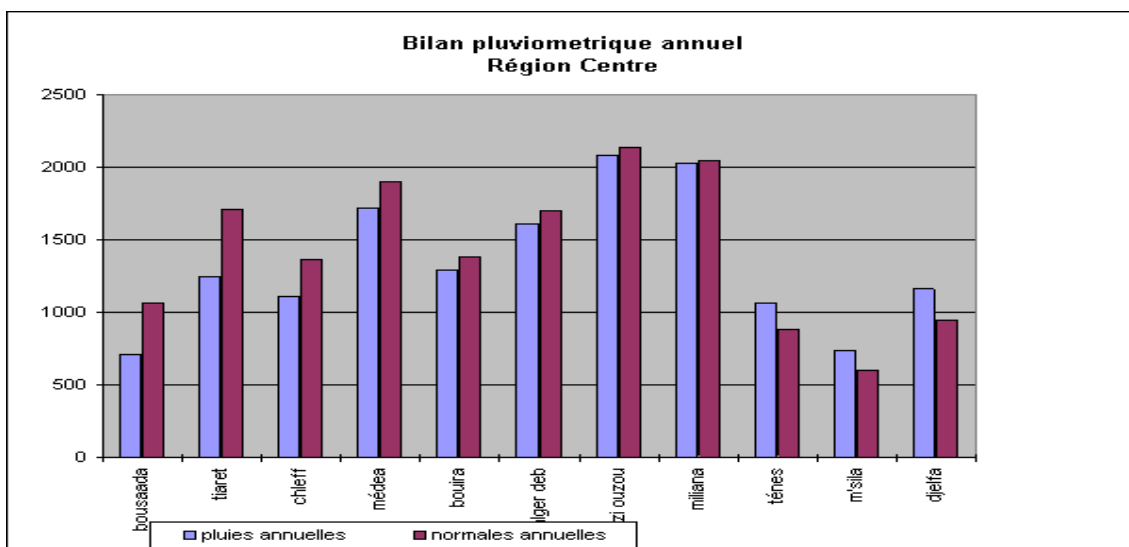
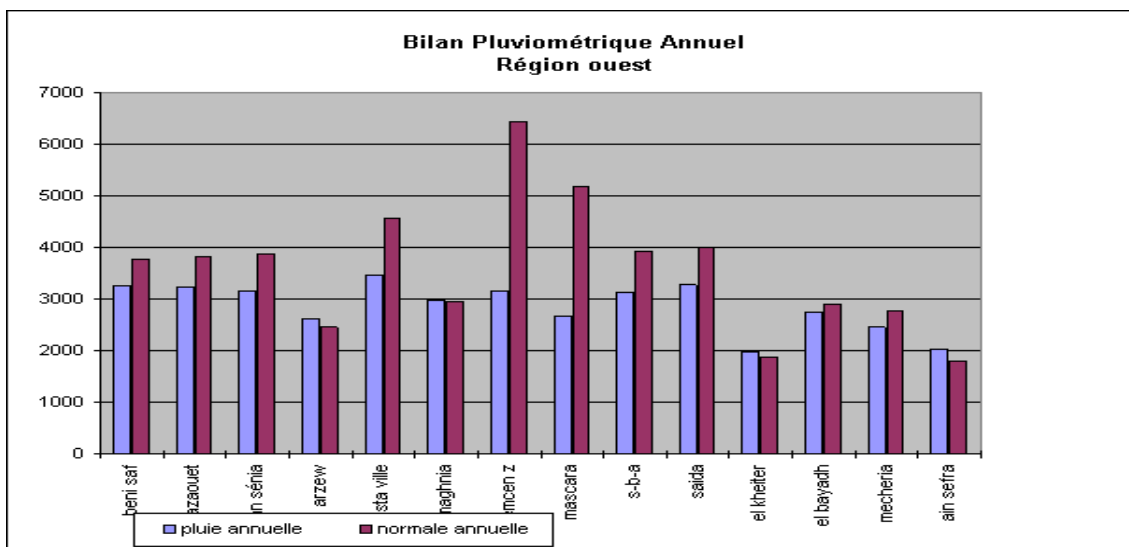
Les régions arides et semi arides seraient les plus frappées en raison de l'accroissement des sécheresses.

CHAPITRE I : L'EVOLUTION DU CLIMAT ET SES CONSEQUENCES

La sécheresse sévissant au Maghreb depuis la décennie 70 et qui se poursuit jusqu' alors (*Djellouli, 2007 ; Meddi, 2006 ; Hénia, 1993, ...*) a drastiquement réduit les ressources en eau et conduit à une diminution dans la mobilisation des eaux de surface.

Les données pluviométriques enregistrées permettent de constater que les moyennes de ces dernières années accusent une nette diminution, comparativement à la normale. Une réduction des disponibilités en eau destinée pour l'agriculture pluviale et irriguée est à prévoir et nécessite le recours à la mobilisation des ressources hydriques non conventionnelles (dessalement de l'eau de mer, traitement des eaux usées pour l'irrigation etc.)

L'analyse de la pluviométrie de la décennie 1990-1999, basée sur le bilan pluviométrique annuel montre que la quasi-totalité des stations de la région Ouest présentent un déficit pluviométrique important .Ce déficit est toutefois moins accentué au Centre et à l'Est du pays (figure 3).



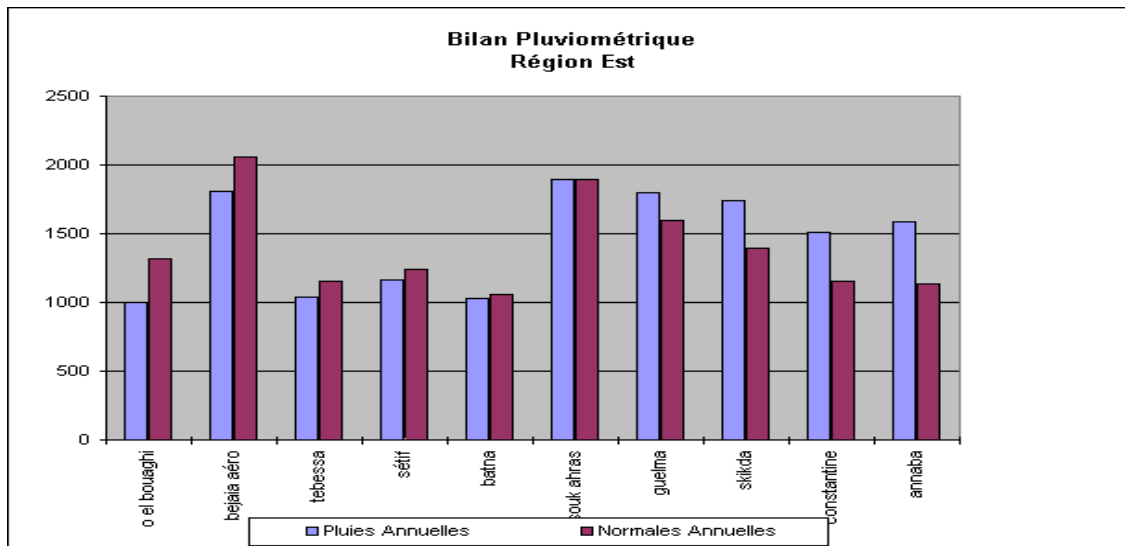


Figure 3. Bilan pluviométrique des régions Ouest, Centre et Est.

Ces déficits hydriques sont évalués à près de 20% pour la région Ouest, 13% pour le Centre et 12% pour l'Est du pays (*Ould Amara, 2000 ; Bouguerra, 2001*).

Ces chiffres restent valables pour la Tunisie centrale et méridionale ainsi que pour le Maroc (*Moksitt, 2000*). Selon les saisons hivernales et printanières (*Meddi, 2006*), pour certaines stations la réduction des précipitations peut s'échelonner entre 20 et 40%.

La raréfaction des ressources hydriques, conjuguée à des besoins domestiques de plus en plus grandissants, à l'irrigation et à une industrie en plein essor invite à une meilleure valorisation de l'eau disponible notamment en agriculture, compte tenu de la tendance actuelle du climat.

Les populations seront davantage exposées aux conséquences de ces nouvelles conditions, ce qui appelle à modifier profondément notre ligne de conduite et d'envisager des possibilités d'adaptation et d'atténuation au cours des prochaines décennies.

I.3.1.2. Sol et écosystèmes

L'impact notable du changement climatique est la dégradation accélérée des sols par l'érosion hydrique et éolienne et par la salinisation en raison à la fois d'une plus forte évaporation et d'une baisse des pluies. Ces deux facteurs contribuent également, à divers degrés à la limitation de la ressource en eau, à la déperdition des terres fertiles, la dégradation des forêts, des zones naturelles et pastorales.

Sous l'effet conjugué d'actions anthropiques excessives et/ou inadaptées et des changements climatiques, la dynamique des écosystèmes est sérieusement perturbée avec des effets sur la

biodiversité, la distribution des espèces et l'équilibre des milieux naturels et des agro systèmes.

La dégradation des terres en zones arides se manifeste par une détérioration du couvert végétal, la destruction de leur potentiel biologique (appauvrissement de la diversité génétique de la faune et de la flore) ou encore de leur capacité à supporter les populations qui y vivent.

Au niveau du sol même, le réchauffement induit par l'augmentation de température pourrait stimuler la décomposition de l'humus et de la matière organique et donc réduire la fertilité de certains sols.

Le processus de changement climatique se traduira par un déplacement vers le Nord des étages bioclimatiques méditerranéens conduisant à une remontée des zones arides et désertiques (Kadik, 1983).

L'augmentation des températures, la diminution des précipitations et leur variabilité impliquent un décalage et une réduction des périodes de croissance en zones sèche. En effet, la température influence directement les végétaux en agissant sur leur métabolisme : les cultures ont besoin d'une certaine quantité de chaleur, variable selon l'espèce, pour atteindre les différents stades de croissance tels que la floraison et la maturité. Cette quantité de chaleur correspond à la température située au dessus d'un seuil minimal, appelé zéro de végétation, à partir duquel le développement des cultures est à peu près proportionnel à la température.

Cette quantité de chaleur, exprimée en degrés-jours est une bonne mesure du taux de croissance atteint, de sorte qu'une élévation de température s'accompagne d'une réduction de la période de croissance.

Des études agronomiques utilisent souvent cette mesure pour simuler la variation de la période de croissance en cas d'augmentation de la température liée à diverses causes.

I.3.2. Sur la santé

Le dernier rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du climat (GIEC) a confirmé qu'il existait des preuves tangibles que l'activité humaine agissait sur le climat de la planète et a souligné que cela avait de multiples incidences sur la santé humaine. (GIEC, 2007).

La variabilité et la modification du climat sont cause de décès et de maladies à travers les catastrophes naturelles qu'elles entraînent – telles que les vagues de chaleur, les inondations et les sécheresses.

De plus, les analyses d'impact et les travaux de recherche menés dans plusieurs pays montrent que le changement climatique devrait avoir des effets sur l'épidémiologie de nombreuses maladies et affections.

Ces effets sur la santé se feront sentir différemment d'un pays et même d'une région à une autre, en raison notamment de la configuration géographique de chaque pays. Leur nature et leur ampleur dépendront surtout de la capacité et de l'effort d'adaptation des systèmes de santé à cette nouvelle donne.

Certaines mesures immédiates peuvent être suffisamment efficaces compte tenu du climat actuel, mais doivent être réajustées ou revues si le changement climatique s'accroît ou s'accélère fortement.

I.4. Phénomènes climatiques et leurs actions

I.4.1. Les ouragans et les cyclones

Les phénomènes météorologiques inhabituels comme les ouragans et les cyclones qui surviennent fréquemment autour du tropique du Cancer (phénomènes plus connus sous le nom de typhons en Asie) ont des impacts sanitaires réels, à savoir :

- Interruption de programmes de santé publique telle que la vaccination
- Prolifération de vecteurs de maladies
- Dévastation des infrastructures sanitaires

I.4.2. Les oscillations australes

Elles sont dues à des modifications de la pression atmosphérique dans le Pacifique équatorial (caractérisées par un indice IOA : Indice d'Oscillation Australe, mesurant la différence de pression entre Tahiti à l'Est et Darwin à l'Ouest du Pacifique) ont donné naissance au phénomène El Niño.

Ce phénomène, à l'origine de certains événements climatiques extrêmes concerne plus particulièrement le contour tropical du Pacifique. Cependant, diverses zones géographiques sont plus ou moins touchées. L'impact sur le climat global peut se résumer à l'aide des événements suivants (MEDIAS Décembre 2000 N°12) :

- Records de chaleur

Lors de l'année 1997, la température estimative moyenne du globe, en surface, pour les zones terrestres et maritimes, a été évaluée de 0.44°C au-dessus de la moyenne de base de la période 1961-1990 ; l'année antérieure la plus chaude fut celle de 1995 (anomalie de +0.38°C). Le phénomène El-Niño semble avoir contribué à ce record mondial de chaleur.

- **Pluies excessives et inondations**

Les inondations peuvent être à l'origine des épidémies à transmission hydrique. En effet, les pluies intenses entraînent avec elles les eaux usées qui passent dans les canalisations d'eau potable (épidémies de typhoïde et dysenterie). La pluie peut également provoquer le lessivage des ordures qui peuvent contaminer la nappe phréatique.

En Amérique du Sud, la chaleur et l'humidité liées à El Niño ont favorisé la reproduction de moustiques, porteurs de malaria et d'autres maladies dangereuses, dont la dengue.

En décembre 1997 et janvier 1998, les côtes de l'Equateur et du Pérou ont reçu des pluies torrentielles. Des pluies torrentielles se sont également abattues sur l'Est du Kenya et le Sud de la Somalie, d'octobre à décembre 1997.

De récentes études ont établi l'existence d'une corrélation entre El Niño et les poussées épidémiques de certaines maladies telles que le paludisme et diverses maladies virales à transmission vectorielle dont la prévalence augmente avec les fortes précipitations.

Ainsi, à la suite des pluies diluviennes sur l'Est du Kenya et le Sud de la Somalie, il s'est produit dans ces régions une flambée de fièvre dans la vallée du Rift, maladie que l'on croyait éradiquée. Cette poussée épidémique a tué de très nombreux bovins et a même touché l'homme.

Dans plusieurs pays, certains indices montrent une relation du phénomène El Niño avec le choléra (Tanzanie, Kenya etc.)

Beaucoup reste encore à faire pour maîtriser et réduire les effets des maladies associées au phénomène El Niño.

Quelques-unes des conséquences potentielles sont cependant déjà assez bien connues. Par exemple, on sait que le paludisme est transmis par certaines espèces de moustiques ; la « maladie du sommeil » par la mouche tsé-tsé et l'onchocercose par la mouche noire. Cette maladie parasitaire à transmission vectorielle, très fréquente en Mauritanie, au Niger et au Mali, a entraîné le plus de décès d'enfants dans le monde. Elle survient le plus souvent en période post humide qui favorise la prolifération des insectes.

Comme le climat joue souvent un rôle crucial dans la distribution et l'abondance de ces populations d'insectes, l'habitat de nombre d'entre elles pourrait se modifier sous l'effet des changements climatiques annoncés. En cas de réchauffement du climat, certaines régions d'Europe pourraient être menacées par le paludisme.

CHAPITRE I : L'EVOLUTION DU CLIMAT ET SES CONSEQUENCES

Il est aujourd'hui possible de savoir quels sont les habitats les plus propices à un taux élevé de survie chez la mouche tsé-tsé et les moustiques et, par voie de conséquence, en utilisant les systèmes d'information géographiques combinés à d'autres données, de déterminer les régions à risque pour les populations humaines.

- Sécheresse

La sécheresse est un état temporaire, naturel et aléatoire de réduction notable des précipitations et de la disponibilité en eau par rapport aux valeurs normales.

Les cycles de sécheresse survenus dans les pays méditerranéens du Sud, ces dernières décennies sont plus aigus et plus récurrents que ceux connus auparavant. Le constat a été dressé à plusieurs reprises par les experts environnementaux et les agronomes. Si nous établissons d'ailleurs une comparaison entre les données relatives aux changements climatiques, d'un côté, et celles référant à la hausse des températures, de l'autre, au cours des dernières décennies, nous concluons à une forte corrélation entre les deux phénomènes.

Les changements climatiques se manifestent progressivement par des cycles de sécheresse plus longs et affecteront par conséquent les terres agricoles et les sources d'approvisionnement en eau douce.

Les dix dernières années ont été les plus chaudes au niveau mondial et aussi les plus sèches dans beaucoup de zones méditerranéennes.

C'est durant les épisodes secs qu'on observe une forte occurrence de maladies à transmission flugienne. L'effet combiné du vent et de la sécheresse provoque des épidémies de méningite et de trachome, maladie fréquente dans le sud algérien.

Si on se réfère au dernier rapport du GIEC, on constate que les événements extrêmes vont être de plus en plus fréquents. Cela veut dire, dans le monde méditerranéen, des périodes successives de sécheresses plus ou moins longues et des périodes plus pluvieuses mais avec des épisodes pluvieux encore plus violents que ce que nous connaissons déjà (comme 290 mm en deux jours ayant provoqué les inondations de Bab El Oued en novembre 2001). Les conséquences sont donc des inondations violentes tant en zones rurales qu'en ville, des dégâts matériels et des pertes de vies humaines : les inondations d'El Tarf du 22 et 23 février 2012 ont occasionné des dégâts estimés à 200 milliards de centimes. Le secteur de l'agriculture reste le plus touché avec des centaines d'hectares entre céréales, cultures maraîchères, arboriculture etc. Le secteur des infrastructures de base comme les routes a aussi subi de

sérieux dégâts ; un pont a été endommagé, des affaissements ont été également constatés. Le nombre de familles sinistrées a atteint 6800 (Quotidien d'Oran du 03 mars 2012).

Ce climat plus agressif caractérisé par une alternance accrue de périodes sèches et humides devrait accroître la sensibilité des sols à l'érosion éolienne et hydrique par manque de couvert végétal et manque de matière organique des sols.

De même, un climat plus chaud aura de grandes conséquences sur la distribution de la végétation et de l'agriculture sur Terre (M.L. Parry, 1990).

Les mauvaises récoltes et les déséquilibres hydriques qui s'ensuivent sont à l'origine de l'instabilité régnant dans de nombreuses régions rurales. Malgré un grand effort collectif au niveau scientifique et politique visant à s'attaquer au problème de la sécheresse, nombre de questions restent encore sans réponse. Un nouveau rapport des Nations Unies attire l'attention sur l'augmentation inquiétante des pertes humaines et économiques dues à la sécheresse.

Les systèmes de santé sont vulnérables aux phénomènes climatiques extrêmes. En effet, le changement climatique pourrait avoir des répercussions sur ces systèmes en créant une demande de services de santé au-delà de leurs capacités. Il pourrait également affecter leur capacité à répondre à la demande en réduisant les infrastructures et les technologies (destruction partielle ou totale lors d'inondations) ou en réduisant la disponibilité du personnel. Cet élément est lié à la préparation et à la réaction aux situations d'urgence.

I.5. Effets du changement climatique sur la santé

Le réchauffement climatique est déjà en cours selon les experts du GIEC, et son impact sur la santé est une des nouvelles priorités du conseil exécutif de l'OMS. Une résolution spécifique a ainsi été adoptée en janvier 2008.

Ce sont surtout les dérèglements météorologiques majeurs récents (canicules et cyclones) qui sont les événements les plus marquants du changement climatique pour les médias. Chacun des aléas climatiques a, ou aura, un potentiel d'effets négatifs sur la santé comme l'indiquent les CDC² (Prévention, organisme fédéral américain). Cependant, ses effets sur la santé seront à la fois très hétérogènes selon les régions et les phénomènes climatiques, mais aussi complexes à identifier car intervenant à des niveaux d'échelles de temps et d'espace variés. Le changement climatique peut être une source de dangers du fait d'une modification des

²Centers for Disease Control

CHAPITRE I : L'EVOLUTION DU CLIMAT ET SES CONSEQUENCES

milieux directement (eau, air, sol) ou indirectement par inondations et/ou pollutions (sols, sédiments).

Ceux-ci pourront être une source de dégradation potentielle plus ou moins forte de la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine et aux loisirs, des aliments, de la qualité de l'air (ozone, particules en suspension,...), des conditions de vie (température, pluviométrie, ultraviolets,...) et de la qualité de l'habitat.

La sélection des lieux à construire en fonction de leur vulnérabilité aux risques d'inondations et de crues, ainsi que l'importance de la densification des villes, source d'un nombre accru de populations exposées à un même aléa (îlots de chaleur, débordements de réseaux d'eaux usées,...) deviendront des paramètres obligatoires à considérer dans le génie civil et urbain du XXIème siècle et la planification du territoire national. Bien que la mondialisation de l'économie et des transports contribue fortement à la dissémination à large échelle d'espèces de vecteurs et d'agents infectieux, le changement climatique interviendra aussi en engendrant des conditions environnementales favorables à leur installation et à leur développement.

Des effets conjoncturels, comme le vieillissement de la population, la montée de la précarité et l'affaiblissement de l'économie risquent d'altérer la santé de la population en s'ajoutant aux effets du changement climatique.

D'autres effets collatéraux, comme une plus ou moins grande offre de soins locale, selon les régions sur le territoire national, pourront constituer soit un facteur favorable soit un facteur défavorable au suivi des pathologies associées à certains aléas climatiques.

On peut citer par exemple le besoin d'ophtalmologistes pour la cataracte associée à une plus longue exposition aux rayons ultra-violets, et de psychologues et psychiatres pour les états de stress post aléas exceptionnels (inondations). Par ailleurs, les établissements de santé et médico-sociaux seront exposés eux aussi aux aléas climatiques extrêmes (inondations, tempêtes) provoquant dans certains cas le déplacement de personnes (ex : personnes âgées en maison de retraite).

Les effets du changement climatique sur la santé dépendent de multiples facteurs de risque, interagissant le plus souvent entre eux dans des enchaînements de cause à effet, rendant donc complexes leur analyse et leur prévision.

I.5.1. Effets directs et indirects du changement climatique sur la santé

Le changement climatique aura des incidences sur la santé humaine, à la fois directes – liées aux effets physiologiques de la chaleur et du froid – et indirectes – découlant par exemple de la modification des comportements humains (migration forcée, allongement du temps passé à l'extérieur, etc.), de la transmission accrue de maladies d'origine alimentaire ou vectorielles ou d'autres conséquences du changement climatique comme les inondations.

Les changements climatiques de ces dernières décennies ont probablement déjà influé sur certains effets sur la santé. En effet, d'après le Rapport sur la santé dans le monde 2002 de l'Organisation mondiale de la Santé, « on estime qu'en l'an 2000, le changement climatique était déjà responsable de 2,4% environ des cas de diarrhée dans le monde et de 6% des cas de paludisme dans certains pays à revenu intermédiaire ». (OMS, Rapport sur la santé dans le monde 2002).

Une augmentation de certaines de ces incidences a déjà été observée en Europe au cours des dernières décennies [par exemple, on estime que les vagues de chaleur de l'été 2003 ont à elles seules provoqué plus de 70 000 décès supplémentaires]. (Robine JM et al, 2008)

Les pathologies les plus susceptibles d'augmenter la mortalité en cas de réchauffement du climat sont les maladies cardiovasculaires et respiratoires. Le climat peut avoir des impacts variés sur l'appareil respiratoire, dans la mesure où interviennent à la fois les saisons, certaines situations météorologiques particulières (orages, passage de fronts) et la combinaison de l'action du temps qu'il fait avec celle d'autres facteurs environnementaux (qualité de l'air, notamment) ou topographiques.

On note une recrudescence estivale des crises d'asthme du fait de l'accroissement difficilement évitable de la teneur de l'air en oxydes d'azote, en ozone et en autres polluants photochimiques qui génèrent un brouillard photo-oxydant particulièrement irritant et toxique.

Tous les changements induits par le climat ne sont pas négatifs pour la santé humaine. Dans les zones tempérées, les hivers plus doux permettront de réduire le nombre de décès dus au froid. Moins de mesures seront nécessaires pour maintenir des températures intérieures agréables, ce qui conduira à une amélioration de l'environnement intérieur. Les personnes travaillant à l'extérieur souffriront moins du froid pendant la période hivernale, ce qui augmentera leur productivité. L'allongement de la période de végétation, combiné au renforcement des précipitations, sera favorable à l'agriculture et à la production agricole en général.

La santé animale est également concernée par le changement du climat. La fièvre catarrhale ovine, essentiellement localisée dans les zones subtropicales du fait de la biologie de son vecteur a fait son apparition ces dernières années dans les pays du Sud de l'Europe (Grèce, Italie, Espagne mais également en Corse) et récemment dans le Nord de l'Europe (Allemagne, Belgique, Pays-Bas et France continentale) pour atteindre le Nord du Maghreb et plus spécifiquement notre pays.

I.5.2. Changements sanitaires liés au changement climatique

Dans le cas de la santé humaine, les changements climatiques affectent vraisemblablement la distribution et la prévalence des vecteurs de maladies tel le paludisme, la méningite, et certaines variantes des leishmanioses « clou de Biskra ». La schistosomiase (autre nom de la Bilharziose) « El Oued et Khemis El Khechna », l'onchocercose (parasitose causée par une filaire qui infeste l'œil).

De nombreuses maladies infectieuses se transmettent à travers une chaîne complexe « d'hôtes » et de « vecteurs », faisant intervenir des arthropodes, des animaux et l'homme, et cette transmission peut être modifiée par un changement climatique. Ainsi, par exemple, la maladie du Nil occidental est-elle provoquée par un virus provenant des oiseaux, transmissible vers les mammifères (hommes et chevaux) par l'intermédiaire de moustiques.

Pour ce qui est de la santé humaine, les premiers changements que l'on perçoit sont les altérations de l'étendue géographique (latitude et altitude) et saisonnière de certaines maladies infectieuses – y compris les infections vectorielles comme le paludisme et la dengue et les infections d'origine alimentaire (comme la salmonellose) qui sévissent particulièrement pendant les mois les plus chauds.

Une augmentation des températures moyennes associée à une plus grande variabilité climatique altérerait la fréquence des expositions aux extrêmes thermiques et les effets sur la santé qui s'ensuivent aussi bien en hiver qu'en été.

Le paludisme, avec 1,5 à 3 millions de décès par an, en majorité de jeunes enfants sur le continent africain, constitue toujours l'une des premières causes de mortalité à la surface du globe. Or c'est l'une de celles que l'on prétend, et à juste titre, les plus sensibles aux conditions thermo-hygrométriques, c'est-à-dire au changement des températures et du régime des précipitations. Elle est due à un parasite du genre Plasmodium, transporté dans la salive du moustique anophèle femelle.

Les anophèles prolifèrent en ambiance chaude et humide. Ils se reproduisent à proximité de l'eau, notamment dans les zones marécageuses et les mares. Le temps nécessaire au

développement du parasite dans le corps du vecteur dépend notamment de la température et de l'humidité ambiante : à 20°C le développement de Plasmodium Falciparum -le paludisme qui tue- requiert 30 jours, alors qu'à 28°C il n'en réclame plus que 8 à 14.

Dans son édition du 19 février 2013, le « Quotidien d'Oran » signale la menace du paludisme dans la wilaya de Ghardaïa en ce début d'année où trois cas infectés ont été recensés par le laboratoire de l'hôpital, en rappelant que cette maladie infectieuse a touché 39 personnes (toutes des sub-africains) durant l'année 2012.

Dans ces conditions, on conçoit que le réchauffement puisse augmenter le niveau de transmission en un lieu donné et permettre la transmission dans des régions où elle était auparavant entravée par un niveau thermique trop bas.

I.6. Effets du changement climatique sur l'agriculture et la sécurité alimentaire

Les changements climatiques risquent de pénaliser les ressources agricoles et la sécurité alimentaire par les effets de remontée du niveau de la mer, entraînant la disparition de zones côtières cultivables ou par l'accentuation des événements extrêmes (Sécheresses, inondations).

Dès lors que la communauté scientifique a pris conscience de l'imminence des changements climatiques à venir, le secteur agricole s'est vu attribuer une attention particulière. En fait, le secteur agricole occupe une place cruciale dans la survie quotidienne de millions de gens et sa grande sensibilité aux fluctuations du climat a engendré énormément d'inquiétudes quant à la capacité de l'agriculture mondiale à satisfaire les besoins en nourriture de toute la planète suite aux changements climatiques. C'est pourquoi la problématique de l'agriculture est celle qui a retenu le plus d'attention jusqu'à aujourd'hui.

La sensibilité de l'agriculture face au climat prend naissance dans un ensemble de facteurs physiologiques, climatiques, géologiques et biologiques interdépendants qui s'entremêlent au courant d'une saison de culture pour aboutir, à la fin de celle-ci, en un rendement déterminé pour les différents plants et les différentes cultures. Ainsi, des facteurs fondamentaux comme la longueur de la saison de culture (saison sans gel), le timing du gel, l'accumulation de chaleur (température), le niveau de précipitations, l'évapotranspiration, les heures d'ensoleillement, l'humidité disponible, ainsi que la concentration de dioxyde de carbone, agissent directement sur le rendement d'une culture. Viennent s'ajouter à cela des facteurs indirects comme une augmentation potentielle des infestations d'insectes et des pathogènes, une modification des caractéristiques de sols et/ou un changement dans les besoins d'eau pour l'irrigation.

Le réchauffement climatique et les phénomènes météorologiques qui lui sont associés auront donc certainement des conséquences pour l'agriculture, à toutes les latitudes. Les résultats de recherche suggèrent des effets antagonistes et fortement différenciés selon la production et l'espace géographique considérés. A l'horizon 2100, l'évolution resterait favorable pour les régions européennes et américaines septentrionales, au détriment des régions méridionales, tandis que la zone tropicale serait la plus sévèrement affectée par le changement global.

Les impacts concernent non seulement l'agriculture mais également l'agrofourmiture et les industries d'aval.

Le changement climatique n'affectera pas seulement la moyenne des températures à la surface de la planète, mais jouera aussi sur l'écart des températures saisonnières (amplitude thermique), les événements climatiques extrêmes et les ressources en eau. Ces modifications auront des impacts sur la quantité et la qualité des productions agricoles et sur l'environnement (sols, eau, biodiversité...) et amplifieront les zones d'action de certains ravageurs.

I.6.1. Impacts sur le milieu

Les changements climatiques auront des effets directs et/ou indirects variables selon le type de cultures végétales. Globalement, la modification du climat aura un impact sur:

- Le régime saisonnier des précipitations, influençant l'humidité des sols et la disponibilité en eau.
- L'augmentation de la température moyenne qui se traduira par un raccourcissement des cycles de végétation et affectera la production (vitesses de développement plus rapides et croissance diminuée).
- L'augmentation de la fréquence des températures élevées sera néfaste pour les productions.
- L'expansion des insectes et maladies des végétaux aggravant le risque de pertes de récolte.

Par contre, l'augmentation de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère devrait stimuler la photosynthèse de certains végétaux et donc la production primaire nette. Cependant des études menées par l'INRA ont montré qu'un doublement du taux de CO₂ affectait différemment les grandes cultures (blé, maïs) selon les lieux de production : variation des rendements moyens entre +10% et -15%.

L'ozone peut également être un facteur limitant car à concentration élevée, la photosynthèse des végétaux peut être ralentie, ce qui réduirait considérablement les rendements.

Dans les régions tempérées l'augmentation des températures sera défavorable à la croissance des végétaux et à l'absorption du CO₂.

De manière générale, les effets positifs des changements climatiques pourraient se traduire par un allongement des saisons de croissance, une diminution de la mortalité hivernale naturelle et des taux de croissance plus rapides aux latitudes élevées. Parmi les effets négatifs, il pourrait y avoir une perturbation des schémas de reproduction établis, des itinéraires de migration et des relations entre les écosystèmes.

Le secteur de l'élevage pourrait aussi être affecté via les interrelations qu'il entretient avec d'autres secteurs comme le secteur céréalier, car ce dernier pourrait également être affecté.

I.6.2. Impacts sur le fonctionnement des cultures

Avant d'en venir à l'impact du réchauffement climatique proprement dit, il est nécessaire de prendre en compte un effet spécifique aux couverts végétaux qui concerne la stimulation de la photosynthèse par l'augmentation du gaz carbonique (ou dioxyde de carbone) atmosphérique CO₂. Avec l'hypothèse d'un doublement du CO₂ pour la fin de ce siècle, les travaux permettent de prévoir 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% (en prenant en compte l'augmentation de la respiration liée à l'effet de l'augmentation de la température) (Figure 4). 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. Par exemple, alors que les plantes en C₃ comme le riz, blé, betterave, pois, etc. majoritaires dans les zones tempérées, répondent fortement à une augmentation de la teneur en carbone atmosphérique dans la gamme de concentrations considérée, la réponse des plantes en C₄¹³ comme le maïs, le

¹Les plantes sont dites en C₃ ou C₄ selon que la première réaction de la chaîne de photosynthèse, très différente entre les 2 catégories de plantes, conduit à un composé à 3 ou 4 atomes de carbone. Les plantes en C₄, moins fréquentes, sont généralement mieux adaptées aux conditions chaudes.

sorgho, ou la canne à sucre par exemple à un enrichissement de l'atmosphère est très faible au-delà de 400 ppm, proche de la teneur actuelle de l'atmosphère.

Cet effet sur la photosynthèse sera combiné à l'effet propre du réchauffement climatique sur la température en premier lieu, mais également sur les autres facteurs, en particulier la pluie. Bien que la réponse physiologique des plantes à un enrichissement de l'atmosphère en gaz carbonique et à une augmentation concomitante de la température entraîne en théorie une production plus importante de biomasse, les effets sur le rendement des espèces cultivées, à l'échelle du peuplement, risquent d'être beaucoup plus contrastés.

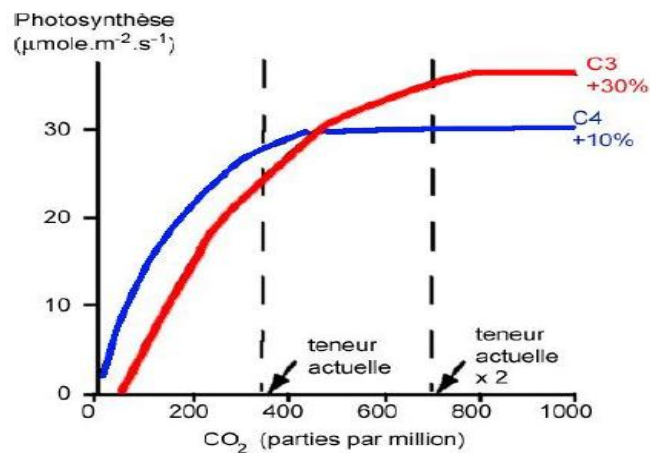


Figure 4. Influence de la concentration en CO₂ sur la photosynthèse de plantes en C₃ et en C₄

Cela est particulièrement vrai pour le sud, où l'optimum thermique pour la photosynthèse est souvent déjà atteint, sinon dépassé dans certaines conditions. Dans les conditions tempérées, l'augmentation de température peut favoriser la plupart des processus physiologiques. Mais elle aura également un impact négatif pour les plantes à cycle déterminé, comme les cultures annuelles, en accélérant leur rythme de développement et donc en raccourcissant les cycles de culture et, par suite, la durée de fonctionnement de l'usine photosynthétique. A l'inverse, pour les végétations à cycle non déterminé comme les prairies ou la forêt, l'avancée des stades de développement au printemps s'accompagne d'un retard dans l'arrêt physiologique à l'automne, et la durée de la saison de végétation devrait s'en trouver augmentée. Au bout du compte, le bilan résultant en la production de biomasse, et au-delà, le rendement peut prendre des aspects variés.

I.6.3. Impacts sur la production agricole

Ils 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 (Rosenzweig et Hillel 1998, Reddy et Hodges 2000).

Elle a été clairement confirmée par celle du 4ème rapport de 2007, dont nous reproduisons ci-dessous les principales conclusions contenues dans le 'Résumé à l'intention des décideurs du Groupe de travail II (GIEC 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 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 à 2° C), ce qui augmenterait les risques de famine. Globalement, le potentiel de production alimentaire devrait croître avec l'augmentation de température moyenne locale pour une gamme de 1 à 3°C, mais au-dessus de ces valeurs, il devra diminuer.»

En milieu tropical, l'absence d'effet réellement positif est liée à la prépondérance des plantes en C4 et à l'impact négatif de l'élévation des températures (raccourcissement du cycle et basculement du fonctionnement photosynthétique vers des gammes thermiques défavorables). La grande variabilité des résultats semble d'avantage provenir des scénarios climatiques que des modèles de culture : transition ou à l'équilibre (550 ou 750 ppm¹ [CO₂]), variabilité climatique actuelle du même ordre de grandeur que la perturbation prévue, prise en compte ou non de la dissymétrie de réchauffement entre températures minimale et maximale, résolution spatiale du modèle climatique, prise en compte ou non des effets cumulatifs d'une année sur l'autre pour les scénarios de transition.

I.7. Adaptation de l'agriculture aux changements climatiques

On peut limiter les effets négatifs des changements climatiques en s'adaptant, au niveau local, aux nouvelles conditions de culture. Pour cela, il est possible d'opter pour des variétés appropriées aux nouvelles conditions pédoclimatiques, de modifier les modes de culture,

CHAPITRE I : L'EVOLUTION DU CLIMAT ET SES CONSEQUENCES

d'introduire de meilleurs systèmes de gestion de l'eau, d'adapter les calendriers des semis et les méthodes de labour et de planifier plus justement l'utilisation des sols.

On distingue, selon Rosenzweig et Parry, 1994, deux types d'adaptation possible : celles que l'agriculteur peut mettre en œuvre lui-même (niveau 1) et celles qui nécessitent des investissements dans les infrastructures de recherche, de développement, d'aménagement (niveau 2), qui ne seraient facilement accessibles qu'aux pays développés.

Parmi les adaptations possibles au niveau 1, l'agriculteur peut modifier les dates de semis pour les cultures annuelles. Des semis plus précoces peuvent en effet permettre à des cultures d'hiver d'échapper à des périodes estivales dangereuses et à des cultures de printemps d'allonger leur cycle végétatif.

C'est dans ce cadre que nous préconiserons une méthode pouvant aider l'agriculteur à fixer une date de semis à même de limiter les incidences néfastes de la sécheresse grâce à l'itinéraire biologique qu'elle aura prédéfini.

Quant aux adaptations de niveau 2, elles comprennent entre autres la sélection variétale, (de géotypes adaptés en termes de longueur de cycle ou d'efficacité photosynthétique).

Cependant, ces adaptations de niveau supérieur ne sont pas à la portée immédiate du monde agricole et leur aboutissement nécessite des efforts soutenus de recherche et par suite d'importants moyens financiers.

Il est également possible de s'adapter en déplaçant géographiquement les zones de production. Le réchauffement observé équivaut, sur le siècle, à un déplacement vers le nord de l'ordre de 180 km ou en altitude de l'ordre de 150 mètres.

Les effets étant très différents d'une région à une autre, certains pays pourraient connaître une diminution de leur production même s'ils prennent les mesures d'adaptation aux changements climatiques nécessaires.

Le secteur agricole consomme une quantité très importante en ressources hydriques mobilisé qui sont de l'ordre de 65% selon le centre d'étude de la gestion de l'eau et ne contribue qu'avec une PIB de 15%. Vue l'importance du poids des ressources en eau destiné au secteur agricole ce dernier peut constituer un véritable handicap pour le développement des autres secteurs comme l'industrie et le tourisme. Le changement climatique doit ainsi jouer un rôle d'accélérateur d'une dynamique en cours de marginalisation de l'agriculture, et l'adaptation

CHAPITRE I : L'EVOLUTION DU CLIMAT ET SES CONSEQUENCES

se traduit par une mobilisation croissante des ressources en eau par l'intensification de l'irrigation, susceptible d'aggraver les conflits et la compétition sur les usages sectoriels de l'eau.

Une autre stratégie consisterait à prendre acte de l'inadaptabilité croissante de l'agriculture à l'environnement bioclimatique et du coût pour les autres secteurs, d'une fuite en avant que constituerait une tentative d'intensification des usages agricoles de l'eau pour pallier l'accélération des difficultés.

Dans ce contexte, l'adaptation à la rareté croissante pourrait viser à favoriser des cultures moins exigeantes en ressources hydriques comme l'agriculture d'exportation ou l'agriculture tropicale dont le climat sera favorable suite au changement climatique, et le retrait de certaines cultures de l'agriculture algérienne comme les céréales qui exigent de grandes ressources hydriques.

Les céréales sont le produit de base du modèle de consommation et notre pays déjà dépendant de 80% du commerce international (importation de céréales) et compte l'augmenter dans les années à venir sous l'influence de la fluctuation climatique.

Le ministère de l'agriculture avance une dégradation de 10% de la couverture en céréale sous l'influence de cette perturbation climatique. Pour réduire la vulnérabilité de l'économie aux variations du climat et maximiser l'efficacité des usages de la ressource, le commerce international des produits agricoles se profile comme une stratégie d'allègement de la contrainte hydrique, alternative aux tentatives d'intensification de l'irrigation.

L'importation de produits intensifs en eau permet d'importer de «l'eau virtuelle», définie comme les volumes nécessaires à la production des biens importés et ainsi incorporés dans les échanges internationaux. Dans son analyse, ce concept décrit les opportunités du recours au commerce international pour satisfaire les besoins alimentaires des pays limités par les disponibilités hydriques.

La définition de stratégies d'importation d'eau virtuelle permettrait aussi de préserver la ressource pour des usages plus productifs, que ce soit à l'intérieur du secteur agricole, en déplaçant les usages de l'eau de la production céréalière vers des cultures d'exportation à haute valeur ajoutée. Il faut que l'Algérie oriente ces stratégies vers les cultures moins exigeantes en eau à avantage comparatif important et oriente cette eau vers des secteurs comme le tourisme qui peut dégager une forte valeur ajoutée et agit positivement sur le

chômage des jeunes ou en favorisant plus généralement l'industrie et le tourisme au détriment de l'agriculture.

Le commerce d'eau virtuelle ou le recours à l'importation des cultures exigeantes en eau apparaît donc comme une source alternative d'eau, dont l'utilisation stratégique pourrait devenir un outil attractif pour améliorer largement la sécurité hydrique et l'efficacité dans l'utilisation de l'eau en Algérie face au changement climatique.

Si l'Algérie opterait-elle pour cette stratégie, nécessitant un programme et un investissement très complexe entre le soutien de l'agriculture dans le court terme et le retrait progressif de certaines cultures agricoles et l'orientation vers d'autres à long terme.

Conclusion

Les résultats de travaux de recherche exposés dans ce chapitre et les faits marquants de ces dernières années confirment l'aspect changeant et la tendance évolutive du climat aussi bien à l'échelle planétaire, régionale que territoriale.

En Algérie, cette évolution se traduit par un changement du climat visible à travers des phénomènes extrêmes exceptionnels tels que les inondations (Bab El Oued en novembre 2001, Ghardaïa en octobre 2008, El Tarf en février 2012), ou des sécheresses observées principalement en région Ouest.

Les effets conjugués des excédents pluviométriques et d'une hausse des températures créent, à l'occasion, des conditions climatiques favorables à la multiplication d'insectes-vecteurs, et l'émergence de maladies jusqu'alors inexistantes telles que le paludisme ou la Blue Tongue dont la prévalence augmente avec les fortes précipitations.

Les sécheresses, quant à elles, en influant sur le régime hydrique des cultures, modifient leur cycle végétatif par raccourcissement des principales phases phénologiques.

Ces perturbations biologiques empêchent le développement optimal de la plante et s'accompagnent le plus souvent d'une réduction appréciable des rendements.

Ainsi, ces deux phénomènes exceptionnels aux fâcheuses conséquences sur la santé et l'agriculture doivent faire l'objet d'une attention particulière de la part des scientifiques pour en limiter les effets.

Introduction

Comme mentionné dans le chapitre des généralités, l'évolution ou la variation brusque des éléments du climat induisent inéluctablement des variations de paramètres bioclimatiques favorisant l'occurrence de maladies ou l'émergence de pathologies nouvelles. Le changement climatique perturbe un grand nombre de paramètres des systèmes naturels terrestres, occasionnant un ensemble de risques pour la santé humaine. Ainsi, la modification simultanée de la composition et des circulations atmosphériques pourra modifier la fréquence et l'intensité d'épisodes aigus de pollution atmosphérique. Par ailleurs, le changement climatique provoquera une modification de la fréquence et de la nature des événements extrêmes comme les vagues de chaleur, avec un effet direct sur la santé. En outre, il risque de modifier l'écologie des vecteurs de maladies. C'est notamment le cas de la fièvre catarrhale ovine (FCO), maladie à transmission vectorielle qui se propage par l'intermédiaire d'un insecte dont l'activité, la prolifération ou la virulence sont tour à tour influencés par les paramètres climatiques. Cet exemple montre la nécessité d'une collaboration entre chercheurs des domaines de la santé, du climat et de l'environnement, afin d'étudier les conséquences du changement climatique sur la santé.

II.1. Définition et généralités

La fièvre catarrhale ovine (ou Blue Tongue) est une maladie « exotique » propre aux pays à climat chaud. Sa transmission se fait par l'intermédiaire d'insectes infectés du genre Culicoides, dont l'activité croît aux températures supérieures à 18 °C.

C'est une maladie importante touchant principalement les ruminants. Chez les ovins, cette pathologie est classée dans la liste A de l'OIE (Organisation Internationale de Epizooties) ; l'espèce bovine, quant à elle, développe une forte résistance à la maladie. Les bovins sont considérés de très bon réservoirs de la maladie vu que les signes cliniques et les lésions chez les bovins sont rares (Hourrigan & Klingsporn, 1975).

II.2. Historique de la maladie

II.2.1. Situation générale

La FCO est classée sur la liste des maladies animales à déclaration obligatoire pour l'OIE. Cette maladie peut en effet causer des épizooties spectaculaires comme à Chypre en 1943 (Gambles, 1949) ou dans la péninsule ibérique en 1956 (Roberts, 1990).

CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

Plusieurs raisons expliquent les lourdes conséquences économiques sur la filière ovine de cette maladie.

La forte mortalité observée lors des épizooties touchant des populations ovines naïves, la forte dévalorisation des animaux survivants sont autant de pertes directes pour la filière. De plus, dans les zones d'endémie, les programmes de vaccination mis en place ont un coût financier récurrent non négligeable. Cependant, les coûts les plus importants reviennent aux pays infectés qui veulent exporter des animaux vivants et certains produits animaux. Des restrictions commerciales sont alors infligées et des tests de diagnostic doivent être réalisés pour attester le statut des animaux déplacés.

Alors que sa répartition habituelle se trouve entre les latitudes 40°N et 35°S soit dans les régions tropicales et subtropicales du globe, des incursions épisodiques au-delà de la zone de répartition habituelle des insectes vecteurs de la FCO ont déjà été identifiées dans le passé. Cependant, celles-ci sont restées limitées à la fois dans le temps et dans l'espace.

Ainsi, les épizooties répétées auxquelles doivent faire face plusieurs pays du Maghreb et de l'Europe depuis 1999 soulèvent de façon récurrente la question de la situation épidémiologique du Maghreb vis-à-vis de la FCO : incursions épisodiques ou endémisation.

II.2.2. Situation et évolution de la FCO

Selon la définition des maladies émergentes de l'OIE et celle présentée ci-dessus, on peut dire que la fièvre catarrhale du mouton est due à un virus émergent dans le bassin méditerranéen. Pas seulement parce qu'il est apparu dans des régions qui n'avaient encore jamais rapporté sa présence (Algérie, Corse, Bulgarie, Tunisie, Sardaigne, Sicile, Calabre, Macédoine, Yougoslavie et Croatie) mais aussi parce que les sérotypes qui ont été identifiés (sérotypes 2, 4 et 9) dans les foyers étaient considérés comme inactifs.

La réapparition de la FCO au Nord de l'aire de répartition habituelle de ses vecteurs a commencé en 1997 quand la FCO a été rapportée à Chypre. Puis, en Décembre 1998, le virus est apparu en Grèce pour la première fois depuis une décennie (dernier foyer en 1989). A partir de juin 1999, il a été mis successivement en évidence en Bulgarie et Tunisie et en juillet 1999, il a été identifié en Turquie pour la première fois depuis 20 ans.

De plus, en août 1999, la Grèce a de nouveau fait l'expérience d'une épizootie de FCO qui a persisté jusqu'en décembre. Trois sérotypes ont alors été impliqués, le 9, le 4 et un autre qui s'avérera être le n° 16 (Figures 5 et 7).

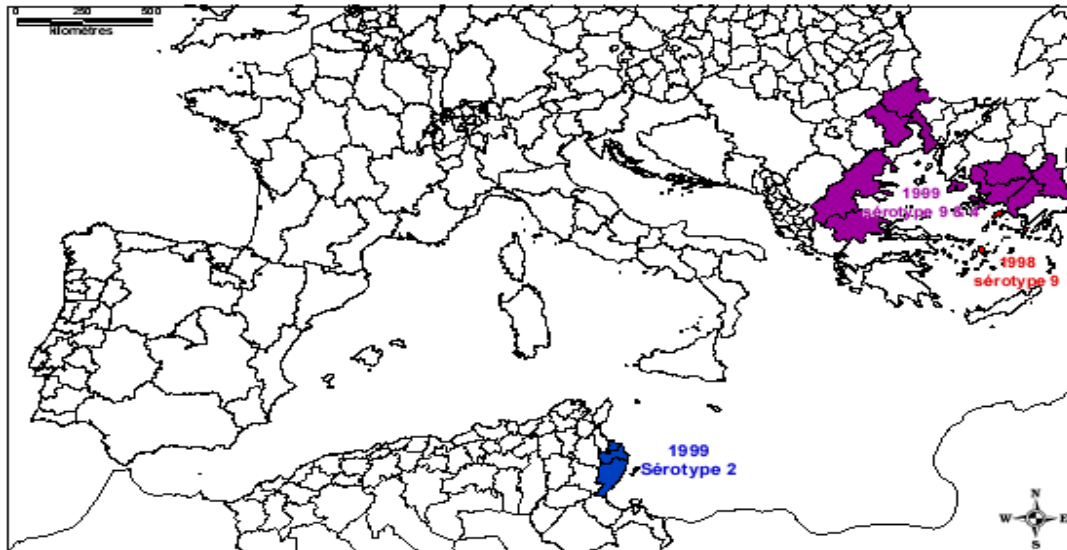


Figure 5. Situation de la fièvre catarrhale du mouton (sérotypes 2 et 9) dans le bassin méditerranéen en 1998 et 1999.

Ces foyers primaires sont probablement à l'origine de la progression du BTV (Blue Tongue Virus) dans l'ouest de l'Europe. La maladie due au sérotype 2 a ainsi été déclarée en Algérie en Juillet et début Septembre 2000, elle faisait son apparition pour la première fois dans les îles italiennes de Sardaigne (OIE, 2000d) et de Sicile et dans la région de Calabre en Italie continentale. Fin Septembre, les premiers cas cliniques étaient observés sur les îles Baléares (Majorque et Minorque) (OIE, 2000a) et finalement en Corse du Sud le 17 octobre 2000 (OIE, 2000c). Début décembre, de nouveaux foyers se sont produits en Espagne à Majorque et Minorque. Cette même année, des cas ont été de nouveau déclarés en Turquie (Août 2000). (Figure 6).

CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

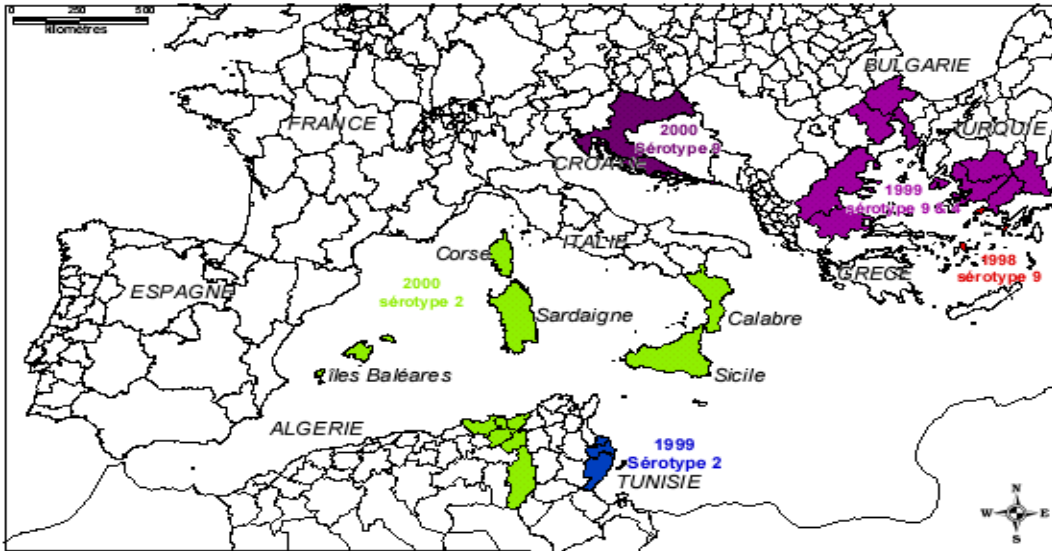


Figure 6. Situation de la fièvre catarrhale du mouton (sérotypes 2, 4 et 9) dans le bassin Méditerranéen de 1998 à 2000.

Le 17 septembre, la Grèce déclarait ses premiers cas sur le continent et estimait que le début de la circulation virale datait de début août. Le 19 septembre, la Bulgarie rapportait des cas dans la partie ouest du pays. Des cas au Kosovo ont été détectés à la mi-October et en Yougoslavie en Novembre. Début décembre, des suspicions cliniques ont été diagnostiqués en Croatie. Ainsi, l'épicentre le plus à l'Est de la maladie évoluait vers le Nord (figure3).

De la même façon, la FCO progressait depuis la pointe de la botte italienne à la Toscane ce qui eut dès mars 2002 un impact important sur les filières animales de ce pays.

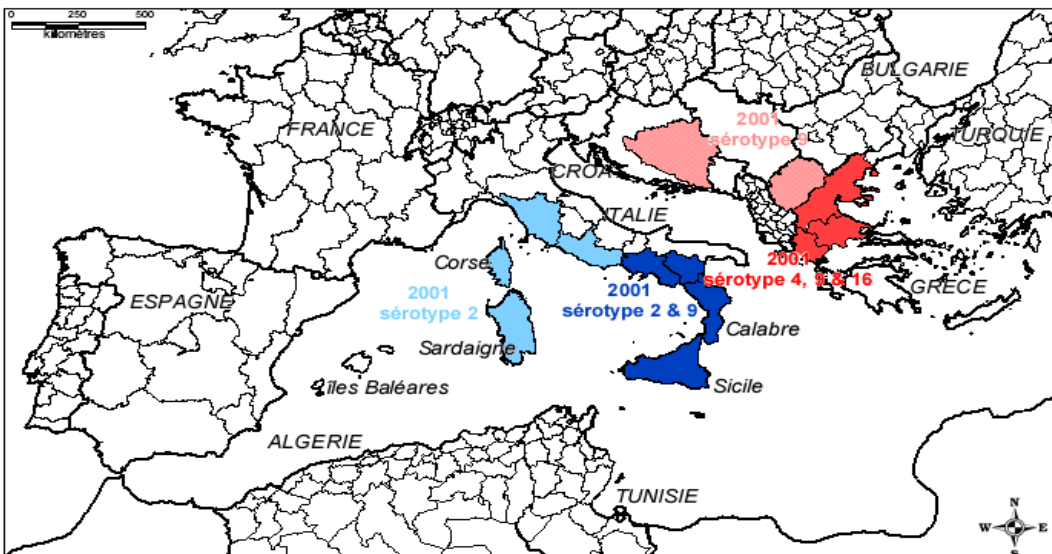


Figure 7. Situation de fièvre catarrhale du mouton (sérotypes 2, 4, 9, 16) dans le bassin méditerranéen en 2001.

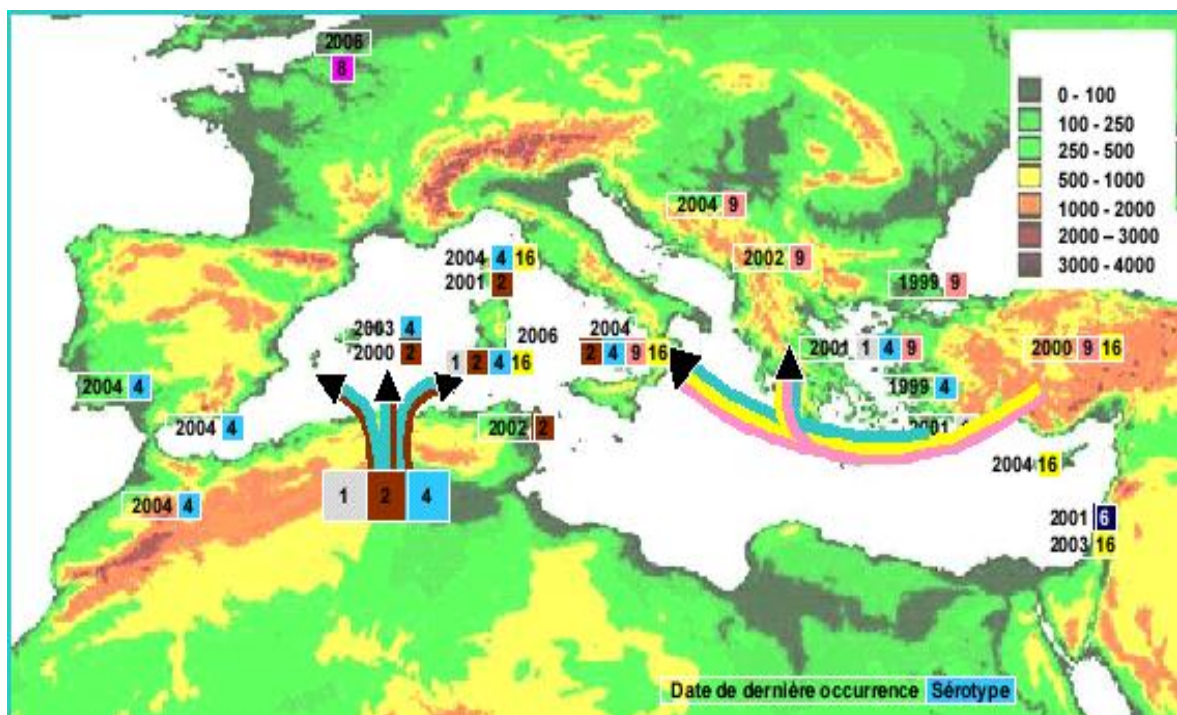
CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

Après un vaste programme de vaccination contre le sérotype 2 en Corse, en Italie et aux îles Baléares, l'Europe occidentale n'a déploré aucun cas clinique de FCO en 2002. Les foyers épizootiques ont fait leur réapparition en 2003 avec l'incursion du sérotype 4 en Sardaigne puis aux îles Baléares et en Corse du Sud.

L'épizootie de 2004 dans l'ouest méditerranéen a débuté en septembre au Maroc avec la détection de cas cliniques de FCO dû au sérotype 4. Elle a progressé ensuite au sud de l'Espagne et au Portugal.

La circulation virale de sérotype du BTV a été encore mise en évidence en 2005 et en 2006 dans des pays du sud de l'Europe (Italie, Corse, Espagne etc.) en l'absence de signes cliniques.

On assiste donc bien à une progression de la maladie vers le Nord, la FCO est apparue au cours du mois d'août 2006 en Hollande. A partir de ce foyer primaire, la maladie s'est rapidement étendue aux Pays-Bas, en Belgique et en Allemagne. Par la suite, quelques cas ont été détectés dans le nord-est de la France (dans les départements du Nord). On assiste aussi à une progression de la maladie vers le nord (figure 8).



II.3. Caractérisation de la maladie

La fièvre catarrhale du mouton est une maladie infectieuse virale, non contagieuse, transmise par des insectes diptères du genre *Culicoïdes*. Elle affecte cliniquement les ovins et, très rarement, les caprins et les bovins.

Les infections inapparentes sont, en revanche, fréquentes chez de nombreuses espèces de ruminants domestiques ou sauvages (Delécolle & Schaffner, 2003).

Après avoir présenté les éléments de la FCO en tant que maladie, nous détaillerons les composantes du cycle de transmission en nous attachant plus particulièrement sur son vecteur biologique principal en Afrique : le *Culicoïde imicola*.

II.3.1. Répartition géographique

La fièvre catarrhale du mouton a été décrite pour la première fois en Afrique du Sud (Hutcheon, 1880). Les aires d'endémie pour la FCO sont largement définies par des facteurs climatiques appropriés limités principalement aux régions tropicales et sub-tropicales (Verwoerd & Erasmus, 1994), c'est-à-dire environ entre les latitudes 35°S-40°N. En marge de cette zone d'endémie, la maladie évolue soit sous forme épidémique (Afrique sub-saharienne ou Amérique du Nord), soit sous forme d'incursions périodiques (Maghreb ou péninsule ibérique par exemple) (Gibbs & Greiner, 1994; Delécolle & Schaffner, 2003).

La distribution de l'infection se superpose ainsi à la répartition spatiale et temporelle de ses vecteurs du genre *Culicoïdes* (Figure 9).

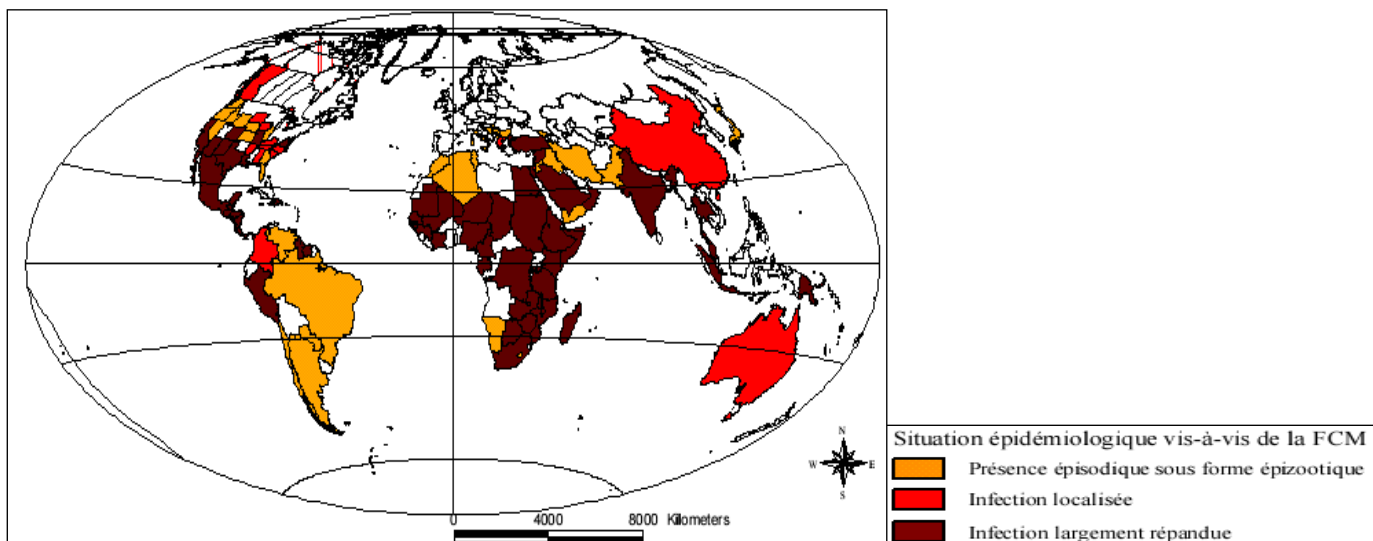


Figure 9. Répartition mondiale de la fièvre catarrhale du mouton en 2004.

II.3.2. Le tableau clinique

L'incidence des signes cliniques de l'infection est très variable et est influencée par de nombreux facteurs comme la localisation géographique, l'espèce et la race, le climat, l'historique vaccinal des animaux (Gibbs & Greiner, 1994) et le sérotype viral impliqué (Delécolle & Schaffner, 2003).

L'extrême variabilité des manifestations cliniques qui s'observe non seulement entre les différentes espèces de ruminants mais également entre les différentes races de moutons est une des caractéristiques de cette maladie. Elle peut évoluer sous forme suraiguë, aiguë ou chronique et le tableau clinique est difficilement reproductible en conditions de laboratoire du fait notamment de l'influence des conditions environnementales sur le développement des symptômes (rayons UV, exposition au soleil) (Erasmus, 1990; Verwoerd & Erasmus, 1994).

Le premier signe clinique est une forte élévation de la température (jusqu'à 42°C). Cette hyperthermie qui peut durer 4 à 8 jours est associée à de l'anorexie et de l'abattement. 24 à 48 heures après cette phase fébrile, des phénomènes congestifs, œdémateux et hémorragiques apparaissent. Une congestion des muqueuses buccales et nasales se développe en premier. Elle peut rapidement être accompagnée par une hyper salivation, un larmoiement et un jetage nasal important (Delécolle & Schaffner, 2003).

Un œdème de la langue et des lèvres peut s'étendre à l'ensemble de la tête (oreilles, paupières). Un œdème sous-maxillaire (« signe de l'auge ») marqué peut être également observé (Verwoerd & Erasmus, 1994). Dans les cas sévères, les lésions progressent jusqu'à l'ulcération des gencives, des lèvres, du museau et de l'ensemble de la cavité buccale : la cyanose de la langue qui a donné le nom anglais de la maladie (Blue Tongue) (figure 10).



Figure 10. Cyanose de la langue.

CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

A ce stade, l'anorexie est fréquente. D'autres symptômes peuvent accompagner ce tableau clinique en fonction de la localisation des lésions :

- (i) locomoteurs avec des difficultés de déplacement et des boiteries,
- (ii) de posture avec des torticolis, des raideurs, un dos voûté etc,
- (iii) des atteintes pulmonaires et/ou digestives.

Dans la forme aiguë, la mort survient au bout d'une semaine. Les animaux survivants n'ont plus de valeur économique. Dans les formes moins aiguës, les animaux se remettent totalement de l'infection.

L'espèce bovine, quant à elle, développe une forte résistance à la maladie. Les signes cliniques et les lésions chez les bovins sont rares (Hourrigan & Klingsporn, 1975).

Dans certains cas, des symptômes liés à une réaction d'hypersensibilité peuvent être observés (Delécolle & Schaffner, 2003). En Afrique du Sud, lors d'une année exceptionnellement humide, la FCO a été diagnostiquée sur des bovins dans différents endroits du pays (Barnard et al. 1998).

L'apparition de la maladie clinique est liée à un déséquilibre dans le système virus/hôtes/vecteurs/environnement. Ainsi, afin d'entrevoir les interrelations existantes au sein du système et de mieux comprendre les mécanismes de transmission du virus, il est nécessaire de faire le point sur les connaissances acquises sur les différents acteurs de cette maladie.

II.3.3. Source de contagion

La matière virulente est le sang.

- En phase de virémie, le virus peut également être retrouvé dans le sperme.
- Le virus n'est pas excrété, ni dans la salive, ni dans le jetage, ni dans les lésions buccales. On ne le retrouve donc pas dans le milieu extérieur.

La transmission se fait essentiellement par l'intermédiaire d'insectes du genre Culicoides qui se nourrissent préférentiellement sur les bovins. Une seule piqûre de Culicoïde infecté suffit pour qu'un animal acquière le virus. La contamination in utero chez les bovins et les ovins est également possible.

II.3.4. Les acteurs de la maladie

Comme la plupart des maladies transmises par des vecteurs, le cycle de transmission de la FCO serait complexe si on prenait en compte toutes les espèces vertébrées sensibles.

Cependant, le virus étant essentiellement pathogène pour les ovins et la transmission étant le plus souvent limitée à une seule espèce principale de Culicoides dans une zone géographique donnée, le schéma de transmission de ce virus est finalement relativement simple en comparaison aux virus West Nile et de la fièvre de la vallée du Rift. On peut distinguer deux compartiments d'évolution pour le BTV :

(1) l'insecte vecteur

(2) les hôtes vertébrés capables de multiplier le virus, ces 2 compartiments étant inclus dans un environnement donné aux caractéristiques propres. Ainsi, le système de transmission du virus Blue Tongue est influencé par 4 entités que nous allons détailler successivement : le virus, agent pathogène de la maladie, les hôtes vertébrés, l'espèce vectrice du virus et l'environnement.

II.3.4.1. L'agent pathogène

Le BTV est un virus à ARN double brin appartenant au genre Orbivirus au sein de la famille des Reoviridae (Verwoerd et al. 1972). Sa taille varie entre 60 et 80 nm. Il existe vingt-quatre sérotypes, une protection vaccinale efficace contre la FCO nécessite de connaître le sérotype responsable des cas cliniques. (Figure 11)

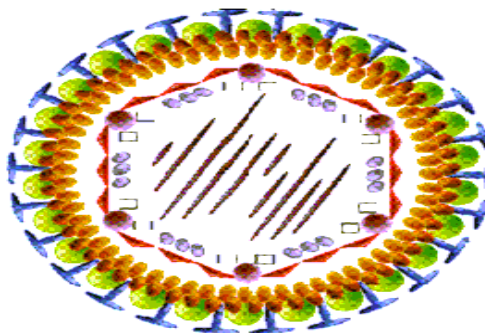


Figure 11. Virus de la fièvre catarrhale ovine.

II.3.4.2. Les espèces animales sensibles

Le virus de la FCO peut infecter toutes les espèces de ruminants, domestiques ou sauvages. Chez la plupart des animaux, la virémie est détectable 3 à 6 jours après l'infection selon la dose infectante et la localisation du point d'inoculation.

La virémie chez les moutons dure habituellement de 6 à 10 jours et persiste rarement plus de 14 jours. Chez les bovins, la virémie semble persister plus longtemps (7-28 jours). Il est connu que les bovins sont le réservoir en zone tempérée. Ils permettent au virus de passer l'hiver ("overwintering") dans les régions tempérées où l'hiver est souvent trop rigoureux pour permettre une survie du vecteur toute l'année. Au printemps, les Culicoides piquent préférentiellement les bovins et se re-contaminent puis ils piquent les ovins. (Figure 12).

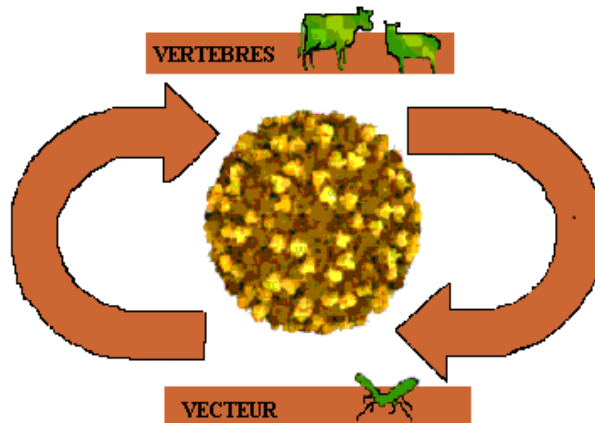


Figure 12. Schéma de maintien de l'infection en zone tempérée.

Dès le printemps, la densité des Culicoides commence à augmenter, mais ils ne se nourrissent que sur les bovins, sur lesquels ils se contaminent. Ce n'est que plus tard qu'ils commencent à piquer les ovins. Ainsi, une densité minimale de bovins est nécessaire au déroulement du cycle, et l'infection ne se maintient que dans les zones d'élevage.

II.3.4.3. Les insectes vecteurs

Le BTV est transmis presque exclusivement par la piqûre de certaines espèces de *Culicoides* : ce sont de petits diptères hématophages (1 à 4 mm) se nourrissant sur des mammifères ou des oiseaux, qui constituent les vecteurs biologiques du virus. Ce mode de transmission a été mis en évidence pour la première fois en 1943 par Du Toit au moyen d'expériences de laboratoire durant lesquelles il a infecté des moutons en inoculant un broyat de *Culicoides* *Imicola* capturés sur le terrain et a infecté ces insectes avec les animaux virémiques (Du Toit, 1944a).

CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

Les moucheron vecteurs s'infectent avec le Virus de la Blue Tongue (BTV) lorsqu'ils se gorgent sur un animal virémique. Si le vecteur est compétent, le virus remontera jusqu'aux glandes salivaires où il se multipliera avant de pouvoir être de nouveau transmis lors d'un repas de sang ; c'est la phase d'incubation extrinsèque du virus.

Cette phase de multiplication virale à l'intérieur du vecteur, grâce à laquelle il devient infectant, est plus ou moins rapide selon les conditions de température. Plus la température est élevée et plus la durée d'incubation extrinsèque est courte (Mullens et al. 1995). Cette durée varie également en fonction du couple sérotype/espèce vectrice (Wittmann et al. 2002). Une fois l'insecte infecté, il le reste toute sa vie (Mellor, 2001). Ensuite, la piqûre d'un seul moucheron infectant suffit à infecter un ruminant sensible. La période de latence déterminée expérimentalement est de moins de 10 jours.

A. Activités de l'insecte

L'activité des Culicoides est essentiellement inféodée à la température :

- Inactivé après 180 minutes à 50 °C ou 15 minutes à 60 °C
- Inactivé par le B-propolactone et le phénol
- Sensible à un pH inférieur à 6,0 et supérieur à 8,0
- Peut survivre longtemps en présence de protéines
- Activité maximale vers + 24 °C
- Arrêt du vol vers + 15-18 °C

La survie des insectes dans une région dépend également de la température.

Ils résistent de courtes périodes à -1,5°C. Leur survie nécessiterait en moyenne des températures maximales pour les mois les plus froids supérieure à + 12,5°C (10 jours consécutifs au moins > 13°C) (Mellor, 1993).

En outre, les capacités vectorielles de *C. imicola* dépendent de facteurs environnementaux, principalement la température : les basses températures diminuent le taux d'infection, la virogénèse, la fréquence des repas, et repoussent la date de la première piqûre infectante.

CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

A l'inverse, des températures élevées augmentent le taux d'infection, la virogénèse, la fréquence des repas et rapprochent la date de la première piqûre infectante.

L'humidité joue également un rôle : les Culicoides ont besoin d'une humidité relativement importante. Des précipitations élevées peuvent nuire à leur survie lorsque leurs aires de ponte sont inondées.

B. Les éléments d'influence

D'autres éléments ayant des répercussions sur la capacité des Culicoides à véhiculer des arbovirus sont importants à apprécier pour évaluer le risque de transmission et/ou développer des méthodes de lutte ciblées et efficaces :

- le rythme d'activité et les habitudes trophiques.

La plupart des Culicoides sont crépusculaires ou nocturnes, certains se nourrissant préférentiellement à l'intérieur (endophagie), d'autres à l'extérieur (exophagie).

- la capacité de dispersion.

On distingue alors la dispersion active qui varie de quelques centaines de mètres (Kettle, 1984) à 2-3 kilomètres selon les espèces (Lillie et al., 1981) et la dispersion passive par des vents porteurs qui seraient à l'origine de sa propagation dans les différentes îles du bassin méditerranéen, les insectes sont transportés par des vents chauds et humides de basse altitude (<2000m), de vitesse moyenne (11m/s).

- les gîtes larvaires et de repos.

L'habitat larvaire des Culicoides est très varié et plus ou moins spécifique selon les espèces mais les larves ont toutes besoin d'un substrat riche en matières organiques et humide pour se développer (Mullen, 2002).

- les préférences trophiques.

A cause de leur petite taille et des habitudes nocturnes de la plupart des Culicoides, il est très difficile de collecter et d'identifier directement les Culicoides sur leurs hôtes. Des méthodes indirectes sont alors utilisées.

Une indication de cette préférence peut être fournie par la présence d'un grand nombre de spécimens d'une espèce dans un piège posé à proximité d'un hôte particulier (Nevill & Anderson, 1972).

L'identification de l'origine du sang contenu dans des insectes gorgés est également possible mais cela suppose de pouvoir piéger un grand nombre de Culicoides gorgés.

II.3.4.4. L'environnement

Dans un contexte de réchauffement climatique déjà amorcé puisqu'en Europe, la température moyenne globale a augmenté de 1,2°C entre 1900 et 2000 (European Environmental Agency, 2003), les maladies vectorielles sont au cœur des questionnements soulevés par ce changement climatique (Jetten & Focks, 1997; Githeko et al. 2000; Gubler *et al*, 2001) du fait du lien étroit qui existe entre les insectes et leur environnement.

Cette tendance observée de l'évolution du climat n'a pas seulement une influence sur la répartition des populations de *C. imicola* qui semble, pour la première fois, s'installer durablement au-delà du 40ème parallèle (Purse et al. 2005) mais peut également modifier la compétence et la capacité vectorielle de cette famille d'insectes.

Plusieurs paramètres clés de la dynamique de *C. imicola* varient ainsi en fonction de la température, c'est le cas de :

- la longévité :

La plupart des adultes survivent moins de 3 semaines (Mellor et al., 2000). Plus un vecteur vit longtemps, plus il pourra infliger de piqûres infectantes. L'élévation de la température a un effet négatif sur l'espérance de vie des Culicoides en diminuant le taux de survie journalier.

- la durée de l'oogenèse :

La durée nécessaire pour que les œufs arrivent à maturation après le repas de sang représente l'étape la plus longue entre deux repas de sang. Une augmentation de la température diminue le temps nécessaire pour cette maturation. Ainsi, le vecteur pourra piquer plus fréquemment d'où une augmentation du contact hôte/vecteur.

- l'abondance :

Des températures plus élevées favorisent le développement larvaire d'où un temps de génération plus court. Le nombre potentiel de générations au cours d'une saison est alors plus

CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

grand. En Espagne, les zones avec les températures moyennes mensuelles les plus élevées coïncident avec les zones où *C. imicola* est le plus abondant (Rawlings et al. 1998).

- la durée de la saison d'activité :

18°C est souvent cité comme la température moyenne seuil en dessous de laquelle les Culicoides ne sont plus actifs (Nevill, 1971; Sellers & Mellor, 1993).

Si la période durant laquelle les températures moyennes journalières sont supérieures à cette valeur s'allonge, le nombre de générations possibles de *C. imicola* sera plus grand d'où un allongement de la période de transmission du virus. Un hiver doux favorise également la persistance de l'activité d'individus adultes comme cela a déjà été montré par Nevill (Nevill, 1971). La virogénèse au sein de l'insecte étant thermodépendante, à températures élevées le temps nécessaire pour qu'un insecte devienne infectant est plus court. Le potentiel de transmission d'un arbovirus par un insecte vecteur est ainsi fonction de l'interaction entre l'accélération de la virogénèse et la diminution de la durée de vie de l'insecte (Mellor, 2004).

Certains auteurs suggèrent également qu'une élévation de la température pourrait augmenter la compétence d'autres espèces de Culicoides (Wittmann & Baylis, 2000; Mellor, 2004; Purse et al. 2005).

D'autres facteurs climatiques et environnementaux sont régulièrement cités pour leur rôle sur la répartition et la dynamique des Culicoides. Ainsi, pour des températures favorables, la pluviométrie peut avoir un effet majeur sur la distribution et l'abondance de ces espèces (Mellor, 2004). Meiswinkel et al. (Meiswinkel et al. 2004) ont montré en Afrique du Sud qu'une pluviométrie annuelle de 300 à 700 mm était favorable à *C. Imicola*.

D'autres variables ayant un impact sur les gîtes larvaires peuvent également être déterminantes pour expliquer la répartition et l'abondance de telle ou telle espèce : le taux d'évaporation, le type de sol, la pente du terrain, la proximité avec des points d'eau permanents etc. (Mellor & Leake, 2000).

La vitesse et la direction du vent sont aussi des facteurs pouvant affecter la distribution des Culicoides adultes par une dispersion passive de ces derniers sur de larges distances (Braverman & Chechik, 1996; Alba et al. 2004).

En fonction du sérotype, de l'espèce animale ou encore de l'espèce vectrice, on peut distinguer plusieurs types de cycle de transmission répondant au même mécanisme général

mais avec des particularités biologiques propres. Le vecteur principal du BTV en Afrique et en Asie est *C. imicola*, vecteur qui a été mis en évidence par Du Toit dans les années 40 grâce à des expérimentations de laboratoire (Du Toit, 1944a).

II.3.4.5. Le vecteur principal afro-européen : Culicoïde Imicola

Culicoïde imicola est un Culicoïde du groupe *Avaritia* (figure 13). Cette espèce est relativement facilement reconnaissable des autres espèces de Culicoïdes présentes en Algérie grâce aux motifs visibles sur ses ailes.

En effet, même si *C. Imicola* au sens strict fait partie d'un complexe comprenant une dizaine d'espèces dites jumelles (Sebastiani et al., 2001b), en Algérie elle est à ce jour la seule espèce de ce complexe. Le recours à des caractéristiques morphologiques nécessitant une phase de dissection et de mise en préparation pour l'observation au microscope n'est donc pas nécessaire en routine.

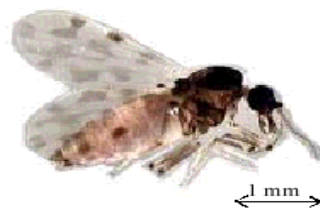


Figure 13. Morphologie d'un insecte femelle : Culicoïde Imicola.

En plus du BTV, *C. Imicola* est impliqué dans le cycle de transmission de plusieurs arboviroses d'importance vétérinaire comme le virus de la peste équine (African Horse Sickness ou AHS) (Mellor, 1993).

C. Imicola est une espèce exophile, nocturne avec, d'après la littérature, un pic d'activité communément au crépuscule et à l'aube (Braverman et al. 1992) même si de nombreux facteurs peuvent influencer sur l'activité nocturne des adultes (intensité lumineuse, température, humidité relative, cycle lunaire etc.) (Mullen, 2002). Le rayon d'activité par dispersion active de ces moucherons est généralement faible mais varie beaucoup en fonction de leur succès à se reproduire, de la disponibilité en hôtes, de la topographie du terrain ou des conditions météorologiques. Ils peuvent se disperser ainsi de quelques centaines de mètres à 2 - 3 kilomètres (Walker, 1977a; Kettle, 1984; Mullen, 2002).

CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

La localisation précise des gîtes larvaires de *C. Imicola* n'est pas facile et paraît peu spécifique comme l'atteste sa large distribution en Afrique, dans le bassin méditerranéen et en Asie. Ces gîtes sont habituellement des sites humides, saturés en eau, et riches en matières organiques, ce qui englobe un large éventail de possibilités : débordement d'abreuvoirs d'animaux, bords de petits cours d'eau, zones irriguées etc. Le type de sol semble également jouer un rôle. En effet, *C. Imicola* apparaît systématiquement absent des zones à sol sableux et/ou calcaire (Meiswinkel, 1997; Meiswinkel et al. 2004). *C. Imicola* est une espèce qui s'est très bien adaptée aux pratiques agricoles humaines. En Afrique du Sud, l'irrigation constante de prairies herbacées où sont maintenus des troupeaux semble être favorable au développement de larges populations de *C. Imicola* (Venter et al. 1996).

Peu de données spécifiques existent sur le développement larvaire de *C. Imicola* et sur la longévité des adultes.

Les seules références citent un taux de survie journalier de 0,7 à 0,9 en Afrique du Sud (Lefèvre, 2003) et de 0,8 au Kenya (Walker, 1977b).

Un certain nombre de facteurs ont un effet négatif sur ce taux de survie : la température au-delà d'un certain seuil (Baylis et al. 1998), des taux d'humidité faibles (Nevill, 1967), du vent supérieur à 3 m.s^{-1} (Walker, 1977a).

Après le premier repas sanguin, la maturation des œufs dure 2 jours à 27°C et 3-4 jours à 22°C (Meiswinkel et al. 1994). Les œufs sont pondus en grappe avec une moyenne de 69 œufs par grappe (Nevill, 1967) sans que le nombre de grappes soit connu. La durée du développement larvaire est de 7 à 25 jours puis un stade nymphal de 4 jours. Le temps entre 2 générations (d'œufs à œufs) est au minimum de 25 jours (Meiswinkel et al. 1994). La fréquence des repas dépend essentiellement de la durée de l'oogénèse et varie de 2 à 5 jours en fonction des conditions de température (Braverman et al. 1985; Baylis et al. 1998). En général, au moins 2 générations évoluent pendant chaque saison d'activité.

Ainsi, comme les Culicoides en général, *C. Imicola* est sensible aux paramètres environnementaux qui modulent son activité, influencent sa dispersion et déterminent la dynamique de la population. A ce jour, peu de relations quantitatives avec ces paramètres ont été établies pour cette espèce en régions tropicales et encore moins en régions tempérées.

CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

II.3.4.6. Transmission

Les modes de propagation entre les animaux par contact direct ou indirect ne sont pas considérés comme importants. Le BTV est transmis d'un animal malade à un animal sain exclusivement via la piqûre de moucheron hémato-phages, du genre *Culicoides* (figure 14).

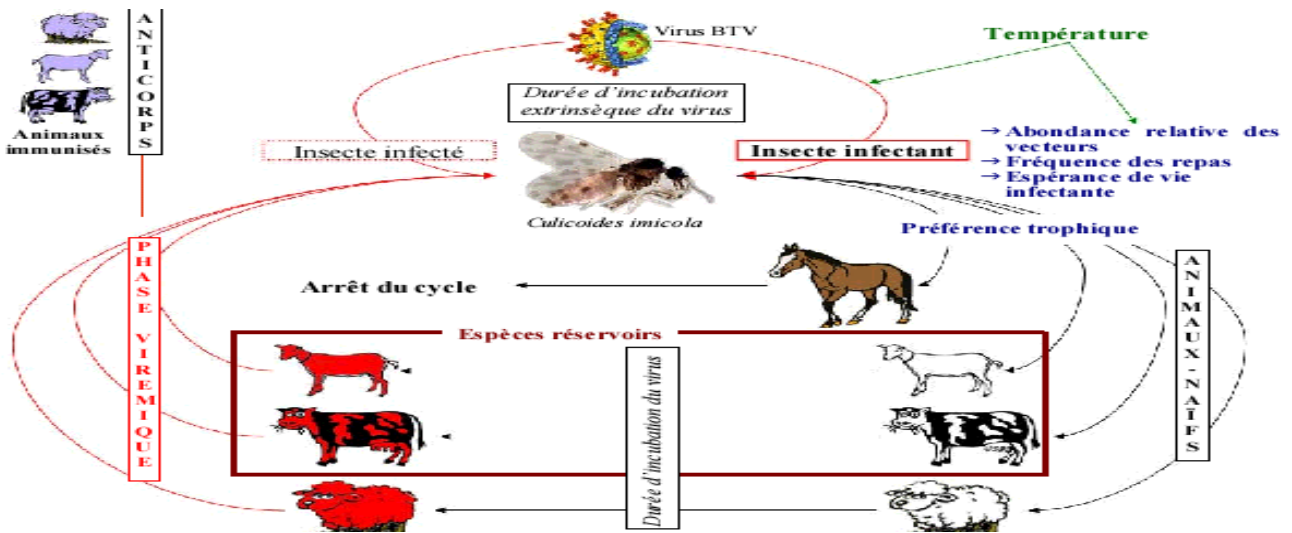


Figure 14. Cycle de transmission du BTV entre une population de vecteurs et les espèces hôtes (sensibles et réservoirs) et facteurs d'influence (en bleu : facteurs liés à l'insecte, en vert : les facteurs liés à l'environnement).

Cette figure schématise le cycle de transmission du virus entre ces 2 compartiments et les facteurs-clés influençant cette transmission.

D'autres facteurs environnementaux ont un effet indirect sur ce cycle du fait de leur action sur la biologie et la dynamique des populations de vecteur.

Le vecteur est le lien indispensable pour permettre la circulation d'un virus d'un hôte à un autre. Ainsi, tous les facteurs favorables à l'installation, à l'endémisation ou à la dispersion des espèces vectrices sont autant de facteurs de risque pour l'expansion de la maladie dans de nouvelles zones géographiques. De même, les facteurs influençant positivement la dynamique du vecteur jouent également un rôle dans le cycle de transmission du BTV. En effet, plus le vecteur sera abondant, se gorgera fréquemment sur des hôtes sensibles et vivra longtemps, plus son potentiel à transmettre un virus sera grand. C'est pourquoi une meilleure compréhension de la dynamique des vecteurs et des facteurs qui l'influencent est primordiale pour apprécier l'évolution du risque de transmission d'arbovirus comme le BTV.

II.4. La fièvre catarrhale ovine en Algérie

En Algérie la fièvre catarrhale du mouton fait des apparitions sporadiques : la première incursion en été 2000 concerne les wilayas du Nord- Est du pays avec l'identification de virus de sérotype 2 du même type que celui ayant touché le cheptel tunisien en 1999 et début 2000. La deuxième, observée en 2006 intéresse les wilayas du centre et ouest du pays avec identification de virus de serotype 1.

II.4.1. Situation en juillet 2000

Depuis sa première apparition en Algérie le 16 juillet 2000 dans une localité d'El Tarf (figure 15), le virus s'est répandu dans plusieurs foyers de 24 communes de la wilaya, touchant 2.661 têtes sur un total de 21.175 ovins.

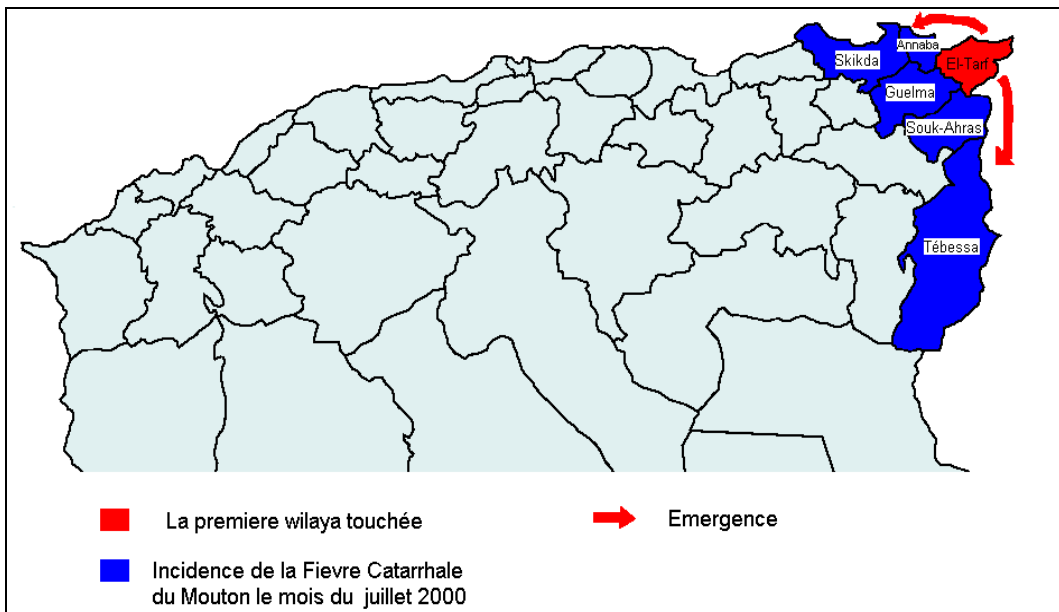


Figure 15. Emergence de la Fièvre Catarrhale du Mouton en juillet 2000.

II.4.2. Situation en août et septembre 2000

L'épidémie s'est propagée vers dix wilayas de l'Est jusqu'à atteindre le Centre (Jijel) en un laps de temps relativement court pour sévir jusqu'à fin septembre de la même année.

Les wilayas touchées sont : Annaba, El-Tarf, Guelma, Skikda, Souk-Ahras, Tébessa, Jijel, Khenchela, Oum El-Bouaghi, Sétif, le nombre total des foyers est de 28 repartis sur l'ensemble des dix wilayas, avec une prédominance en zones rurales (figure 16).

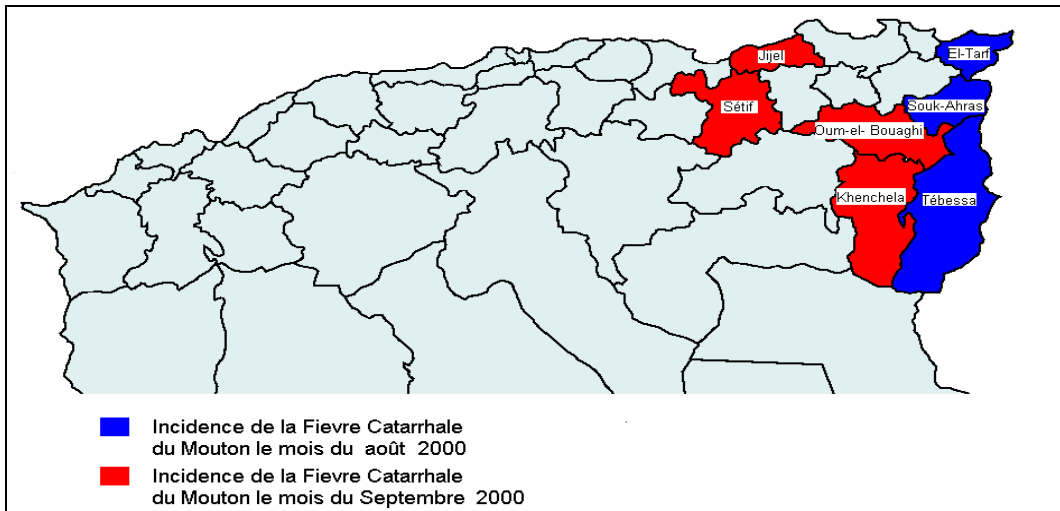


Figure 16. Emergence de la Fièvre Catarrhale du Mouton en août et septembre 2000.

II.4.3. Situation en juillet 2006

Après une résorption temporaire en fin Septembre 2000, l'épizootie de serotype 1 réapparaît en juillet 2006 dans les wilayas d'El-Bayadh et Laghouat (figure 17) pour se propager vers onze wilayas du centre et de l'ouest et atteindre la wilaya de Naama en fin du mois d'Août.

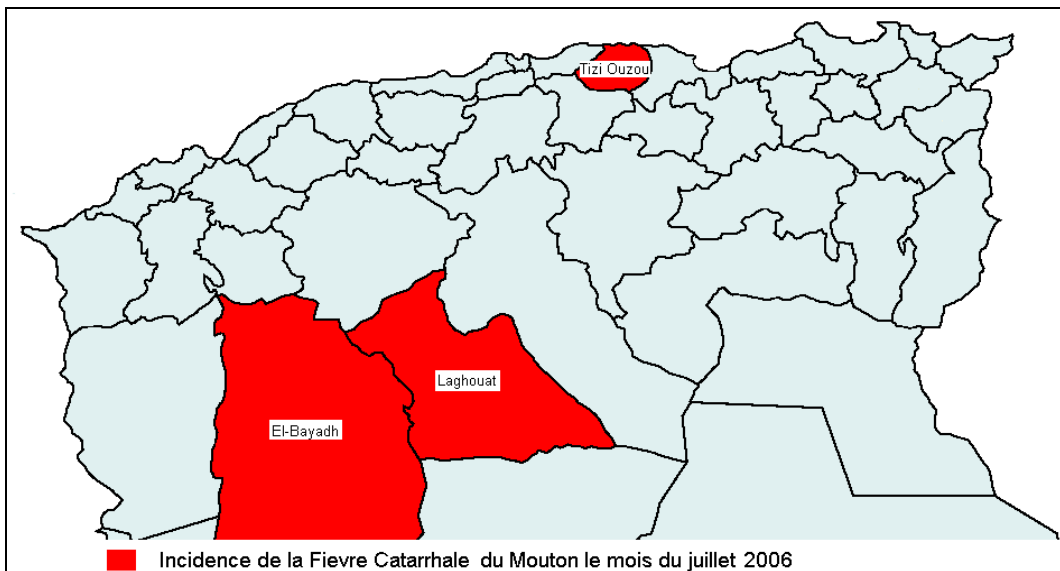


Figure 17. Emergence de la Fièvre Catarrhale du Mouton en juillet 2006.

II.4.4. Situation en août 2006

Les wilayas touchées sont Bejaia, Tizi-Ouzou, Bouira, Djelfa, El-Bayadh, Laghouat, Médéa, M'sila, Naama, Tiaret et Saida totalisant ainsi 29 foyers endémiques (figure 18).

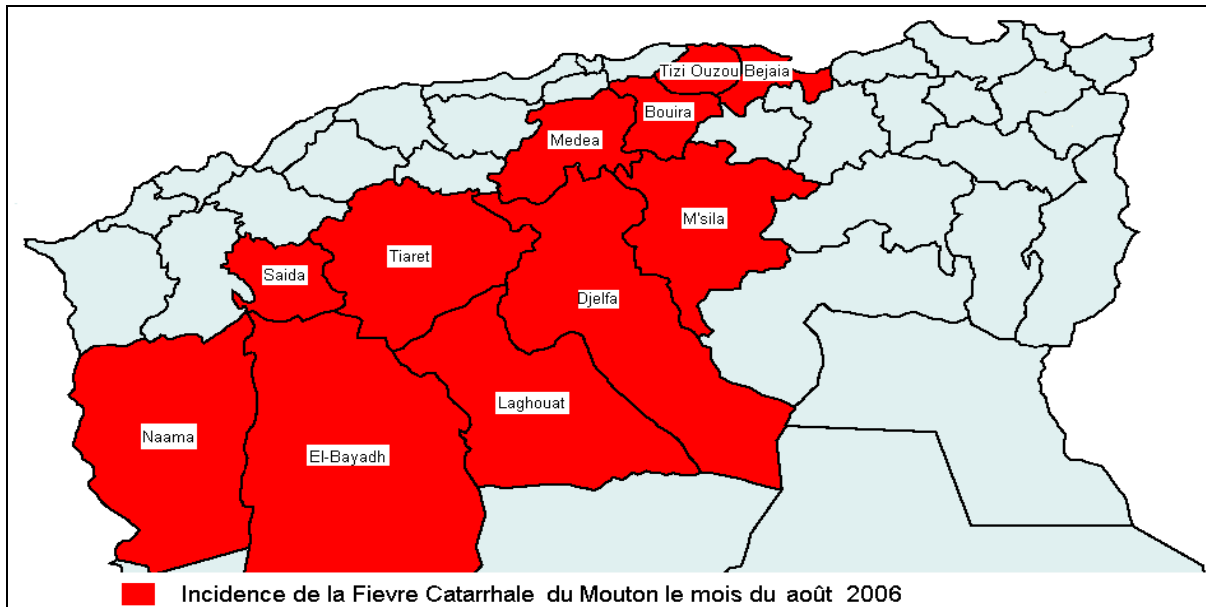


Figure 18 . Emergence de la Fièvre Catarrhale du Mouton en Août 2006.

Après une période « d'accalmie » pouvant être liée à la disparition de la maladie ou à son non déclaration par les éleveurs, des cas de FCM furent récemment observés au centre et à l'ouest du pays.

II.4.5. Origine de la maladie

Cette pathologie est réapparue récemment dans notre pays, et s'est parfois accompagnée de perte importante de cheptels dans plusieurs localités.

Une source du ministère de l'Agriculture indique que cette pathologie virale provient de la Tunisie où elle a été signalée 6 mois auparavant. Ce qui explique d'ailleurs sa concentration à l'est du pays. Quant à la voie de transmission, le virus est parvenu à El Tarf par le biais d'un insecte propagateur emporté par les fortes tempêtes de vents qu'a connues l'extrême Est du pays au début du mois précédent.

En tout état de cause, l'occurrence de la maladie en période estivale, son aire d'évolution ou encore sa progression spatiale semblent présenter certaines particularités et laissent entrevoir l'hypothèse de la prévalence des conditions climatiques particulièrement favorables au déplacement de l'insecte vecteur et /ou à l'intensité de sa virulence.

CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

II.4.6. Evolution de la maladie

Les années 2000 et 2006 ont été particulièrement marquées par la Blue Tongue, avec une nette prévalence en juillet et août 2000 dans les wilayas frontalières avec la Tunisie où la maladie apparut en janvier 2000 (Tableaux 1 à 3).

Tableau 1. Incidence de la Fièvre Catarrhale du Mouton en juillet 2000.

| Mois | Nombre total de nouveaux foyers durant le mois | Localisation | Espèce | Nombre d'animaux dans les foyers | | | | |
|---------|--|--------------|--------|----------------------------------|-----|-------|----------|---------|
| | | | | Sensibles | Cas | Morts | Détruits | Abattus |
| 07/2000 | 2 | Annaba | ovine | 1566 | 164 | 27 | 3 | 21 |
| | 6 | El-Tarf | | | | | | |
| | 5 | Guelma | | | | | | |
| | 3 | Skikda | | | | | | |
| | 4 | Souk-Ahras | | | | | | |
| | 1 | Tébessa | | | | | | |

Tableau 2. Incidence de la Fièvre Catarrhale du Mouton en août 2000.

| Mois | Nombre total de nouveaux foyers durant le mois | Localisation | Espèce | Nombre d'animaux dans les foyers | | | | |
|---------|--|--------------|--------|----------------------------------|-----|-------|----------|---------|
| | | | | Sensibles | Cas | Morts | Détruits | Abattus |
| 08/2000 | 1 | El-Tarf | ovine | 164 | 14 | | | |
| | 1 | Souk-Ahras | | | | | | |
| | 1 | Tébessa | | | | | | |

CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

Tableau 3. Incidence de la Fièvre Catarrhale du Mouton en septembre 2000.

| Mois | Nombre total de nouveaux foyers durant le mois | Localisation | Espèce | Nombre d'animaux dans les foyers | | | | |
|---------|--|----------------|--------|----------------------------------|-----|-------|----------|---------|
| | | | | Sensibles | Cas | Morts | Détruits | Abattus |
| 09/2000 | 1 | Jijel | ovine | 283 | 18 | 2 | | |
| | 1 | Khenchela | | | | | | |
| | 1 | Oum-el-Bouaghi | | | | | | |
| | 1 | Sétif | | | | | | |

Une recrudescence de la maladie a été observée durant la période 2001-2005, la cause pouvant être la disparition de la maladie ou l'absence de déclaration par les éleveurs. La maladie réapparaît en 2006 et touche bon nombre de localités des wilayas du Centre et de l'Ouest du pays. (Tableaux 4 et 5)

Tableau 4. Incidence de la Fièvre Catarrhale du Mouton en juillet 2006.

| Première division administrative (wilaya) | Division administrative inférieure | Nom de la localité | Date du début de | Espèce | Nombre d'animaux dans les foyers | | | | |
|---|------------------------------------|--------------------|------------------|--------|----------------------------------|------------|--------------|-----------------|----------------|
| | | | | | <i>Sensibles</i> | <i>Cas</i> | <i>Morts</i> | <i>Détruits</i> | <i>Abattus</i> |
| El Bayadh | Boualem | Boualem | 12 juil | ovine | 120 | 5 | 2 | 0 | 0 |
| | Boualem | Sidi Amar | 12 juil | ovine | 300 | 7 | 1 | 0 | 0 |
| | El Biodh | Ain El Orak | 12 juil | ovine | 410 | 5 | 0 | 0 | 0 |
| | Stitten | Stitten | 15 juil | ovine | 523 | 20 | 0 | 0 | 0 |
| Laghouat | Aflou | El Gheïcha | 12 juil | ovine | 60 | 4 | 2 | 0 | 0 |
| | Laghouat | Laghouat | 12 juil | ovine | 440 | 31 | 13 | 0 | 0 |
| Tizi-Ouzou | Azzazga | Azzazga | 23 juil | ovine | 30 | 5 | 0 | 0 | 0 |

CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

Tableau 5. Incidence de la Fièvre Catarrhale du Mouton en août 2006.

| Première division administrative (wilaya) | Division administrative inférieure | Date du début de l'incident | Espèce | Nombre d'animaux dans les foyers | | | | |
|---|------------------------------------|-----------------------------|--------|----------------------------------|-----|-------|----------|---------|
| | | | | Sensibles | Cas | Morts | Détruits | Abattus |
| Bejaia | Akfadou | 6 août | ovine | 70 | 5 | 0 | 0 | 0 |
| Bejaia | Chemini | 4 août | ovine | 12 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| Bouira | Haizer | 26 août | ovine | 10 | 5 | 0 | 0 | 0 |
| Bouira | Saharidj | 19 août | ovine | 80 | 30 | 0 | 0 | 0 |
| Djelfa | Ain Bell | 30 août | ovine | 500 | 15 | 3 | 0 | 0 |
| Djelfa | Messaad | 21 août | ovine | 200 | 12 | 1 | 0 | 0 |
| El Bayadh | Ghassoul | 1 ^{er} août | ovine | 300 | 7 | 0 | 0 | 0 |
| El Bayadh | Sidi Tiffour | 1 ^{er} août | ovine | 5 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Laghouat | Benaceur/ Ben Chohra | 1 ^{er} août | ovine | 230 | 15 | 0 | 0 | 0 |
| Medea | Berrouaghia | 27 août | ovine | 150 | 5 | 1 | 0 | 0 |
| Medea | Berrouaghia | 29 août | ovine | 80 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| Medea | Boughezoul | 29 août | ovine | 60 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| M'sila | Mohamed Boudiaf | 30 août | ovine | 15 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| M'sila | Oultem | 23 août | ovine | 80 | 30 | 1 | 0 | 0 |
| Naama | Ain Benkhelil | 25 août | ovine | 150 | 7 | 2 | 0 | 0 |
| Naama | Moghrar | 25 août | ovine | 668 | 10 | 2 | 0 | 0 |
| Saida | Ouled Thabet | 30 août | ovine | 80 | 19 | 5 | 0 | 0 |
| Tiaret | Hraasfa | 10 août | ovine | 70 | 3 | 1 | 0 | 0 |
| Tiaret | Oued Lili | 8 août | ovine | 450 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| Tiaret | Tagdemt | 9 août | ovine | 132 | 8 | 2 | 0 | 0 |
| Tizi-Ouzou | Ouaguenoun | 14 août | ovine | 17 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| Tizi-Ouzou | Tizi-Ouzou | 14 août | ovine | 20 | 3 | 0 | 0 | 0 |

L'évolution saisonnière montre la prépondérance de cette pathologie en été, les étés 2000 et 2006 étant les périodes d'incidence maximale (Figure 19).

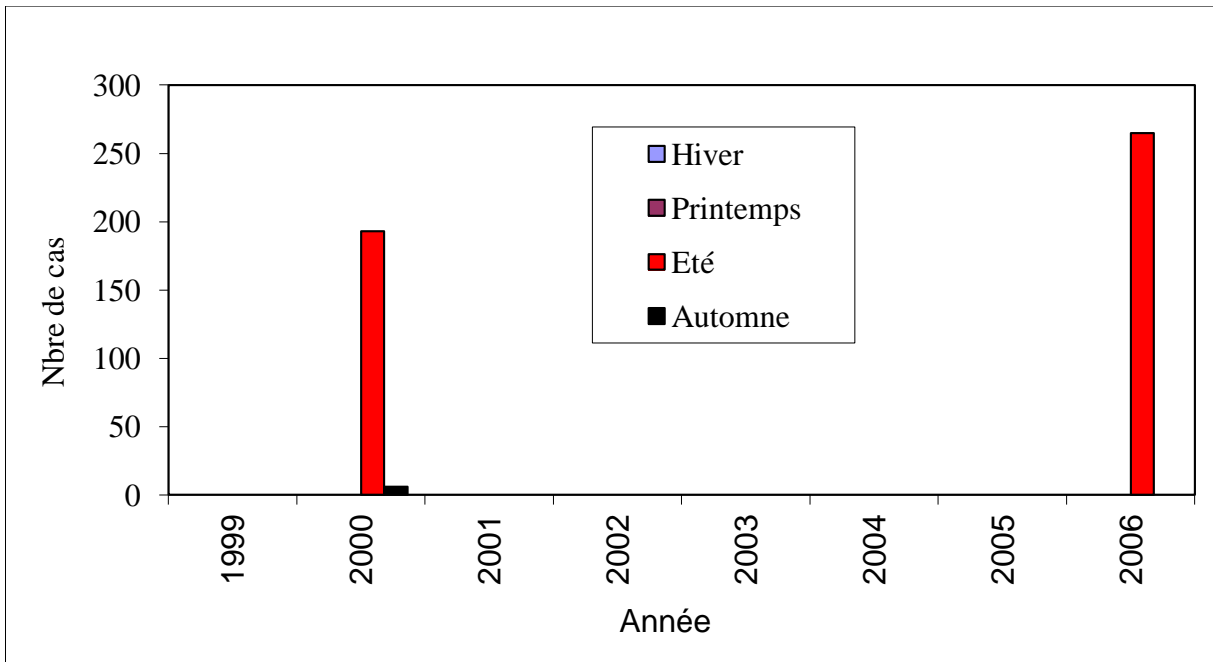


Figure 19. Evolution saisonnière de la FCM (Période 1999 – 2006).

II.5. Analyse des facteurs climatiques liés à l'émergence de la FCM

Après avoir situé et délimité les foyers endémiques de la FCM, on se propose, à partir des données fournies par le service météorologique algérien et les données statistiques en relation avec cette pathologie, extraites du site de l'Office International d'Epizooties (*O.I.E*), d'étudier les conditions climatiques en rapport avec l'émergence, le développement et la propagation de cette maladie. Deux types de données ont été nécessaires à la réalisation de notre travail : les données climatiques fournies par les services climatologiques de l'Office National de la Météorologie Algérienne (ONM) et des données statistiques en relation avec la maladie extraites du site de l'Office International d'Epizooties (O.I.E).

L'étude climatologique portera sur la période et les wilayas à forte prédominance de la maladie, soit sur l'année 2000 pour El-Tarf, Guelma et Souk-Ahras et 2006 pour d'El Bayadh, Tizi-Ouzou et Bouira (les données climatologiques de la wilaya de Laghouat ne sont pas disponibles).

Les coordonnées des stations ainsi que les paramètres retenus pour l'étude sont consignés dans les tableaux 6 et 7 ci-après. On notera que la station d'El Kala est géographiquement plus proche d'El-Tarf.

La méthodologie adoptée consiste à comparer l'incidence spatio-temporelle de la FCM sur le territoire durant la période considérée, à l'évolution des paramètres climatiques et

CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

environnementaux (Température minimale, maximale et moyenne, humidité de l'air, vent, bilan hydrique, précipitations etc.), susceptibles de régir la capacité vectorielle de l'insecte.

Tableau 6. Stations et données météorologiques disponibles pour l'année 2000.

| Station | Indicatif | Latitude | Longitude | Altitude(m) | Paramètres |
|------------|-----------|----------|-----------|-------------|---|
| El-kala | 60363 | 36°54N | 08°27E | 11 | - Température mensuelle, moyenne, minimale et maximale - Humidité relative (%) - Précipitation mensuelle, annuelle et bilan hydrique - Vitesse et direction du vent - Evaporation et insolation |
| Guelma | 60403 | 36°28N | 07°28E | 227 | |
| Souk-Ahras | 60423 | 36° 17N | 07° 58E | 680 | |

Tableau 7. Stations et données météorologiques disponibles pour l'année 2006.

| Station | Indicatif | Latitude | Longitude | Altitude(m) | Paramètres |
|------------|-----------|----------|-----------|-------------|--|
| El-Bayadh | 60550 | 33°40N | 01°00 E | 750 | - Températures mensuelle, moyenne, minimale et maximale - Humidité relative(%) - Précipitation mensuelle et bilan hydrique - Vitesse et direction du vent |
| Bouira | 60417 | 36°23N | 03°53 E | 555 | |
| Tizi-ouzou | 60395 | 36°42N | 04°03 E | 188 | |

II.5.1. Cas de l'année 2000

On note, durant cette année une prévalence de la maladie dans les wilayas d'El-Tarf, Guelma et Souk –Ahras ; zones frontalières avec la Tunisie où la FCM est apparue en janvier 2000. (Figure 20)

CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

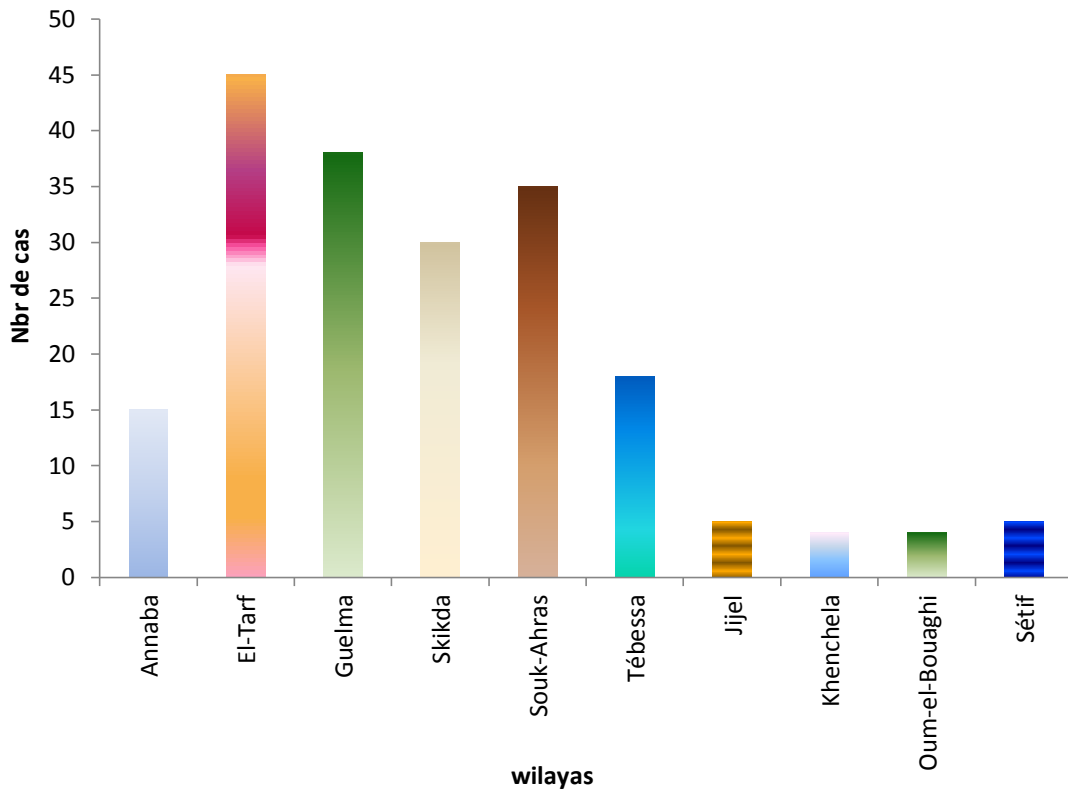


Figure 20. Nombre de cas de FCM en région Est durant l'année 2000.

- Température de l'air et incidence de la FCM

L'incidence est le nombre de cas normalisé par rapport à une population définie ; dans le cas présent, le nombre est normalisé par rapport à 50 moutons par wilaya.

De récents travaux dus à Mellor (1993) ont mis en évidence l'influence de la température sur l'activité, la durée d'incubation et la virulence de l'insecte ; les températures élevées favorisent une hyperactivité, une durée d'incubation plus réduite, une virulence accrue et même le déplacement de l'insecte (on parle alors de température d'envol).

Les figures 21,22 et 23 ci-après traduisent l'interdépendance entre l'incidence de FCM et la température de l'air environnant, pour les trois localités de la région Est.

CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

1 .El-Kala

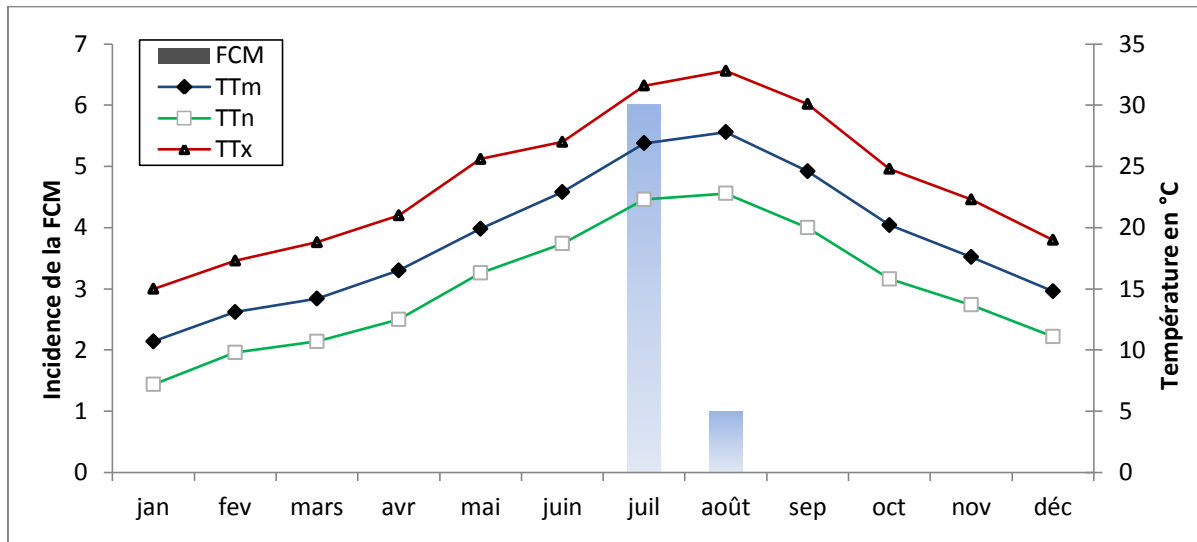


Figure 21. Températures moyenne(TTm), minimale(TTn), maximale(TTx) et incidence de la FCM à El-Kala durant l'année 2000.

2. Guelma

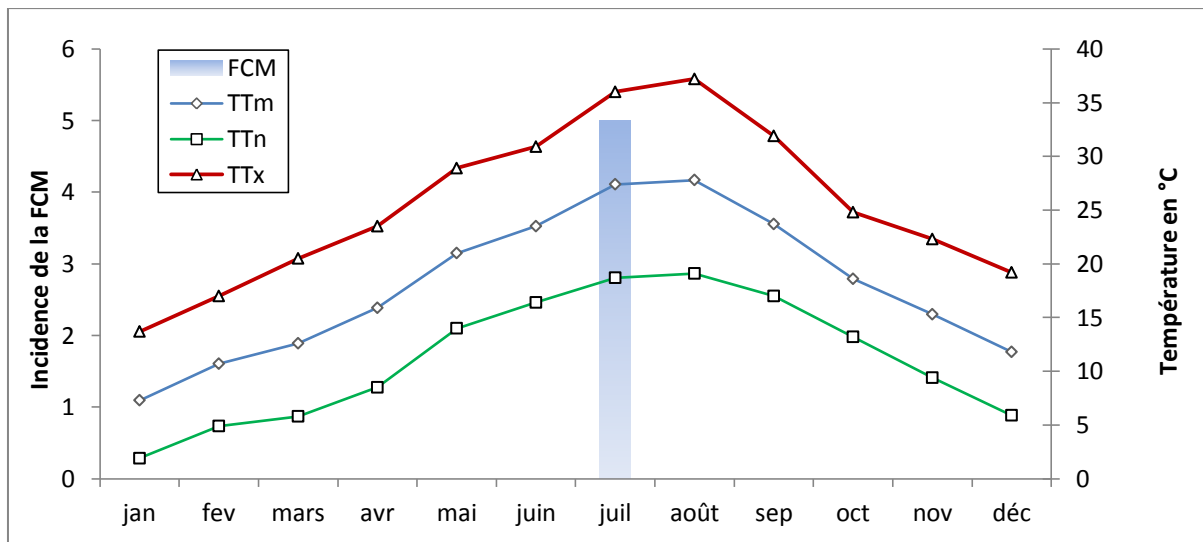


Figure 22. Températures moyenne(TTm), minimale(TTn), maximale(TTx) et incidence de la FCM à Guelma durant l'année 2000.

CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

3. Souk-Ahras

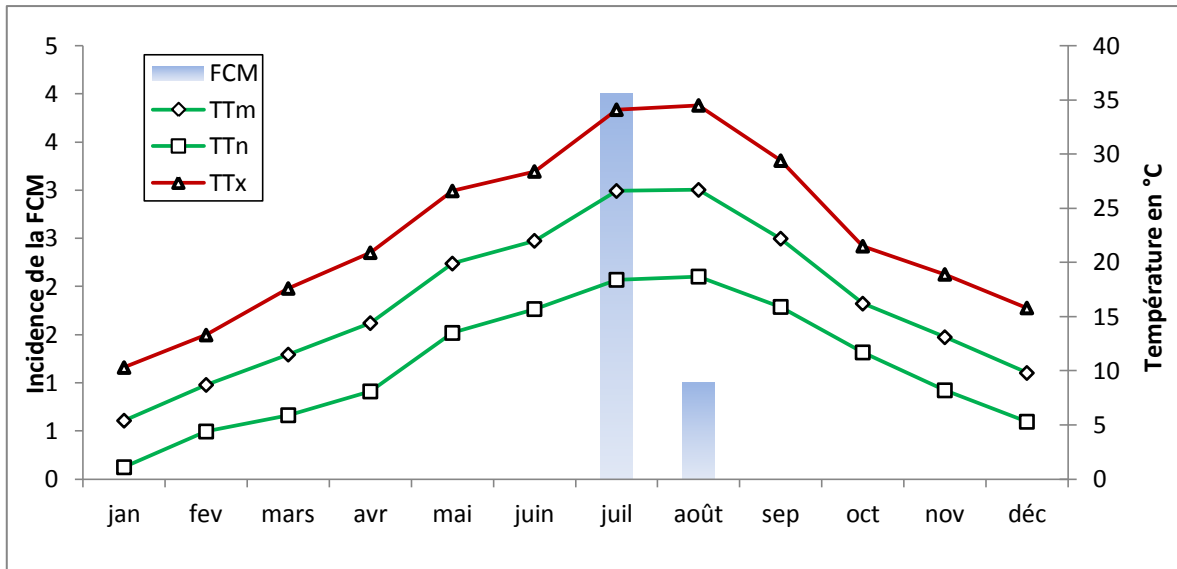


Figure 23. Températures moyenne(TTm), minimale(TTn), maximale(TTx) et incidence de la FCM à Souk Ahras durant l'année 2000.

L'examen des trois courbes montre une incidence maximale de la FCM en juillet, due à une activité vectorielle intense de l'insecte *C.Imicola*, favorisée par des températures maximales dépassant 25°C.

- Humidité et incidence de la FCM

Afin de mettre en évidence l'effet de l'humidité de l'air sur l'apparition du phénomène, nous avons représenté, pour les trois localités considérées, la variation de ce paramètre associée au nombre de FCM durant l'année 2000 à forte prévalence de la maladie. Figure 24, 25 et 26

1. El-Kala :

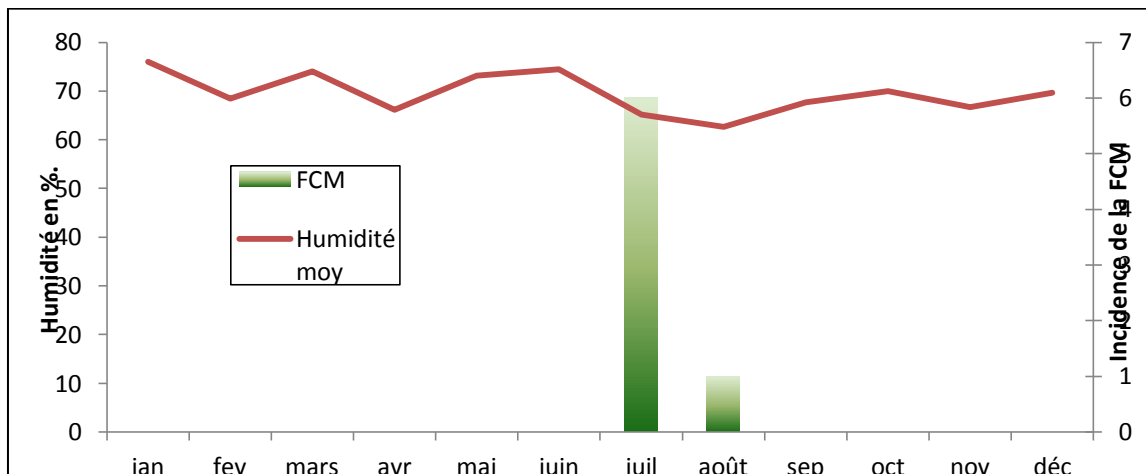


Figure 24. Humidité moyenne mensuelle de l'air et incidence de la FCM à El-Kala durant l'année 2000.

CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

2. Guelma

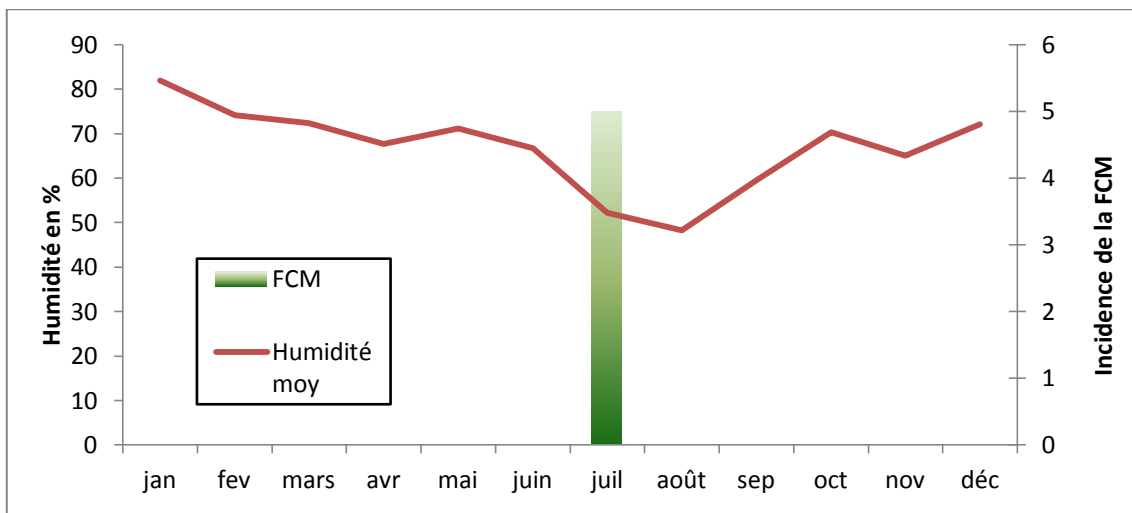


Figure 25. Humidité moyenne mensuelle et incidence de la FCM à Guelma durant l'année 2000.

3. Souk-Ahras

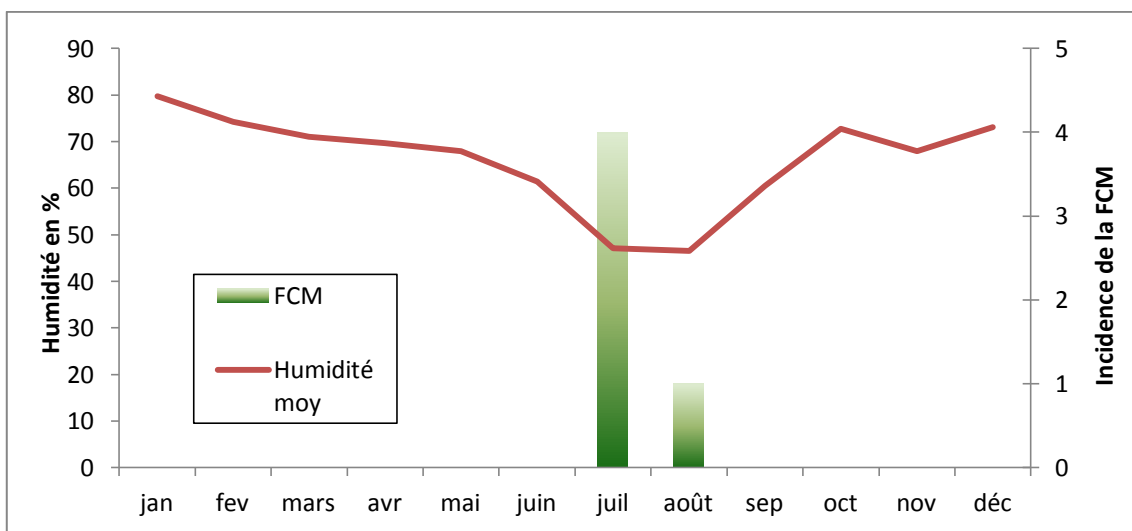


Figure 26. Humidité moyenne mensuelle et incidence de la FCM à Souk-Ahras durant l'année 2000.

Les trois courbes présentent la même configuration : les fortes humidités de l'air des trois mois précédant l'apparition de la FCM, associées à un sol suffisamment humide, ont favorisé la prolifération de l'insecte à des degrés différents.

L'absence de cas en août à Guelma peut être due à une campagne de désinsectisation.

CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

- Précipitation et incidence de la FCM

La prolifération de l'insecte vecteur est, en plus de sa virulence, un facteur important de l'incidence de la FCM. Cette prolifération est d'autant plus importante que les conditions climatiques sont favorables, notamment les conditions d'humidité de l'air, associées à des températures moyennement élevées. Un sol humidifié par les précipitations permet également une éclosion quasi-totale des œufs, pour peu que la zone de ponte ne soit pas inondée, ainsi qu'un accomplissement intégral du cycle biologique de l'élément pathogène. Les figures ci-dessous montrent l'incidence de la maladie, eu égard à la quantité annuelle de pluie recueillie au niveau de chacun des sites considérés. (Figures 27 à 29)

1. El-Kala

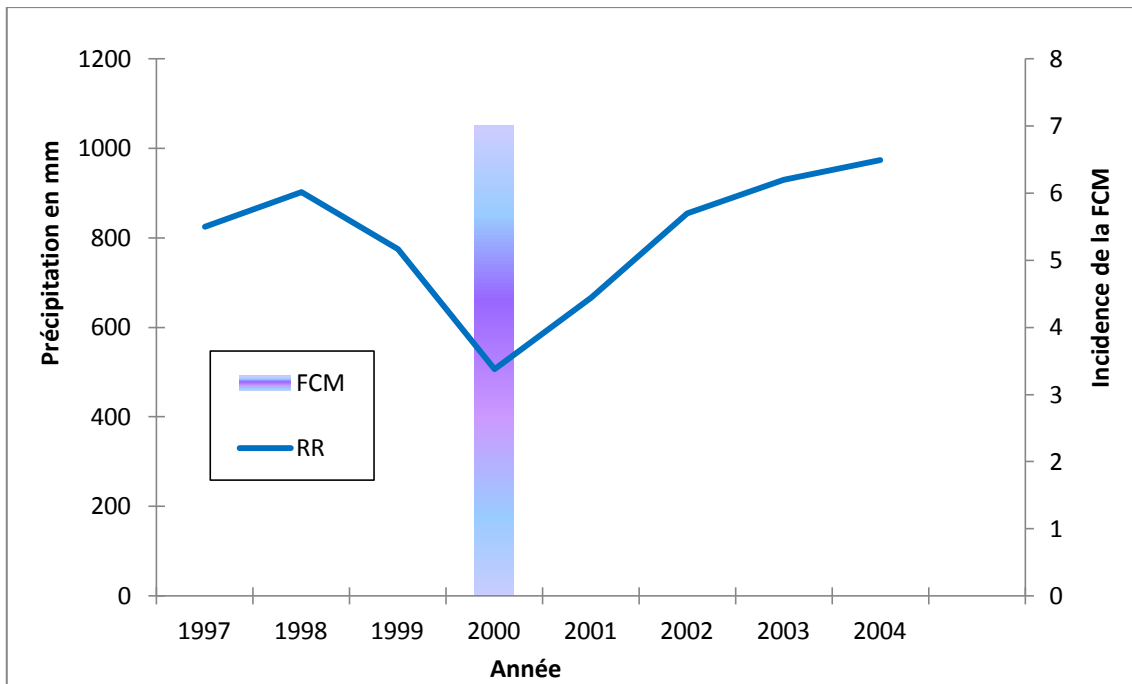


Figure 27. Cumul annuel des précipitations et incidence annuelle de la FCM à El-Kala (période 1997-2004).

CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

2. Guelma

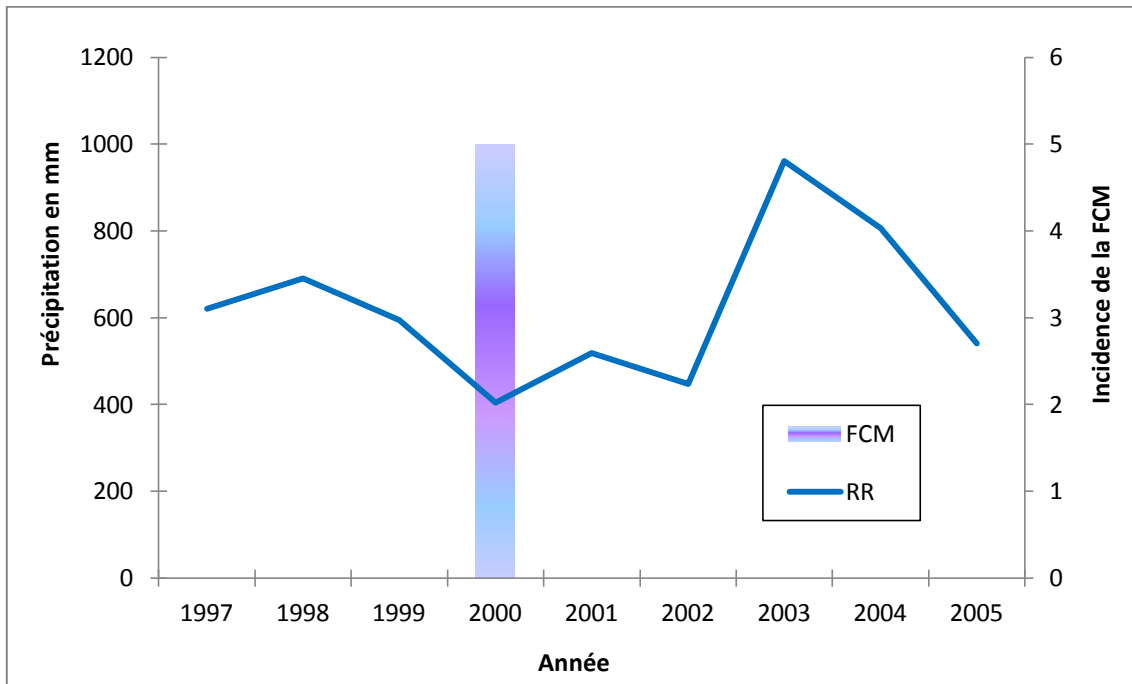


Figure 28. Cumul annuel des précipitations et incidence de la FCM à Guelma (Période 1997-2005).

3. Souk-Ahras

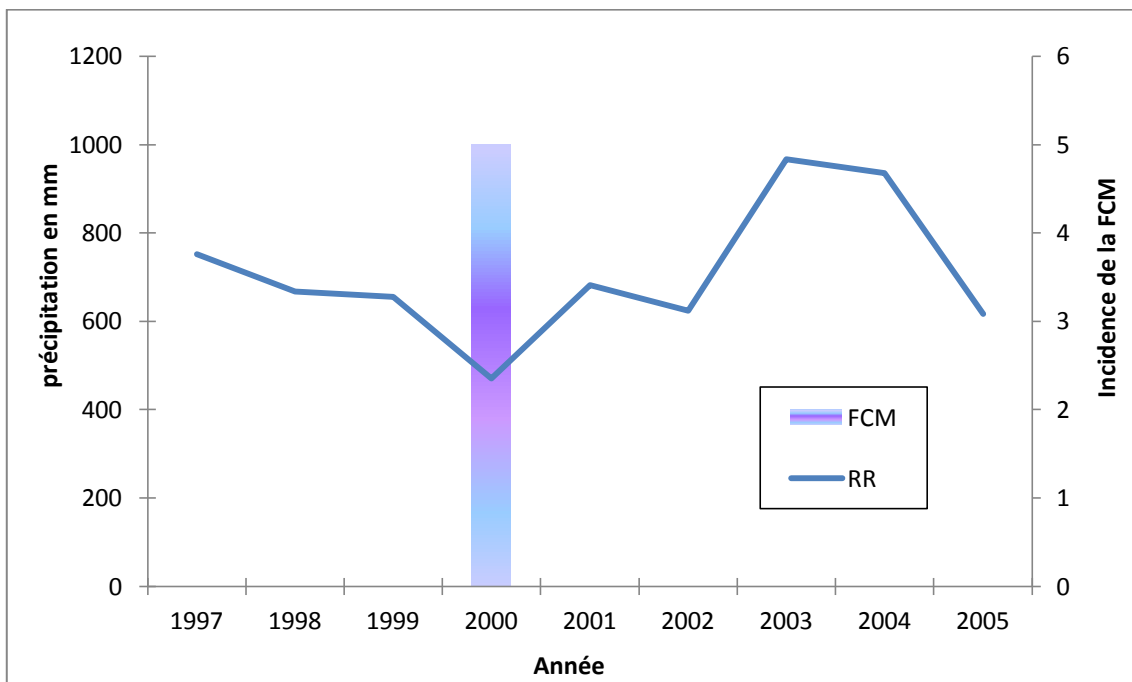


Figure 29. Cumul annuel des précipitations et incidence de la FCM à Souk-Ahras (Période 1997-2005).

CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

On note une incidence supérieure à 5, le maximum étant enregistré à El-Kala, où de fortes précipitations (plus de 50 mm) ont été enregistrées en mai et juin (source : bulletin mensuel CCN-ONM Alger). Une période de latence a été observée entre 2001 et 2005.

L'incidence maximale correspondant à un cumul de pluie annuel d'environ 500 mm montre l'effet indirect sur le développement du culicoïde imicola, en accord avec les travaux de Meiswinkel et al (2004) en Afrique du Sud.

Cependant, l'absence du phénomène en conditions hydriques favorables laisse entrevoir l'influence d'autres facteurs climatiques et environnementaux sur la résurgence de la maladie. Ainsi, en plus des effets biologiques des précipitations sur l'insecte, on considère l'effet de l'évaporation par l'intermédiaire d'un paramètre élaboré : le bilan hydrique. (Figures 30 à 32)

- Bilan hydrique et incidence de la FCM

1. El-Kala :

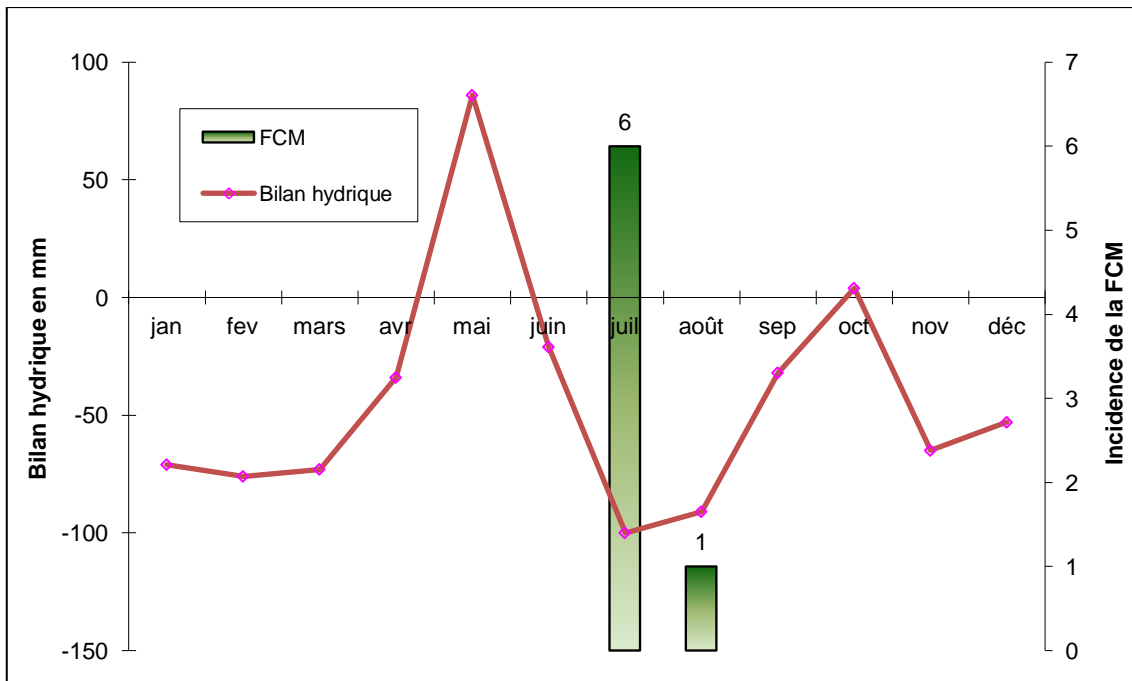


Figure 30. Bilan hydrique mensuel et incidence de la FCM à El-Kala durant l'année 2000.

CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

2. Guelma

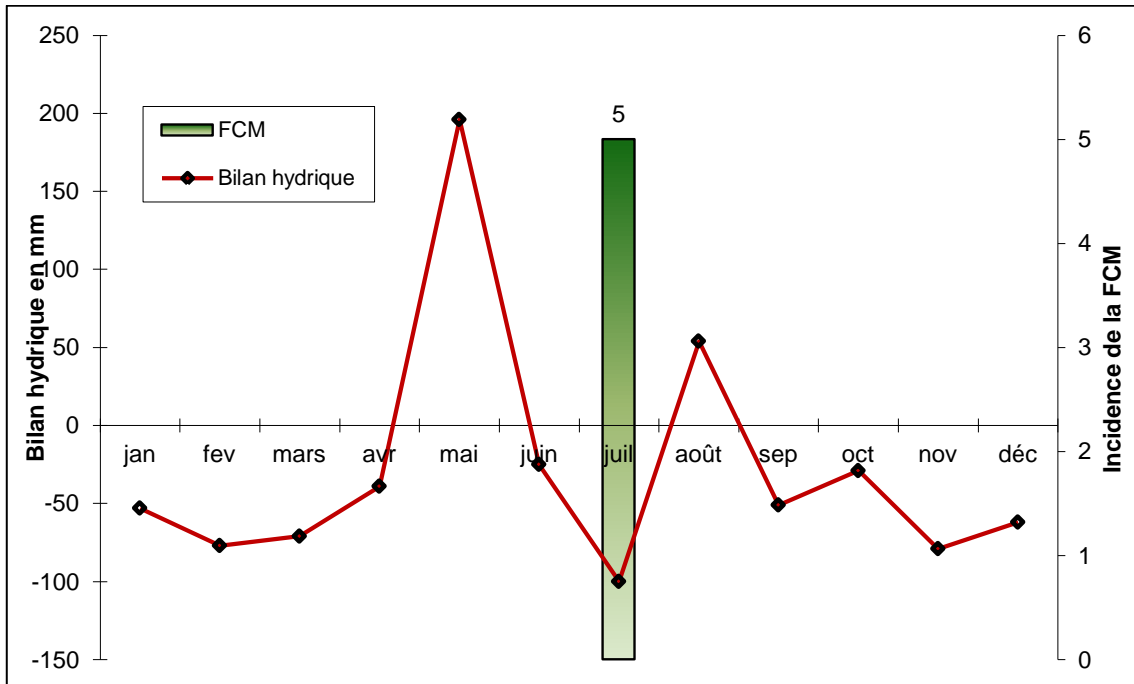


Figure 31. Bilan hydrique mensuel et incidence de la FCM à Guelma durant l'année 2000.

3. Souk-Ahras

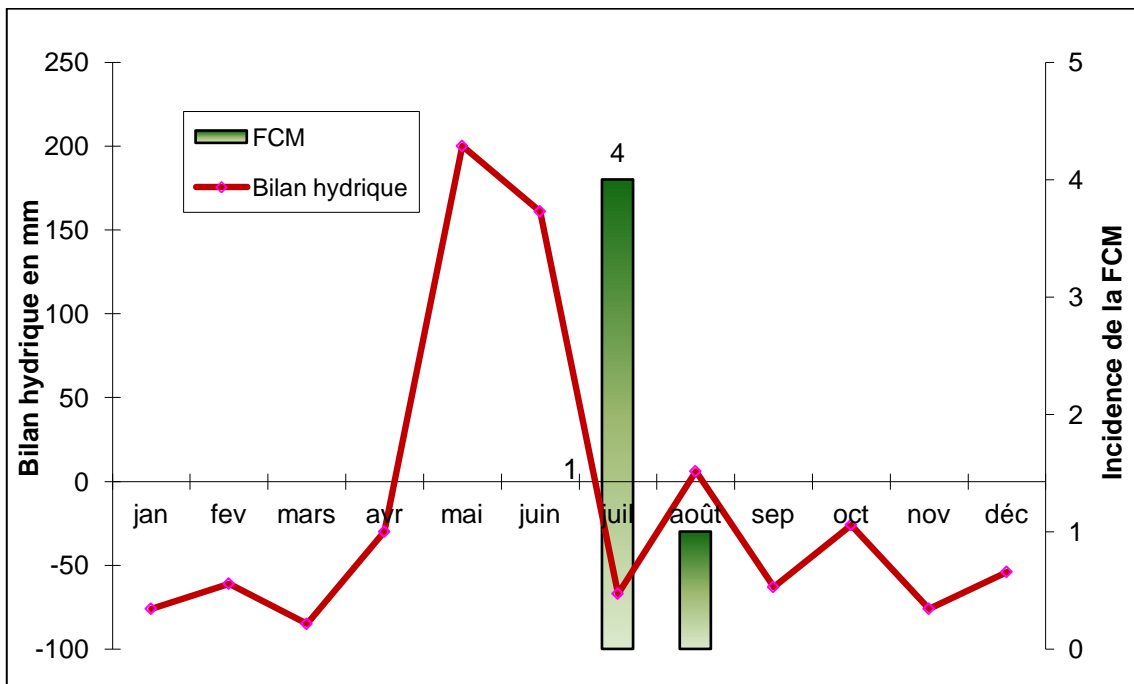


Figure 32. Bilan hydrique mensuel et incidence de la FCM à Souk-Ahras durant l'année 2000.

CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

Le bilan hydrique excédentaire durant les mois précédant l'épidémie explique en partie le développement de l'insecte. En effet l'ameublissement du sol a permis de générer des gîtes larvaires : ponte, taux d'éclosion important, survie des larves, d'où un nombre élevé d'insectes adultes. Le déplacement des insectes adultes est également favorisé par l'intensité de la lumière. Les durées d'insolation élevées sont généralement associées à de fortes intensités lumineuses, à l'origine de la dispersion active de l'insecte, augmentant ainsi bien le nombre de foyers que le nombre de cas par foyer. Les fortes incidences observées à Guelma et Souk Ahras en Juillet semblent confirmer l'interdépendance de l'insolation et de la FCM. (Figures 33 et 34)

1. Guelma

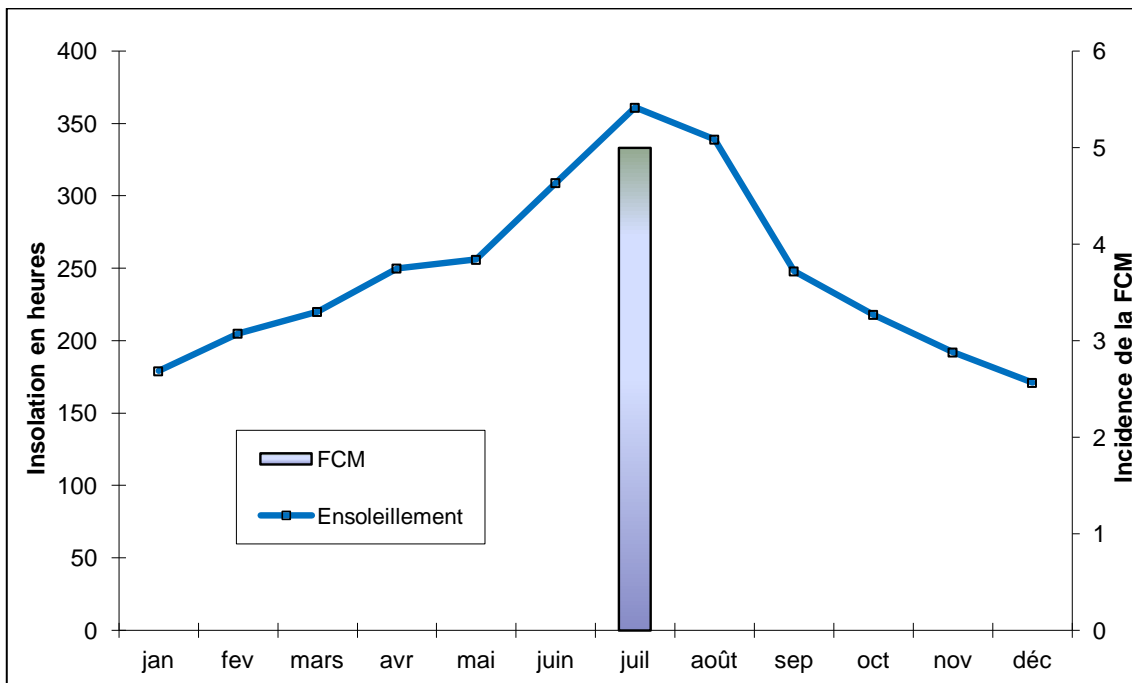


Figure 33. Durée d'insolation et incidence de la FCM à Guelma durant l'année 2000.

CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

2. Souk-Ahras

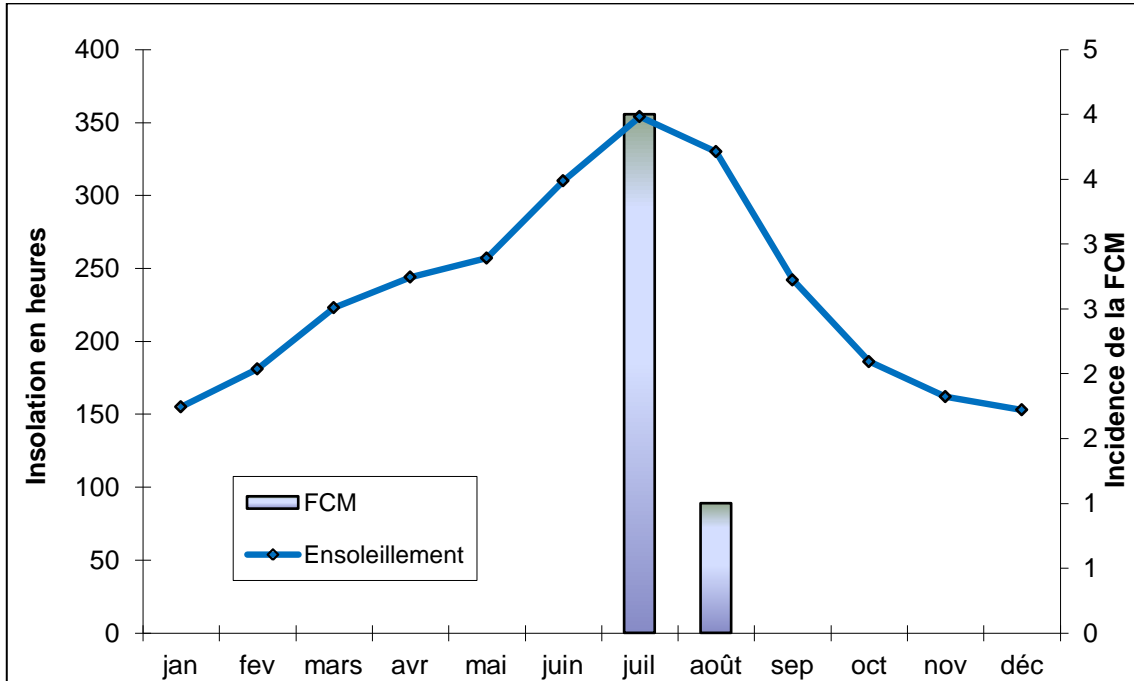
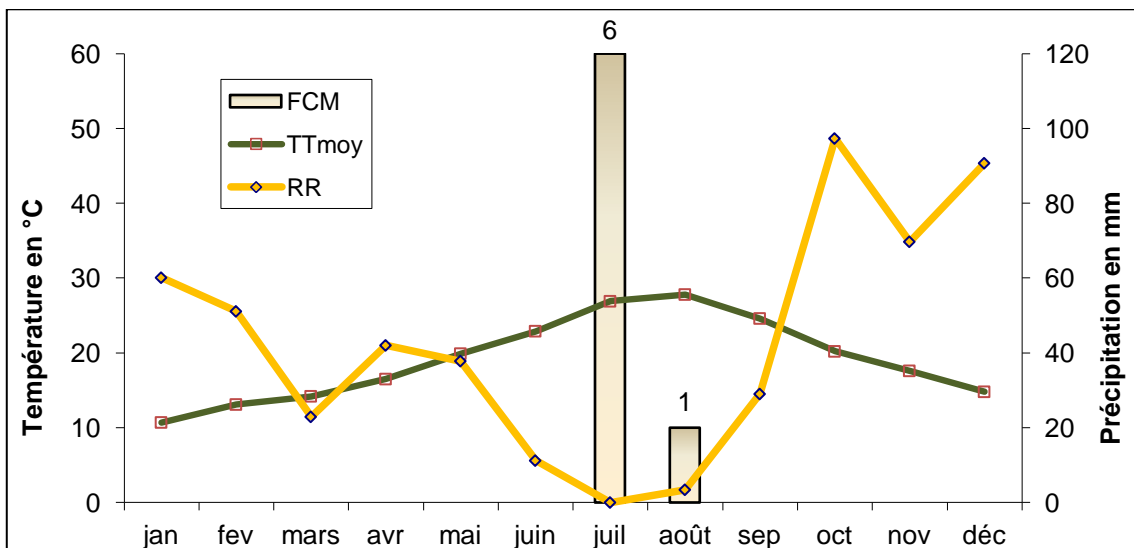


Figure 34. Durée d'insolation et incidence de la FCM à Souk-Ahras durant l'année 2000.

Malgré leurs positions géographiques différentes, les trois régions considérées présentent des caractéristiques communes: El Kala étant une ville côtière; Guelma et Souk Ahras étant plus à l'intérieur, on note une similitude dans les conditions d'occurrence de la maladie. Des courbes ombrothermiques (Figures 35à 37) montrent que cette occurrence survient en pleine période de sécheresse précédée d'un épisode pluvieux de deux à trois mois.

1. El-Kala



CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

Figure 35. Courbe ombrothermique El-Kala (1999-2000)

2. Guelma

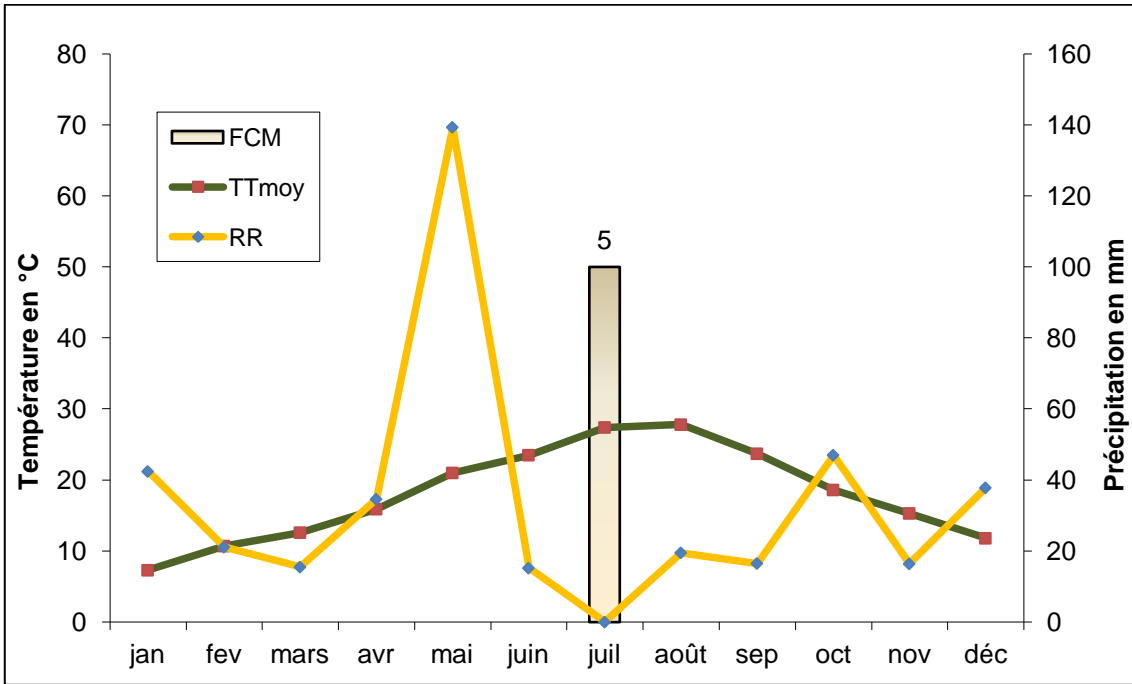


Figure 36. Courbe ombrothermique Guelma, (1999-2000).

3. Souk-Ahras

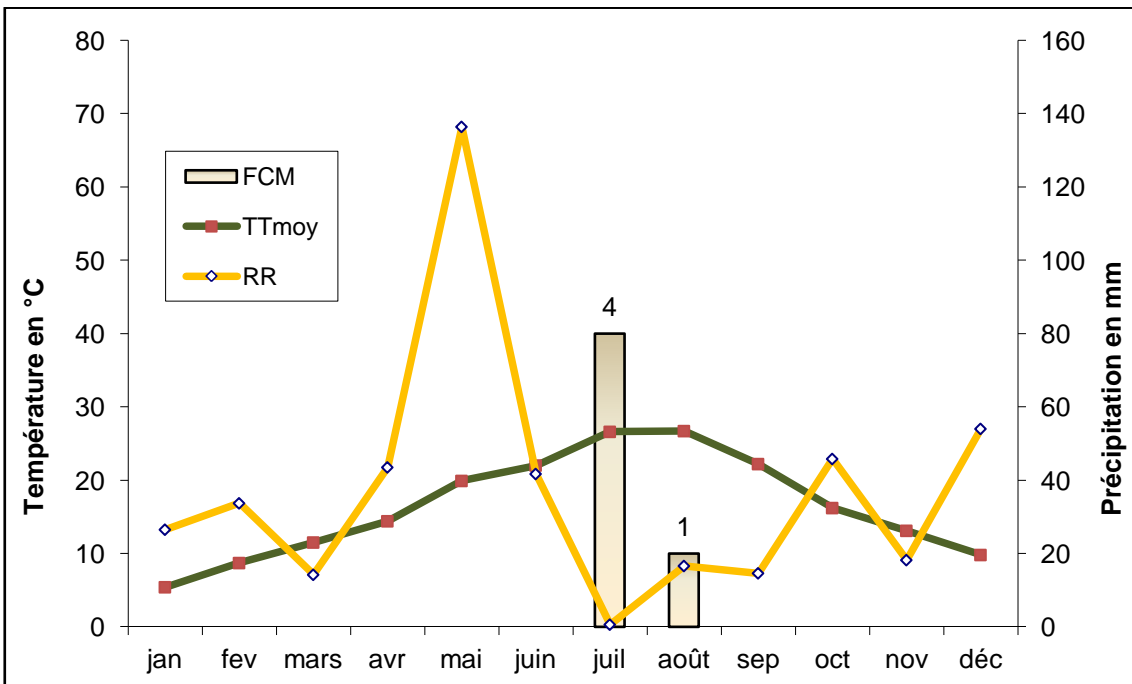


Figure 37. Courbe ombrothermique Guelma, (1999-2000).

CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

- Aspect dynamique

Le transport inter wilayas du cheptel malade peut être un moyen de propagation de la maladie. Cependant, la direction et la vitesse du vent sont aussi des facteurs déterminants dans la dispersion passive des insectes vecteurs de la maladie, préalablement infectés. A cet effet nous avons déterminé, à partir des données climatologiques disponibles pour quatre stations, les directions de déplacement éventuel des insectes. (Figures 38 à 41).

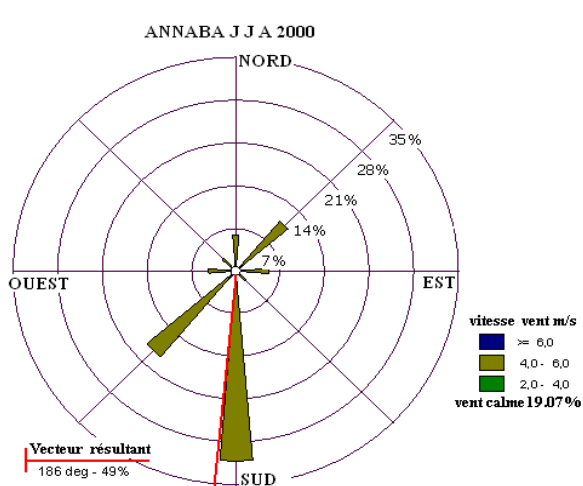


Figure 38. Direction probable de l'insecte vecteur à Annaba (juin, juillet et août 2000).

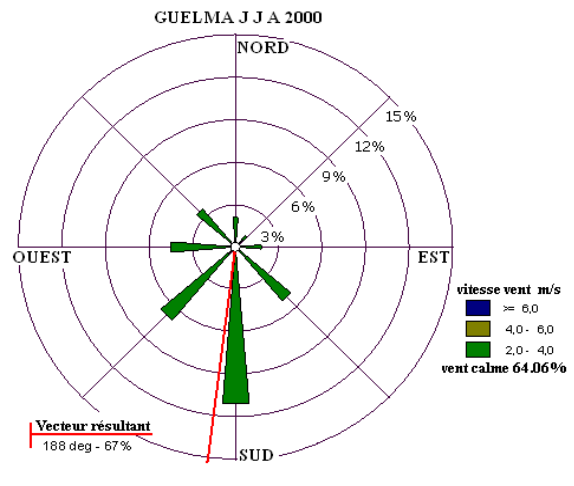


Figure 39. Direction probable de l'insecte vecteur à Guelma (juin, juillet et août 2000).

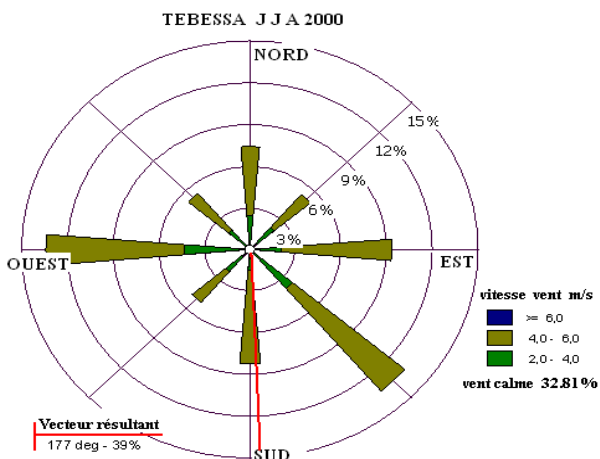


Figure 40. Direction probable de l'insecte vecteur à Tébessa (juin, juillet et août 2000).

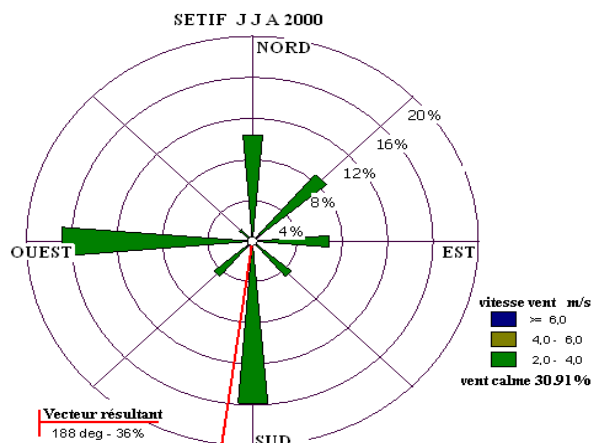


Figure 41. Direction probable de l'insecte vecteur à Sétif (juin, juillet et août 2000).

La direction dominante de déplacement des vents vers le Sud semble justifier l'aire de répartition de la maladie dans l'axe Annaba – Tébessa.

II.5.2. Cas de l'année 2006

Les premiers cas de FCM ont fait leur apparition dans les wilayas de Laghouat et El Bayadh. La maladie s'est ensuite propagée vers le nord et le centre du pays. Les statistiques fournies par l'OIE en 2006 nous ont permis de construire l'histogramme présentant le nombre de cas de FCM déclarés dans les onze wilayas du centre et Sud Ouest. (Figure 42)

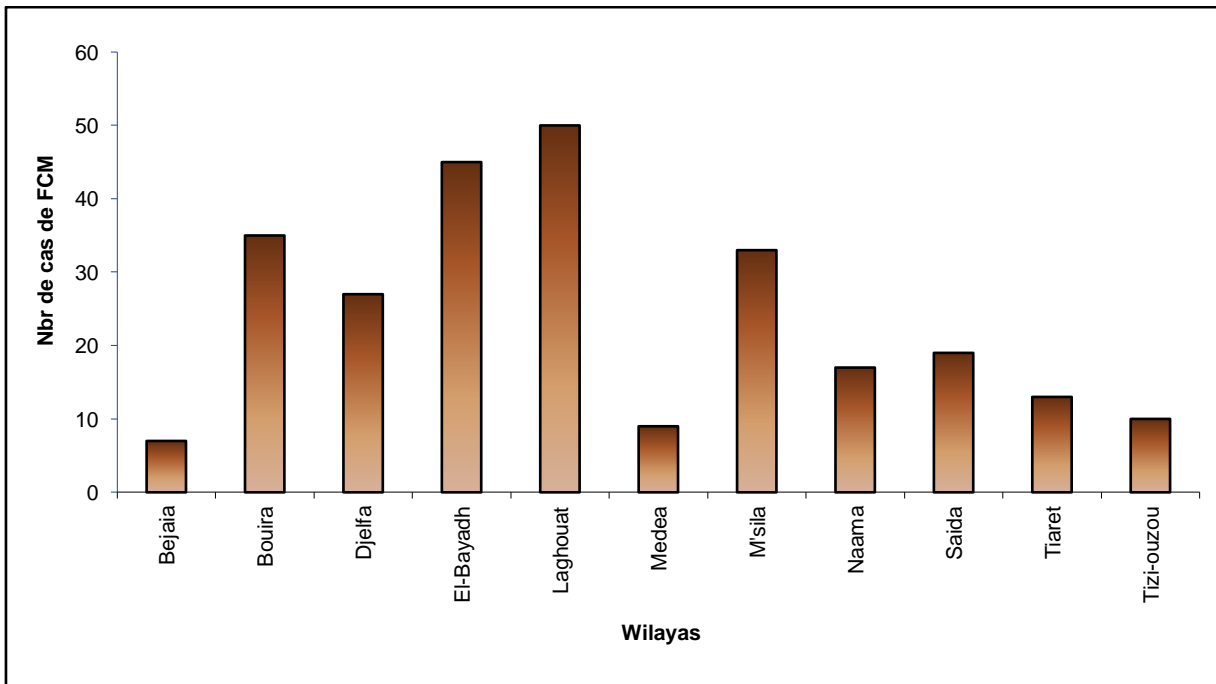


Figure 42 . Nombre de cas de la FCM par wilaya durant l'année 2006.

Comme la wilaya d'El Taref en 2000, la wilaya de Laghouat présente un nombre élevé de cas de FCM, du fait que la première invasion par l'insecte vecteur se fait souvent d'une manière massive.

II.5.2.1. Représentation de la région d'étude

Pour l'année 2006, la situation de la FCM semble se présenter différemment : ainsi des cas ont été simultanément observés à El Bayadh, Laghouat et Tizi-Ouzou en juillet 2006.

Tout comme pour l'année 2000, les paramètres climatiques semblent jouer un rôle déterminant dans l'occurrence de la maladie. En absence de données météorologiques relatives à la wilaya de Laghouat, nous lui avons substitué la wilaya de Bouira qui lui est comparable en termes d'incidence de la pathologie. Ainsi, pour l'année 2006, l'étude de

CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

l'influence du climat sur l'apparition et l'évolution de la maladie se fera à l'aide des données des stations d'El Bayadh, Tizi Ouzou et Bouira, répertoriées dans le tableau 8.

Tableau 8. Stations et données météorologiques disponibles pour l'année 2006.

| Station | Indicatif | Latitude | Longitude | Altitude(m) | Paramètres |
|------------|-----------|----------|-----------|-------------|---|
| El-Bayadh | 60550 | 33°40N | 01°00 E | 750 | - Températures mensuelle, moyenne, minimale et maximale |
| Bouira | 60417 | 36°23N | 03°53 E | 555 | - Humidité relative(%) - Précipitation mensuelle et bilan hydrique |
| Tizi-ouzou | 60395 | 36°42N | 04°03 E | 188 | - Vitesse et direction du vent |

II.5.2.2. Influence des paramètres climatiques

L'effet des principaux paramètres sur l'incidence de la maladie au niveau des trois wilayas considérées est représenté en figures 43 à 51 ci-après.

A. Température et incidence de la FCM

1. EL-Bayadh

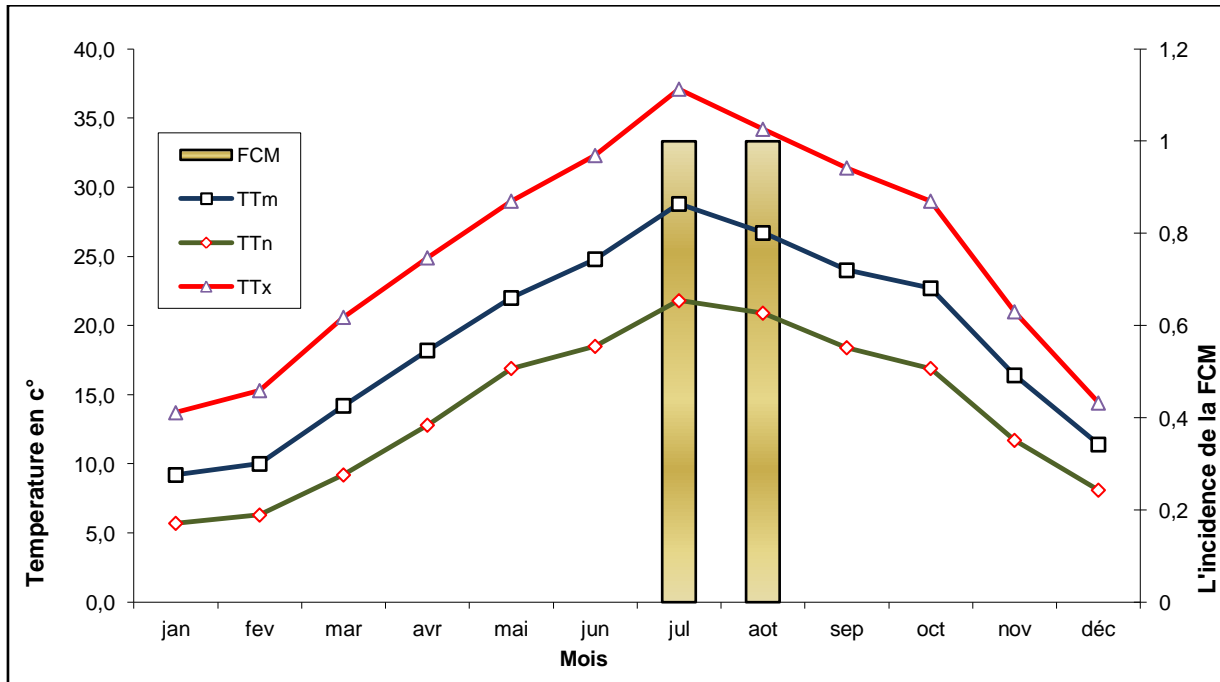


Figure 43 . Températures moyenne(TTm), minimale(TTn), maximale(TTx) et incidence de la FCM à El-Bayadh (année 2006).

CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

2. Bouira

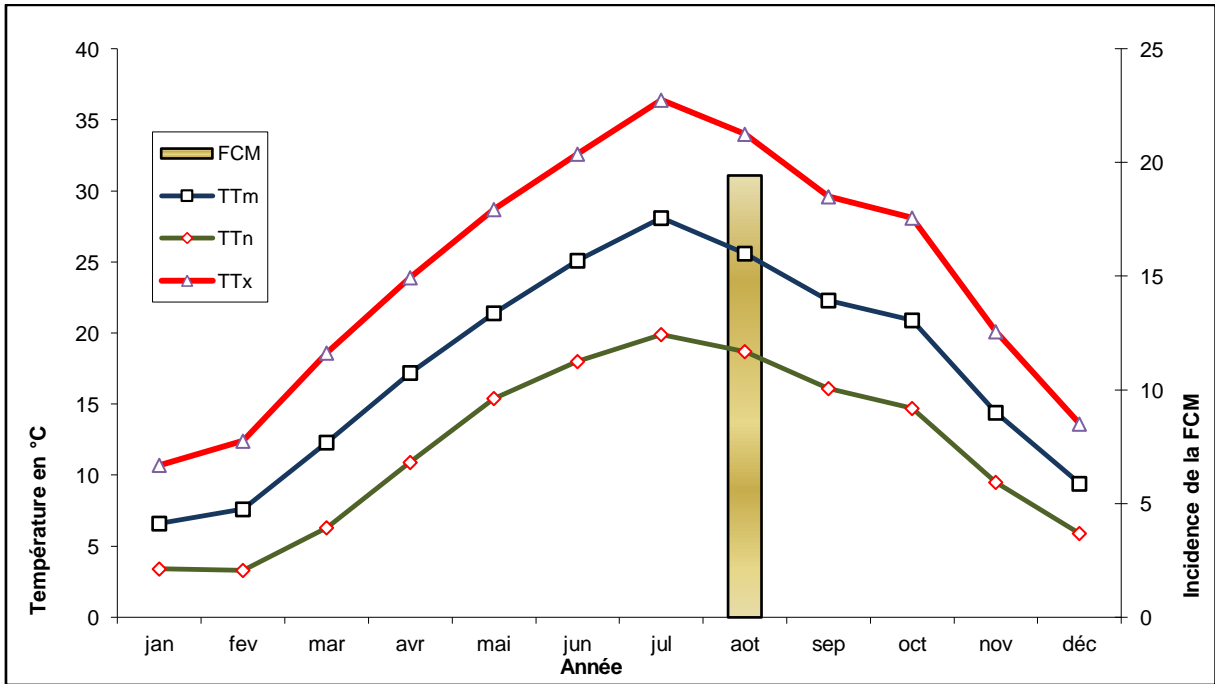


Figure 44 . Températures moyenne(TTm), minimale(TTn), maximale(TTx) et incidence de la FCM à Bouira (année 2006).

3. Tizi-ouzou

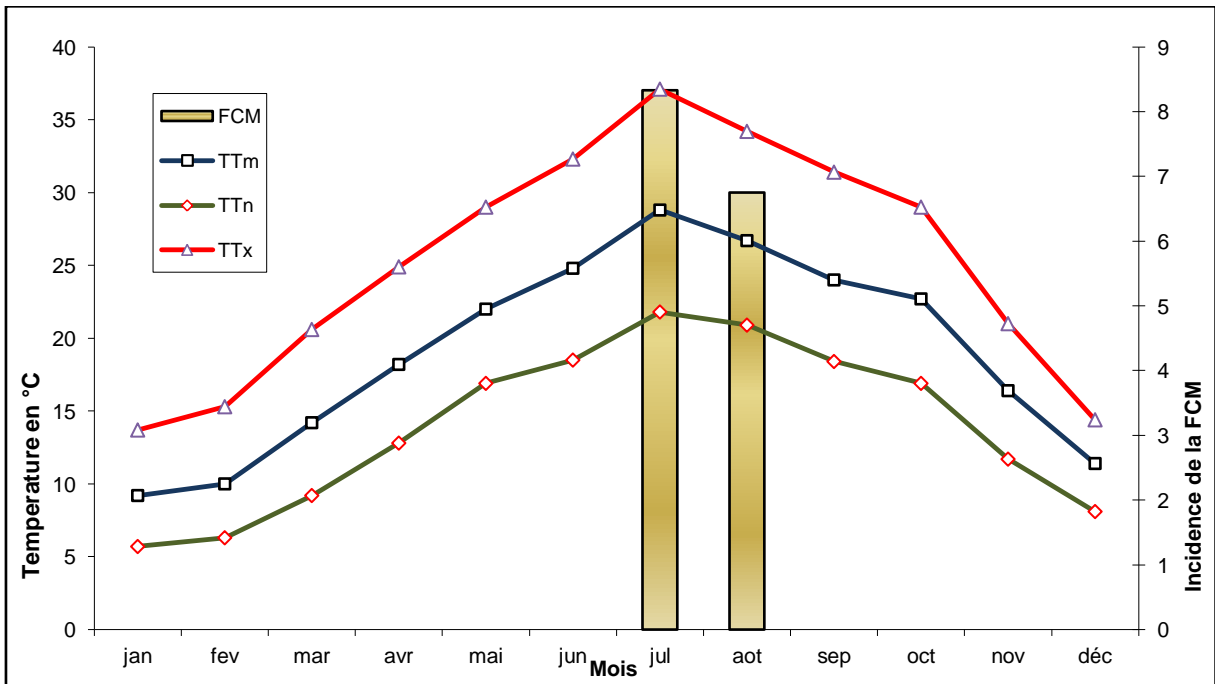


Figure 45 . Températures moyenne(TTm), minimale(TTn), maximale(TTx) et incidence de la FCM à Tizi-Ouzou (année 2006).

CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

L'examen des trois courbes ci-dessus montre le rôle favorable de la température moyenne dans l'évolution de l'incidence de la maladie, l'optimum de température étant de 25°C.

B. Humidité et incidence de la FCM

1. El-Bayadh

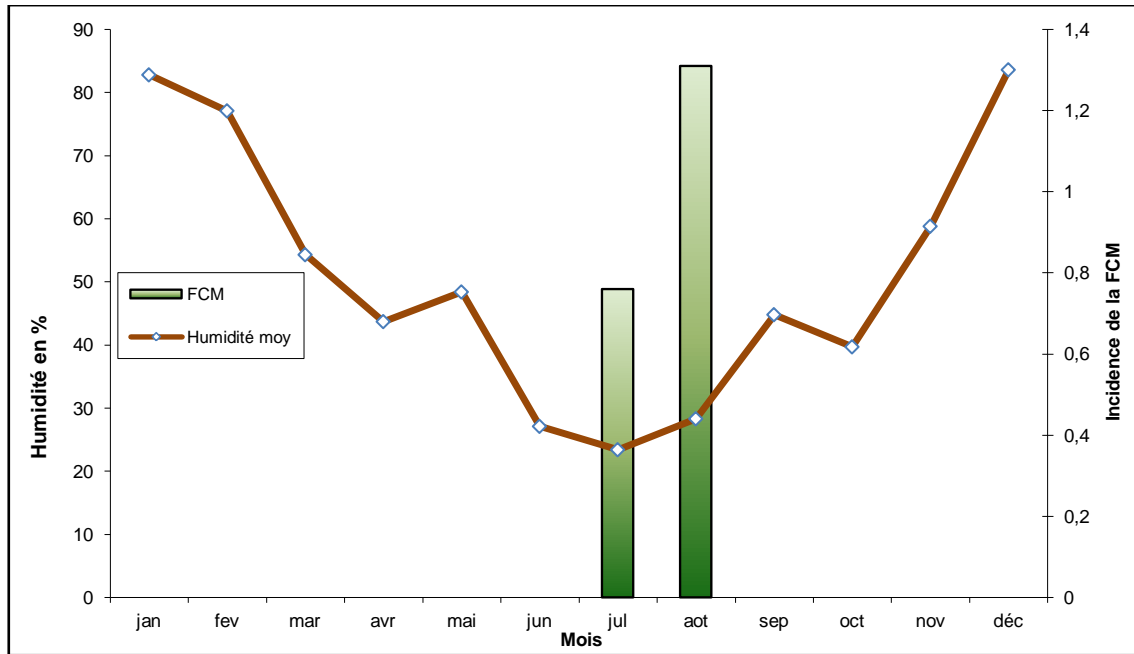


Figure 46 . Humidité moyenne mensuelle et incidence de la FCM à El-Bayadh (année 2006).

2. Bouira

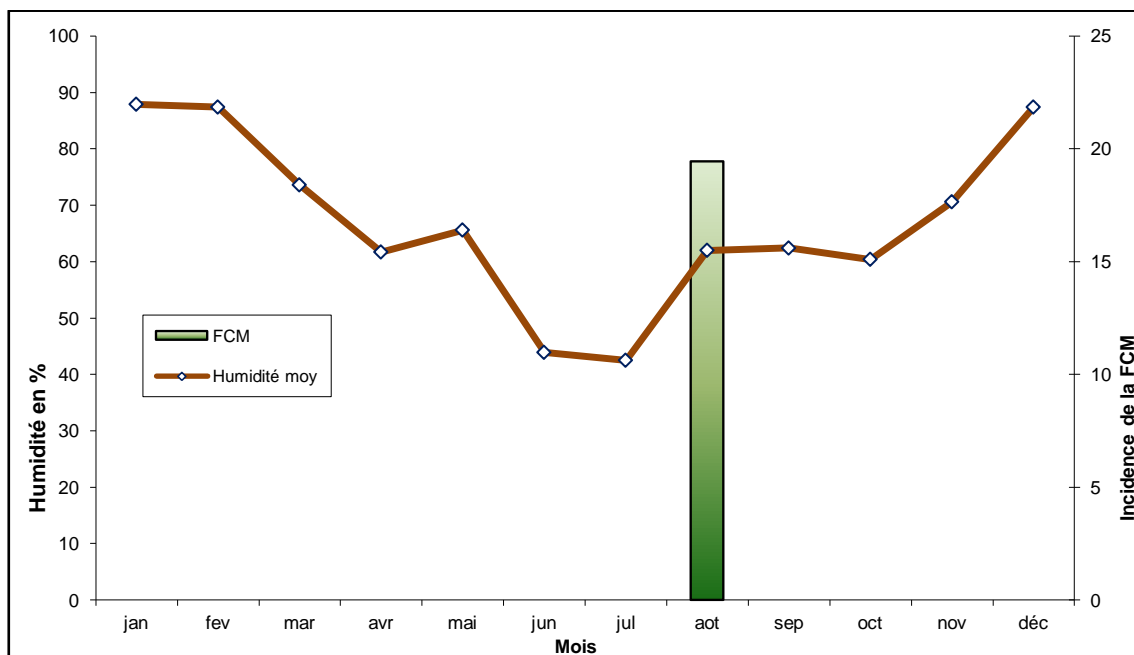


Figure 47 . Humidité moyenne mensuelle et incidence de la FCM à Bouira (année 2006).

CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

3. Tizi-Ouzou

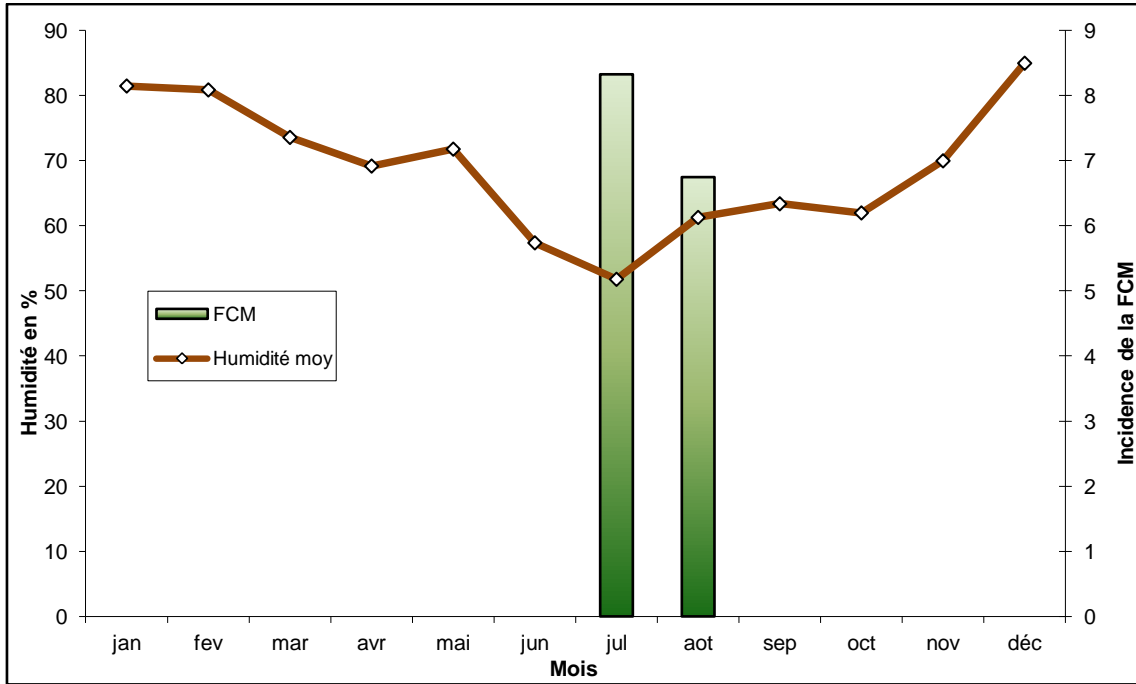


Figure 48 . Humidité moyenne mensuelle et incidence de la FCM à Tizi-Ouzou (année 2006).

La sécheresse de l'air provoque la dessiccation des œufs, des larves et la mort de l'insecte, d'où une diminution de la population et par suite une faible incidence de la maladie (cas de la région d'El Bayadh avec une incidence de l'ordre de 1,3).

C. Courbes ombrothermiques et incidence de la FCM

1. El-Bayadh

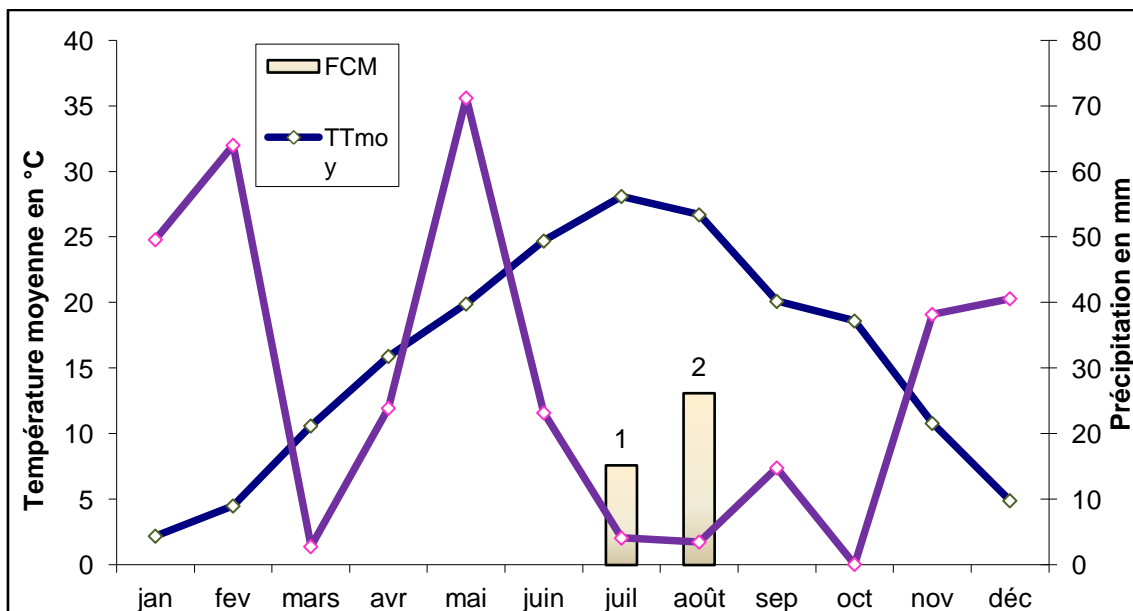


Figure 49 . Courbe ombrothermique (El-Bayadh, année 2006).

CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

2. Bouira

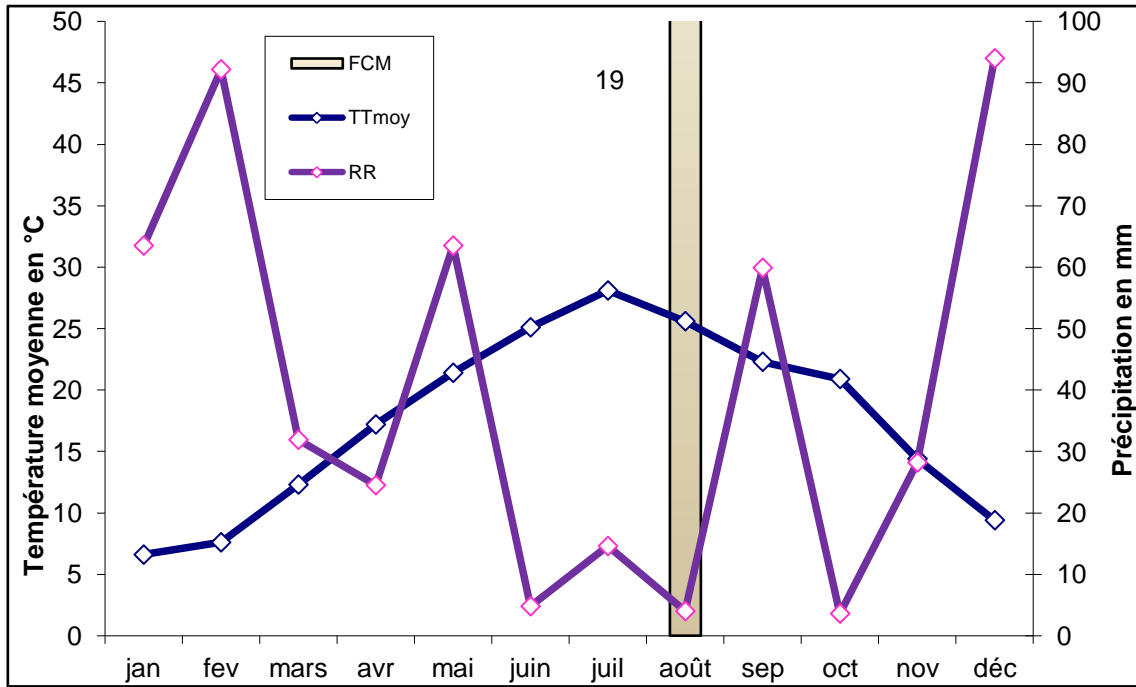


Figure 50 . Courbe ombrothermique (Bouira ,année 2006).

3. Tizi-Ouzou

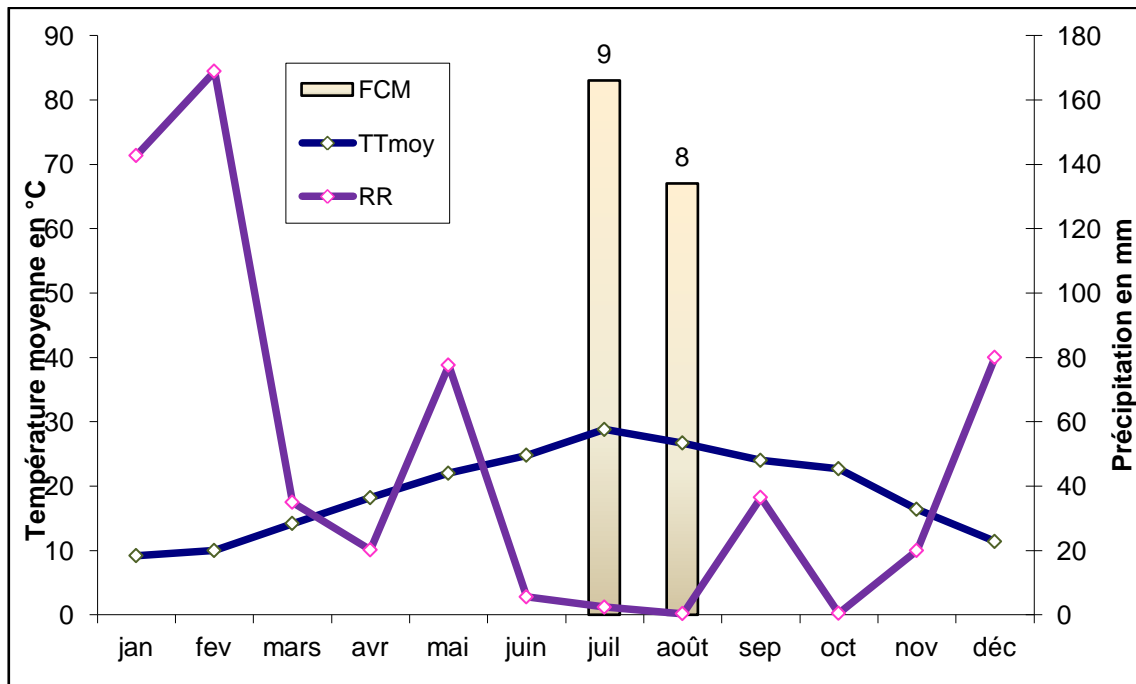


Figure 51 . Courbe ombrothermique (Tizi-Ouzou, année 2006).

CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

Les diagrammes de Gaussen établis pour les trois stations montrent que la période la plus propice à une activité vectorielle est juillet – août, notamment après une séquence pluvieuse et des températures clémentes favorable au cycle biologique de l'insecte.

D. Aspect dynamique

La fièvre catarrhale ovine étant une maladie à transmission vectorielle où l'acteur principal est un insecte dont la dispersion peut être active ou passive (transport par le vent), sa répartition géographique est en partie due au vent. Pour apprécier le rôle que semble jouer ce paramètre dans la distribution spatiale de la maladie, nous avons déterminé les directions de déplacement de l'insecte pour à travers les wilayas à la fois touchées par la maladie et dont les données climatologiques étaient disponibles pour l'année considérée (Figures 52 à 56). Les vecteurs résultants portés sur les roses de fréquences et directions des vents indiquent le sens de déplacement de l'insecte vecteur.

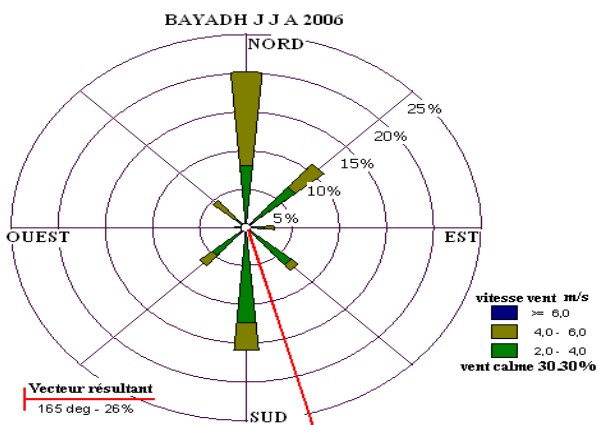


Figure 52 . Direction probable de l'insecte vecteur, El-Bayadh (juin, juillet et août 2006).

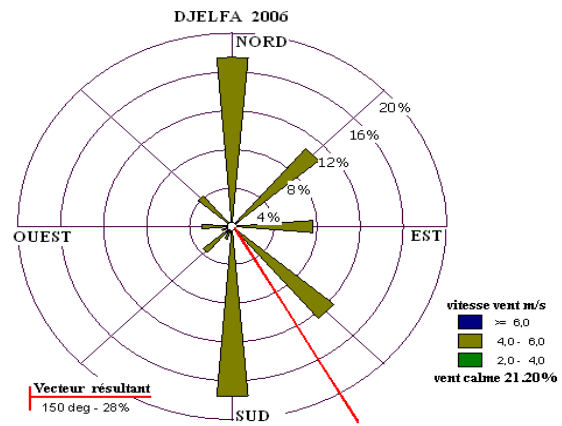


Figure 53 . Direction probable de l'insecte vecteur, Djelfa (juin, juillet et août 2006).

CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

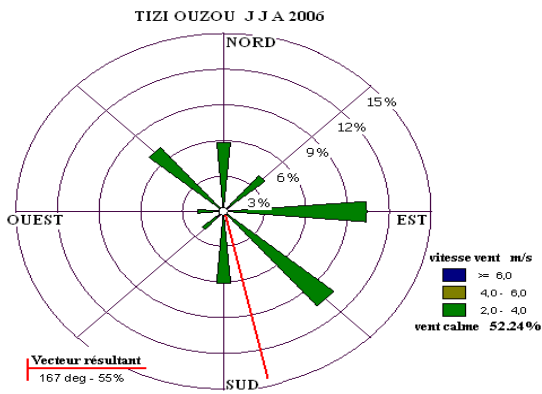


Figure 54 . Direction probable de l'insecte vecteur, Tizi-Ouzou (juin, juillet et août 2006).

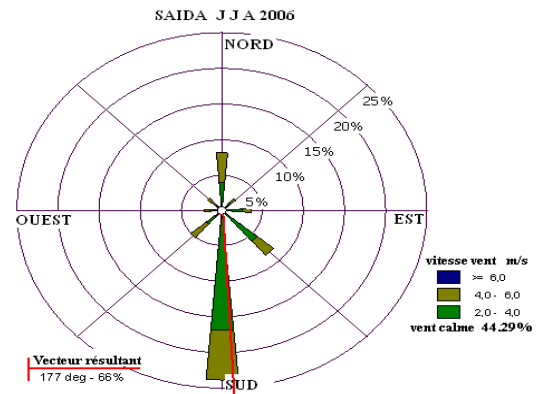


Figure 55 . Direction probable de l'insecte vecteur, Saida (juin, juillet et août 2006).

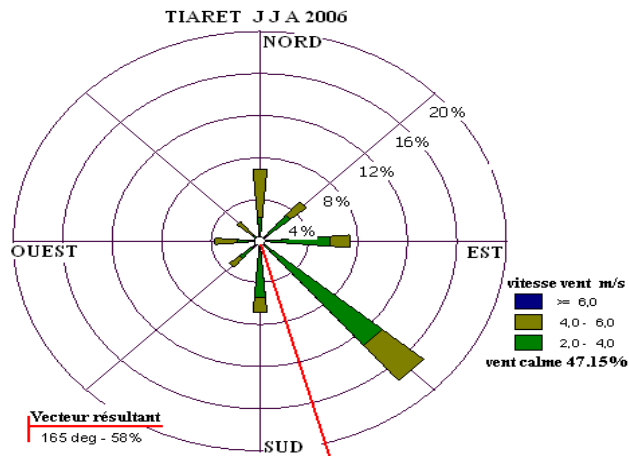


Figure 56 . Direction probable de l'insecte vecteur, Tiaret (juin, juillet et août 2006).

Les directions dominantes Nord -Sud pour El -Bayadh et Djelfa, Sud pour Saida et Sud Est pour Tizi-Ouzou et Tiaret semblent justifier, à postériori, la délimitation géographique des aires de contamination de la maladie et la configuration de l'épidémie telle que représentée précédemment en figure 18.

Conclusion

Dans le cas de la fièvre catarrhale du mouton, nous avons tenté d'expliquer le rôle, à l'échelle synoptique, des paramètres climatiques tels que la température, l'humidité, l'insolation, le vent etc.... dans l'émergence et la propagation de la maladie.

A priori, les températures élevées et les fortes humidités contribuent à la délimitation géographique de la maladie. En plus de leur proximité géographique avec le point de départ de la maladie, les régions Est du territoire assez arrosées, reçoivent en moyenne plus de 600 mm de pluie par an.

Cependant nous n'avons pas pris en considération d'autres facteurs micro climatiques (cours d'eau, lacs, chotts etc....) pouvant influencer sur son occurrence.

D'autre part, en l'absence de données chiffrées sur cette pathologie pour une période continue et assez longue, nous n'avons pu établir de relations quantitatives entre les facteurs climatiques dominants et la FCM.

En plus de la dynamique du cheptel lui-même et pouvant être à l'origine de la propagation de la maladie, le vent joue un rôle important dans la configuration spatiale des aires de contamination.

Il convient enfin de signaler que cette pathologie n'est pas une zoonose, c'est à dire non transmissible à l'être humain ni par contact direct ni par piqûre d'insectes.

La FCM ne constitue donc aucun danger pour l'homme, ni en cas de contact avec un ruminant contaminé, ni par la consommation de denrées animales (viande, lait, etc.).

GLOSSAIRE

Abattement : (nom masculin), Etat de faiblesse

Anorexie : (nom féminin), Absence d'appétit.

Arboviroses : (nom masculin), Maladie liée à un arbovirus. Ces virus sont principalement entretenus dans la nature par transmission biologique entre des hôtes vertébrés par l'intermédiaire d'arthropodes hématophages. Ils sont habituellement transmis, par morsure ou par piqûre de l'arthropode infecté, à des vertébrés réceptifs chez lesquels ils provoquent une virémie. Il en découle un cycle plus ou moins complexe à 3 acteurs : le virus, le vertébré et le vecteur. On parle de transmission biologique par opposition à la transmission mécanique (Anémie infectieuse des équidés, myxomatose, leucose enzootique etc.) qui ne nécessite pas une phase de multiplication du pathogène dans le vecteur.

Bovin,e (adjectif et nom commun) : Qui est de l'espèce du boeuf.

Buccal,ale (adjectif) Qui a rapport à la bouche.

Capacité vectorielle (nom féminin) ; La capacité vectorielle est une synthèse de tous les paramètres entomologiques nécessaires pour que la transmission d'un hôte vertébré à un autre puisse se faire : elle englobe la compétence, l'intensité du contact hôte/vecteur, la longévité du vecteur, paramètres qui sont sous dépendance d'un environnement donné. C'est une notion épidémiologique, équivalente aux taux de transmission pour les maladies contagieuses.

Cavité (nom féminin) : Vide, trou.

Chronique : Se dit des maladies qui durent longtemps et se développent progressivement.
Qui persiste.

Compétence : (nom féminin) ; La compétence traduit le potentiel qu'a un vecteur à s'infecter, multiplier et retransmettre un virus donné. C'est une notion biologique.

Crépusculaire : (adjectif) Relatif au crépuscule, à la clarté diffuse du lever ou du coucher du soleil.

Cyanose : (nom féminin) ; Coloration bleue de la peau produite par différentes maladies.

Diagnostiquer : (verbe transitif) ; Reconnaître une maladie d'après les symptômes.

Diptère : (adjectif et nom masculin) ; Qui a deux ailes.

Disséquer : (verbe transitif) ; Analyser.

Endémie : (nom féminin) ; Maladie qui règne habituellement dans un pays.

Entrevoir : (verbe transitif) ; Ne voir qu'imparfaitement.

CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

Epizootique : (adjectif) ; Qui a rapport à l'épizootie, épidémie qui atteint les animaux.

Espèce exophile : (nom masculin) ; Espèce piquant préférentiellement à l'extérieur

FCM : Appelée aussi fièvre catarrhale ovine (FCO) par l'administration vétérinaire française et blue tongue en anglais.

Fébrile : (adjectif) ; Qui tient de la fièvre. • Qui a de la fièvre

Fécondité : (nom féminin) ; Faculté de se reproduire. • Fertilité. • Aptitude à produire.

Gencive : (nom féminin) ; Muqueuse qui recouvre la base des dents.

Gîte : (nom masculin) ; Lieu où l'on demeure

Glande : (nom féminin) ; Organe animal ou végétal qui produit des sécrétions ou des excréctions chimiques.

Hémorragie : (nom féminin) ; Ecoulement du sang hors des vaisseaux sanguins.

Hématophage : Se nourrit de sang

Hôte : (nom féminin) ; Qui héberge un parasite ou qui est susceptible de l'héberger.

Imago : (nom masculin) ; Forme définitive d'un insecte qui a subi des métamorphoses.

Incidence : (nom féminin) ; L'incidence est le nombre de cas normalisé par rapport à une population

In utero : (loc.adv., loc.adj.inv.) ; A l'intérieur de l'utérus.

Jetage : (nom masculin) ; Ecoulement nasal abondant.

Latence : (nom féminin) ; l'adolescence, durant laquelle on peut observer une pause dans la sexualité

Longévité : (nom féminin) ; Longue durée de la vie. • Durée de la vie.

Morbide : (adjectif) ; Qui a rapport à la maladie.

Nymphe : (nom féminin) ; Insecte qui a quitté l'état de larve mais n'est pas encore à l'état parfait.

Oedème : (nom masculin) ; Gonflement survenant dans les tissus sous-cutanés par suite d'une infiltration de sérosités.

Petits diptères nématocères : (nom féminin) ; Insectes diptères (une paire d'ailes) avec de longues antennes articulées et des palpes maxillaires pendants.

Populations ovines naïves : (nom féminin) ; On qualifie de populations « naïves » les populations qui n'ont jamais rencontré l'agent pathogène considéré auparavant.

CHAPITRE II : IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FIEVRE CATARRHALE OVINE (Blue Tongue)

Préférences trophiques : (nom féminin) ; Indique la préférence du vecteur pour une espèce hôte par rapport à une autre.

Sérotype : (nom masculin) ; c'est le nom donné à la variété sérologique correspondant à une espèce (bactérie, virus).

Ulcération : (nom féminin) ; Lésion du tissu cutané s'étendant jusqu'au derme ou en-dessous.

Virémie : (nom féminin) ; Quantité de virus dans le sang, encore appelée charge virale.

Virologie : (nom féminin) ; Etude des virus.

Maladies de la Liste de l'Organisation Internationale d'Epizootie

Date de mise à jour : 02/03/2007

Maladies communes à plusieurs espèces

- Brucellose (*Brucella abortus*)
- Brucellose (*Brucella melitensis*)
- Brucellose (*Brucella suis*)
- Cowdriose
- Échinococcose/hydatidose
- Encéphalite japonaise
- Fièvre aphteuse
- **Fièvre catarrhale du mouton**
- Fièvre charbonneuse
- Fièvre de West Nile
- Fièvre de la Vallée du Rift
- Fièvre hémorragique de Crimée-Congo
- Fièvre Q
- Leptospirose
- Maladie d'Aujeszky
- Myiase à *Chrysomya bezziana*
- Myiase à *Cochliomyia hominivorax*
- Paratuberculose
- Peste bovine
- Rage
- Stomatite vésiculeuse
- Trichinellose
- Tularémie

Maladies des bovins

- Anaplasmose bovine
- Babésiose bovine
- Campylobactériose génitale bovine
- Coryza gangreneux (chez le gnou uniquement)
- Dermatose nodulaire contagieuse
- Diarrhée virale bovine
- Encéphalopathie spongiforme bovine
- Leucose bovine enzootique
- Péripleurite contagieuse bovine
- Rhinotrachéite infectieuse
- Bovine / vulvovaginite pustuleuse infectieuse
- Septicémie hémorragique
- Theilériose
- Trichomonose
- Trypanosomose (transmise par tsé-tsé)
- Tuberculose bovine

Introduction

La sécheresse est, dans le contexte du changement climatique actuel, le risque le plus probable et le plus à craindre en agriculture pluviale. En influant sur les différentes composantes du rendement, la sécheresse s'accompagne le plus souvent d'une baisse importante de la production agricole.

L'impact sur les rendements agricoles peut être déterminé soit expérimentalement, soit à l'aide de modèles de simulation de croissance.

Bon nombre de modèles de simulation tels les modèles CERES- MAÏS (Crop Environment Resource Synthesis), CERES-BLE, SWAP (soil–water–atmosphere–plant) et InFoCrop [Aggarwal PK, Kalra N, Chander S, et al 2006], ont été largement utilisés pour prévoir et apprécier d'éventuels impacts de la variabilité climatique, ainsi que l'inter dépendance climat-rendement sous divers scénarios du changement du climat.

Le tableau 9 ci-dessous donne un aperçu des modèles utilisés pour l'analyse de l'impact du changement climatique sur le rendement des cultures.

Tableau 9. Résumé des modèles utilisés dans l'étude de l'impact du changement climatique.

| Modèle | Culture | Impact |
|------------|---------|--|
| CERES-MAÏS | Maïs | Matière sèche |
| | Maïs | Production durable |
| | Maïs | Dates de semis et types de temps |
| | Maïs | Irrigation |
| CERES-BLE | Blé | Niveau de CO2 |
| | Blé | Précipitation et température létale |
| CERES-RIZ | Riz | Niveaux de CO2 |
| SWAP | Riz | Niveaux de CO2 |
| InFoCrop | Riz | Augmentation de CO2 et de température |
| GLYCIM | Soja | Température, précipitation et concentration en CO2 |

A défaut d'essais in situ, nous apprécierons l'impact de cet aléa climatique à l'aide du modèle de simulation de croissance du blé tendre mis au point par le Centre International de

Recherche Agricole en zones Arides (ICARDA) en coopération avec l'université de New England (Armidal, NSW Australie) (Stapper, 1984).

Ce modèle, dénommé SIMTAG (Simulation Model for Triticum Aestivum Genotypes) a été développé sur la base de la littérature ainsi que d'expérimentations conduites en Syrie. Le point de départ du SIMTAG était la première version du modèle CERES du blé développé par Ritchie et Al en 1983, en association avec USDA-ARS Agristars (TEXAS- USA).

Le blé a été sélectionné comme objet dans la simulation à cause de son importance dans l'alimentation humaine, de sa sensibilité aux aléas du climat, et enfin du volume considérable d'informations disponibles le concernant dans la littérature de par le monde.

Les travaux menés au Maroc en 1988 par El Mourid M. ont montré que l'application de ce modèle dans les régions arides et semi-arides est satisfaisante et donne des résultats probants pour les cultures céréalières, en particulier pour la culture du blé.

III.1. Théorie du modèle

Ce modèle intègre les effets des paramètres climatiques et simule la croissance et le développement de culture placée dans des conditions non limitantes de nutrition minérale. Il se base sur des principes physiologiques, génétiques, morphologiques et physiques. Le pas de temps utilisé est la journée afin d'être en accord avec le rythme naturel de développement de la culture. Le cycle végétatif de la culture nécessite, en plus de l'hygrométrie, des valeurs optimales des principaux paramètres climatiques qui régulent sa croissance et son développement. Parmi ces paramètres, on distingue :

III.1.1. L'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration potentielle (ETP) est la quantité maximale d'eau qui peut être évaporée par un gazon uniforme maintenu court et les réserves en eau du sol ne sont pas limitées.

Il convient de rappeler que l'évapotranspiration potentielle (ETP) notée *EO* dans ce modèle est calculée à l'aide de la formule de PENMAN corrigée. L'équation comporte un terme radiatif représentant le bilan de rayonnement et un terme aérodynamique qui décrit l'advection de vapeur d'eau. Dans l'équation initiale, ce dernier terme dépend de la vitesse du vent et du déficit de saturation. Dans ce modèle, le terme aérodynamique est exprimé seulement par le déficit de saturation pour réduire le nombre de variables climatiques. Le déficit de saturation défini comme étant la différence entre la pression de vapeur saturante et la pression de vapeur

CHAPITRE III : IMPACT DE LA SECHERESSE SUR LES PARAMETRES AGRONOMIQUES DU BLE

réelle, est habituellement calculé en fonction de l'humidité relative, de la température du thermomètre sec et mouillé ou de la température du point de rosée.

La forme analytique de l'ETP est donnée par:

$$EO = DODPG \times RADNET + (1 - DODPG) \times (1.275 \times VPDEF - 0.65)$$

- DODPG (le facteur d'équilibre) = $\frac{DELTA}{DELTA + GAMMA}$

- DELTA (est la pente de la courbe de tension de vapeur saturante) = Δ

$$\Delta = 17.4 \times VPSAT \times \left(\frac{1}{TAVG + 239} - TAVG \right)$$

VPSAT est la tension de vapeur saturante (Pa)

TAVG est la température moyenne journalière en $^{\circ}C$.

GAMMA représente la constante psychrométrique correspondant à 0.68 ($Pa.^{\circ}C^{-1}$);

VPDEF est le déficit de tension de vapeur (Pa);

$$RADNET \text{ (le rayonnement net)} = (1 - ALBEDO) \times \frac{RADSOL}{HTVAP} - RADLW;$$

$$ALBEDO = 0.23 - (0.23 - SALB) \times e^{-0.75 \times GAI}$$

SALB : albédo de la terre nue;

GAI : indice de surface verte ($cm^2.cm^{-2}$) est un rapport de dimension d'aire totale verte par unité d'aire cultivée

- RADSOL est le rayonnement solaire entrant en $mj.m^{-2}.mn^{-1}$ et est un paramètre d'entrée;

- HTVAP est la chaleur latente de vaporisation de l'eau en $mj.m^{-2}.mm^{-1}$,

$$HTVAP = 2.502 - 0.00283 \times TAVG$$

- RADLW est le rayonnement de grande longueur d'onde sortant en $mm.j^{-1}$ donné par:

$$RADLW = 2 \times 10^{-9} \times (TAVG + 273)^4 \times \left(0.56 - 0.08 \times \sqrt{VPACT} \right) \times (1 - 0.9 \times FO)$$

VPACT (pression de vapeur réelle);

$$FO \text{ (fraction de jours où le ciel est nuageux)} = \frac{(RADCLR - RADSOL)}{(0.8 \times RADCLR)}$$

$RADCLR$ (le rayonnement atteignant la surface terrestre en ciel clair) = $FRAC \times RADMAX$ en $Mj.m^{-2}$ où $RADMAX$ est le rayonnement de la limite supérieure de l'atmosphère et $FRAC$, la fraction de $RADMAX$ qui atteint la surface terrestre en ciel clair.

III.1.2. La transpiration de la plante

Les plantes exposées à l'atmosphère absorbent de l'énergie solaire. Cette énergie chauffe les parties exposées de la plante, principalement les feuilles et les tiges. Comme discuté auparavant, le protoplasme des cellules de la plante contient de l'eau. Le chauffage solaire évapore l'eau dans les cellules mésophylles de la feuille. La vapeur d'eau qui en résulte, s'échappe dans les espaces intercellulaires du mésophylle de la feuille. Une concentration accrue de la vapeur d'eau dans ces espaces intercellulaires provoque un gradient de vapeur d'eau entre la feuille et son environnement direct. La vapeur d'eau se diffuse dans l'atmosphère à travers les stomates de la feuille. L'ensemble de processus est appelé **TRANSPIRATION**.

L'énergie interceptée par la voûte céleste ($RADINT$) peut être calculée de la manière suivante:

$$RADINT = RADSOL \times (1 - e^{-k \times GAI}) \text{ en } MJ.m^{-2} \quad (1)$$

k est le coefficient d'extinction.

La transpiration potentielle (EPO) est déduite de l'évapotranspiration potentielle (EO) et de l'indice de surface verte (GAI) en utilisant une équation similaire à celle du facteur d'équilibre $DODPG$. La transpiration réelle (EP) sera nulle si GAI est nul. Toute l'énergie est utilisée pour la transpiration lorsque GAI est supérieur à 3. Le calcul de la transpiration potentielle (EPO) suppose plus de disponibilité en énergie pour la transpiration de la plante à n'importe quelle valeur de GAI que celle généralement déterminée dans les sites. Des mesures au champ ont montré de faibles quantités d'énergie interceptée pour un GAI similaire: 15% (AL-KHAFAF et AL, 1978), 20% (VAN KEULEN, 1975) dans les cultures en zone aride et inférieur à 30% avec des valeurs du coefficient d'extinction dans l'équation (1) de 0.62, 0.50 et 0.39 respectivement (RITCHIE, 1972).

Utiliser ces valeurs, c'est surestimer considérablement l'énergie, probablement à cause des simplifications des processus évoqués à la fois: la transpiration et l'évaporation du sol. Certains facteurs peuvent causer ces différences de définition du taux potentiel lorsqu'on calcule k. Nous aurons alors une équation d'EPO donnant des résultats satisfaisants:

$$EPO = AMINI[EO, EO \times (-0.23 + 0.71 \times \sqrt{GAI})]$$

III.1.3. L'évaporation du sol

Le programme permettant d'obtenir l'évaporation du sol est inspiré de la méthode décrite par RITCHIE en 1972 et aussi des applications récentes de cette méthode dans le modèle SERGF, CORNF et CERES. L'évaporation de la surface du sol (*ES*) est la quantité d'eau évaporée à la surface et correspond à la formation de matière sèche (il traduit l'utilisation de l'eau). Elle correspond aussi aux étapes de chute de taux. Au cas où le taux est constant au niveau 1, le sol est suffisamment humide de sorte que le transport et la perte de l'eau du sol aient un taux égal à l'évapotranspiration potentielle (*EOS*).

Dans l'étape de chute de taux au niveau 2, le volume d'eau à la surface du sol décroît au-dessous d'un seuil tel que l'évaporation de la surface du sol (*ES*) dépend du flux d'eau à travers la couche supérieure du sol à la surface d'évaporation. En suivant l'arrosage de la surface du sol et la quantité « d'assèchement » exigée avant le niveau 1, la chute éventuelle d'évaporation au-dessous de *ES* (évaporation réelle du sol) serait définie comme étant *U* (limite supérieure du premier stade de l'évaporation du sol) et est un paramètre d'entrée. Les différentes valeurs de *U* sont estimées entre 6 et 12 mm pour les différents sols, et sont ainsi proportionnelles à la conductivité hydraulique. L'évaporation cumulative pendant le premier niveau est *SUMES1*, l'étape 2 cumulative de « séchage », est notée *SUMES2* et peut être estimée par :

$$SUMES2 = ALPHAS^* \times (TIME)^{0.5} \quad (mm)$$

*ALPHAS** est une constante dépendant des propriétés hydrauliques du sol et *TIME* est le nombre de jours jusqu'au stade 2 d'évaporation. Les valeurs de *ALPHAS** étaient proportionnelles à la conductivité hydraulique et sont mesurées et rangées entre 3.3 et 5.1 (mm.j^{-0.5}). L'évaporation quotidienne pendant le deuxième stade peut être obtenue en calculant *SUMES2* du jour en cour et en soustrayant *SUMES2* du jour précédent :

$$ES = AMINI[EOS, (ALPHAS \times TIME^{0.5} - SUMES2)] \quad (\text{mm.}j^{-1})$$

SUMES1 et SUMES2 représentent respectivement l'évaporation cumulative du sol au stade 1 et 2; TIME, le temps atteint après le second stade d'évaporation; EOS, l'évaporation potentielle du sol.

RITCHIE a calculé *SUMES1* et *SUMES2* indépendamment des pertes par transpiration à partir du profil d'humidité du sol dans le cas de l'évaporation du sol. Ceci est valable pour les courtes périodes de sécheresse ou pour les cultures en ligne (coton, maïs). Ce procédé n'est pas valable, pour les longues périodes de sécheresse ou pour les rangs des cultures étroites (blé).

SUMES1 et *SUMES2* se rapportent dans ce modèle à l'assèchement de 150 premiers millimètres du profil, modifiés soit par l'extraction de l'eau par les racines, soit par l'évaporation. Ce qui est compatible avec les définitions des étapes 1 et 2 données précédemment.

III.1.4. Le rayonnement solaire maximal en jour clair

Le rayonnement extraterrestre est le rayonnement reçu par une surface placée perpendiculairement aux rayons solaires à l'extérieur de la voûte céleste.

Le rayonnement extra-terrestre incident (RADMAX) et le rayonnement parvenant à la surface de la terre pour une journée claire (RADCLR) sont calculés respectivement par les formules suivantes:

$$RADMAX = 37.23 \times RADIVC \times [HAS \times SISI + COCO \times SIN(HAS)]$$

Avec :

$$RADIVC = 1.001 - 0.03349 \times SIN[(JDATE - 94) \times CFDATR]$$

$$SISI = SIN(LAT \times CFDGTR) \times SIN(DECLIN \times CFDGTR)$$

$$COCO = COS(LAT \times CFDGTR) \times COS(DECLIN \times CFDGTR)$$

$$RADCLR = FRAC \times RADMAX$$

RADMAX est fonction de l'angle horaire du soleil (HAS), de la déclinaison (DECLIN), de la latitude (LAT), du vecteur rayon (RADIVC) et de la constante solaire ($117.0 \text{ m.j.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$). La distance du centre du soleil au centre de la terre exprimée en terme de longueur de l'axe

CHAPITRE III : IMPACT DE LA SECHERESSE SUR LES PARAMETRES AGRONOMIQUES DU BLE

moyen de l'orbite terrestre est symbolisée par RADIVC. Lors du passage de radiation maximale, une partie est dispersée et absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle du soleil. La fraction (FRAC) qui atteint finalement la surface du sol pour un jour clair est donnée par :

$$FRAC = -AA \times |JDATE - 182 \times HEMIS|^2 + BB \times |JDATE - 182 \times HEMIS| + CC$$

Où :

$$AA = 1.799 \times 10^{-6} \times e^{0.0273 \times LAT}$$

$$BB = 6.52 \times 10^{-4} \times e^{0.0273 \times LAT}$$

$$CC = 0.87 \times e^{-0.0064 \times LAT}$$

FRAC est dérivé des valeurs de radiation publiée par DEWIR en 1965. Les coefficients sont calculés en fonction de la latitude (LAT).

III.1.5. L'intensité du rayonnement solaire

Les quotients de rayonnement solaire par rapport à la longueur du jour et la rayonnement solaire par rapport à la température sont calculés quotidiennement. Ce sont donc respectivement SRQP(JDATE) et SRQT. Le dernier prend la valeur maximale de 2.5 quand la température moyenne absolue est très faible. L'intensité du rayonnement solaire est définie comme étant le produit de deux quotients. On a :

$$SRI(JDATE) = SRQP(JDATE) \times SRQT$$

Avec :

$$SRQP(JDATE) = \frac{RADSOL}{DAYLN}$$

$$SRQT = AMINI \left(2.5, \frac{RADSOL}{AMAXI(0.1, TAVG)} \right)$$

On calcule quotidiennement la moyenne de SRQP(JDATE) et SRI(JDATE) sur 30 jours afin d'éliminer les fluctuations jour après jour.

III.1.6. Les facteurs de gelée

On appelle gelée lorsque toute une partie du végétal a une température inférieure à 0° C. Néanmoins, il peut y avoir du gel sans aucun dégât. Les dégâts causés par la gelée résultent de la cristallisation pouvant prendre place soit dans les méats intercellulaires, soit à l'intérieur

CHAPITRE III : IMPACT DE LA SECHERESSE SUR LES PARAMETRES AGRONOMIQUES DU BLE

même des cellules, phénomène qui s'accompagne des réactions physiques et biochimiques irréversibles, aboutissant rapidement à la nécrose des tissus. La résistance au gel dépend :

- de l'espèce et de la variété du végétal.
- de l'âge de la cellule.
- de la concentration en suc (qui varie en fonction du stade phénologique).
- des conditions météorologiques préalables.
- de l'intensité et de la vitesse du gel, ainsi que du dégel.

Les différents types de gelées sont :

* Les gelées d'hiver dites « gelées noires » causant peu de dégâts en agriculture car elles interviennent en période de repos végétatif de la plante ;

* Les gelées d'automne peuvent causer des dégâts sur les fruits encore sur pied ;

* les gelées de printemps qui agissent sur les parties très sensibles de la plante (bourgeon, jeunes rameaux, fleurs).

La gelée est particulièrement nocive si elle survient au début de la phase d'élongation de la tige ou durant la phase levée-épiaison. Une gelée pendant la première période peut endommager la tige principale, alors qu'une gelée survenant à la seconde période peut causer la stérilité durant la germination.

Le facteur de gelée quotidien FROST découle des températures inférieures à 0⁰ C et cumulé durant la phase sensible. Le facteur total de gelée cumulé est appelé FROSTE.

lorsque le stade de levée est atteint, puis initialisé à zéro pour cumuler le facteur de gelée quotidien à la seconde période.

Les deux facteurs sont imprimés dans un fichier de sortie récapitulatif (WCROP). Ces facteurs ne sont pas utilisés pour influencer réellement sur la tige principale ou sur les nombres d'épis mais ils sont donnés pour montrer que les rendements peuvent être affectés par la gelée. Nous ne sommes pas en mesure de quantifier les effets de gelée sur l'évolution des rendements.

III.1.7. Thermopériodisme journalier

Le thermopériodisme est l'action biologique des alternances de température de rythme annuel ou quotidien.

Pour une bonne croissance, certaines plantes ont besoin d'une alternance de journées chaudes et de nuits fraîches. Les degrés et les cumuls de la température moyenne quotidienne au-dessus du zéro de végétation sont utilisés pour expliquer les différences de taux de développement entre les cultures. En 1980, STAPER et ARKIN ont révisé le concept de degrés jours. ROBERTSON a révisé en 1973 la littérature du blé et a trouvé que le zéro de végétation serait compris entre 0^o C et 5^o C. Pourtant C.GALLAGHER se basant sur une analyse en régression dans la quelle la variation résiduelle s'accroît rapidement avec la température de base supérieure à +3^o C et inférieure à -3^o C, choisit la température 0^o C comme zéro de végétation du blé d'hiver. Pour le blé de printemps, une température de base de 3^o C a été notée par FRENCH et AL. (1979). Plus récemment, ANGUS et AL.(1981) ont montré que la température de base change durant le cycle végétatif du blé. Il en est de même pour les autres cultures. Ils déduisent alors que la température de base est de 2.6^o C pour la phase sémis-levée, 3.5^o C de la levée à l'épiaison et 8.3^o C de l'épiaison à la maturité. Pour ce modèle, les températures de base utilisées sont :

- De la germination à la levée2.5^oC
- De la levée à l'épiaison..... 3^oC
- De l'épiaison au début de la maturité..... 5^oC
- Du début maturité à la fin maturité..... 8^oC.

Ces dernières valeurs choisies s'appuient sur les données recueillies sur les sites d'expérimentations (STAPPER, 1984). Les températures de base (DTT) sont des valeurs consignées dans la subroutine PHASI.

Si la température moyenne (TAVG) est inférieure à 20^o C, alors:

$$DTT=20 - TBASE.$$

TBASE : température de base utilisée dans le calcul de DTT ou le zéro de végétation.

Deux autres cas se présentent :

- Si $T_{MAXI} > T_{BASE} \Rightarrow DTT=0$.

- Si $T_{MINI} > T_{BASE} \Rightarrow DTT= T_{AVG} - T_{BASE}$.

Un facteur de température des conditions au sol ($TEMFSO$) a été introduit pour estimer les situations où la température d'un sol particulier s'écarte de la normale de liaison de température du système sol-air. Ceci peut être un résultat de différences soit des caractéristiques thermiques du sol soit de régime d'humidité. L'effet de la température du sol sur le développement de la plante est non négligeable et d'une nature très différente de celle de la lumière. Il intéresse surtout les racines et la vitesse d'absorption.

III.1. 8. La vernalisation

De nombreuses plantes ne peuvent fleurir que si elles sont soumises à des températures suffisamment basses pendant une période assez longue.

La vernalisation est le traitement par le froid (ou parfois par la chaleur) d'une graine en voie de germination ou d'une plantule en vue de modifier le déroulement du développement de la future plante. Beaucoup de plantes d'hiver ont besoin de la vernalisation pour fleurir. C'est le cas de la plupart des variétés de blé.

Il convient de remarquer que certaines variétés sont insensibles à la vernalisation. Les études sur les variétés de blé cultivées dans les mêmes champs et sous les conditions contrôlées (HALSE et WEIR, 1970, LEVI et PETTERSON, 1972, MIDMORE et AL. ,1982) ont montré ces différences de sensibilité. Ces études sont affinées par le traitement des semences imbibées qui sont partiellement ou totalement vernalisées dans des chambres froides avant le semis.

La vernalisation affecte davantage la phase germination-début floraison par la réduction de l'amorce de la feuille. La vernalisation sur une longue période réduit le temps de transpiration de l'anthere et engendre plus tôt l'émergence de l'épi. La vernalisation sur une courte période accélère le développement de la plante.

Cependant un développement normal pourrait se produire sans la vernalisation à certaines périodes de l'année. Il a été constaté que certaines variétés de blé répondant à la vernalisation peuvent avoir quelques avantages pour échapper au facteur de gelée. Le degré de vernalisation est habituellement exprimé en jours de vernalisation c'est à dire le nombre de jours ayant la température de vernalisation depuis la germination.

Certaines basses températures ont plus d'effet que d'autres. Les fractions de jour seront ajoutées aux jours de vernalisation si les températures sont inférieures aux températures optimales. La vernalisation peut se produire à des températures supérieures à 16⁰ C, selon certains auteurs (MIDMORE et AL., 1982).

Les jours de vernalisation (*VNDCUM*) sont calculés dans ce modèle, en utilisant la subroutine du modèle CERES (RITCHIE et AL.,1984). L'efficacité de vernalisation est calculée à partir de huit valeurs tri horaires de température comprises entre le maximum et le minimum quotidien. Il n'y a pas de vernalisation ($VD=0$), si la température est inférieure à 0⁰ C ou supérieure à 16⁰C. La vernalisation maximale se produit quand la température est comprise entre 0⁰ C et 8⁰ C. Les températures sont partiellement néfastes entre 8 et 16⁰ C. La vernalisation peut même se produire lorsque la température maximale est supérieure à 30⁰ C telle que :

$$VNDCUM = VNDCUM - 5 \times (TEMPMX - 30)$$

TEMPMX est la température maximale.

A cause des différentes variétés et méthodes utilisées dans des études antérieures, il est impossible de quantifier d'une façon satisfaisante l'effet de la vernalisation. L'interaction entre la vernalisation et la photopériode complique davantage la résolution de ce problème.

Le facteur de vernalisation *VNF* est utilisé pour calculer la durée de la photopériode *PTT* dans la subroutine STAGES, mais à ce stade de développement du modèle, il n'y a pas d'influence sur le résultat de la phase végétative car le paramètre génétique d'entrée *VNS* est sous estimé pour les variétés insensibles à la vernalisation.

III.1.9. Les pluies

La pluie est la source d'eau la plus importante pour le blé et le facteur déterminant des rendements. Le blé nécessite entre 400 et 600 d'eau de pluie par an, celle-ci doit être étalée et répartie uniformément durant tout le développement. Naturellement, toute réduction de l'alimentation hydrique se répercute sur les différentes fonctions du végétal et enfin sur la productivité.

L'eau a une action indirecte sur les rendements du blé mettant les éléments nutritifs à la disposition de la plante. Elle peut constituer un facteur limitant important dès la germination du blé, bien que sa capacité d'absorption puisse atteindre 40 à 60% de son propre poids.

CHAPITRE III : IMPACT DE LA SECHERESSE SUR LES PARAMETRES AGRONOMIQUES DU BLE

Le blé traverse en cours de végétation deux périodes critiques principales à l'égard de l'eau : l'un dans les 20 jours qui précèdent l'épiaison, l'autre au moment de la maturation.

Les périodes de sensibilité du blé au manque d'eau se situent de la montaison au grossissement du grain.

La consommation journalière en eau d'un blé pendant les phases et les phases et les suivantes :

- montaison : 3.5 mm/jour.
- épiaison - floraison : 6 mm/jour
- formation des grains : 7.5 à 8 mm/jour.
- maturité : 2.5 mm/jour

Plusieurs auteurs considèrent que 400 mm de pluie /an est limite inférieure au dessous de laquelle la céréaliculture n'est plus économique en ajoutant que ceci n'est pas valable pour toutes les régions car il convient de remarquer que dans le monde, les agriculteurs des régions semi-arides ont pu avoir une production céréalière de 34q/ha.

D'après (JUSSIAUX, 1954), les années sèches sont celles des belles récoltes en bonne culture dans les bonnes terres et que les années pluvieuses sont favorables dans les terres lourdes à condition que les récoltes ne soient pas envahies par les mauvaises herbes.

III.1.10. Bilan hydrique

Sachant que la pluie est variable dans l'espace et le temps, le bilan hydrique détermine l'évolution de la réserve d'eau utile pour les plantes à partir de la réserve disponible initiale et en comptabilisant d'une part les gains dus aux pluies et aux irrigations et d'autre part les pertes par évaporation. On néglige dans ce bilan hydrique le flux hydrique causé par les gradients hydrauliques car sa considération nécessitera plus de paramètres d'entrée pour le sol et plus de temps de calcul. Cela causera évidemment un déséquilibre dans le modèle de croissance de la plante.

III.2. Utilisation du modèle

SIMTAG opère selon l'organigramme présenté en annexe1. Un tour entier dans cet organigramme représente une boucle exécutée quotidiennement pour simuler une saison ou une année avec une seule variété. La première partie du programme principal attribue les

CHAPITRE III : IMPACT DE LA SECHERESSE SUR LES PARAMETRES AGRONOMIQUES DU BLE

fichiers de données d'entrée et de sortie, et requiert les paramètres de site (PARMS FILE), les données climatiques (CLIMET FILE), les cultivars (KVARTY) et les essais (KTRIAL).

La subroutine PROGI qui lit et initialise les données du sol et de la plante est appelée en premier. Un résumé de paramètres d'entrée figure dans le fichier de sortie WCROP. Les données climatiques quotidiennes sont lues au début du programme. Le nombre de jours depuis IBEGIN (NDS) et le nombre de semaines depuis IBEGIN (NW) tel qu'IBEGIN soit la date julienne du début de simulation, sont respectivement des compteurs de jours et de semaines. Le jour ND et le mois NM de la date calendaire sont calculés à partir des paramètres d'entrée JDATE qui est la date julienne.

Après avoir terminé une saison, il y a trois options: soit utiliser les mêmes données climatiques, soit utiliser les données climatiques de la saison suivante ou bien quitter. Le modèle peut être utilisé pour les mêmes données climatiques et un autre essai avec la même variété, ou le même essai avec la même variété (NEWVAR=1). Alternativement la simulation peut continuer en utilisant la même variété et le même essai pour les données climatiques de l'année suivante (MULTYR=1), avec un bilan hydrique constant d'une année à l'autre. Les données du sol et de la plante ne sont pas réinitialisés dans la subroutine du programme d'initialisation (PROGI) quand MULTYR=1.

La subroutine WRITE est appelée à la fin d'une compilation quotidienne. Cette subroutine génère un fichier de sortie WATER pour le bilan hydrique et un autre pour la croissance et le développement de la plante WGROW est donné en annexe 2.

La subroutine PHASI est utilisée pour initialiser à zéro certaines variables après qu'une nouvelle phase du développement soit atteinte. La subroutine DECIL est utilisée à la fin d'une série de simulations portant sur plusieurs années. Cela permet de calculer la fonction de fréquence cumulative pour chaque semaine de la saison concernée:

- le pourcentage d'eau disponible dans la zone des racines,
- la profondeur d'enracinement,
- la profondeur de la zone humide.

De même les fonctions de fréquences cumulatives sont calculées pour la longueur de la période de croissance, les différences entre les dates simulées et standards de germination, du

CHAPITRE III : IMPACT DE LA SECHERESSE SUR LES PARAMETRES AGRONOMIQUES DU BLE

début de la levée, de la maturité et le rendement en grains simulés. Les fréquences relatives calculées sont résumées dans le fichier de sortie DECILE.

La fonction ALIN permet de faire une interpolation linéaire entre les points dans la subroutine DECILE.

III.2.1. Entrées du modèle

L'exécution du modèle nécessite 5 fichiers d'entrée distincts pour chaque site considéré :

- **fichier paramètres (PARMS)**

Les données concernant le site et la gestion des cultures sont contenues dans ce fichier. Les informations suivantes y sont stockées : année du début et la date de la simulation respectivement désignée par IYEAR et IBEGIN, la date de semis, la densité de semis et la profondeur des semis, les numéros appropriés du sol (KSOIL) dans le fichier (sols), le programme d'irrigation (KIRR) dans le fichier irrigation (IRRI) les fréquences de sortie (KPOW) pour le bilan hydrique et KPOG pour la croissance.

- **fichier climat (CLIMET)**

Ce fichier renferme les données climatiques quotidiennes de température minimale, de température maximale, de précipitation et de rayonnement global.

- **fichier génétique (GENETS)**

Ce fichier contient les paramètres génétiques qui décrivent les variétés ou les cultivars de blé. Toutes les variétés donnent le même facteur de sensibilité à la vernalisation et sont pour la plupart des blés de printemps avec aucune ou très faible exigence en vernalisation.

Pour avoir les facteurs de réponse photopériodique d'un cultivar PPC et PPS, et les durées de la phase de développement DP1 et DP3, il suffit de disposer des données de développement des cultures (germination, initiation florale et anthère) à partir d'une série de semis.

- **fichier sol (SOILS) :**

Ce fichier contient des informations sur les profils du sol. Le paramètre CN2 est la capacité de rétention du sol a valeur de 40 a 90 pour des sols a fort potentiel de ruissellement.

La limite supérieure de la première étape d'évaporation du sol(U) est de l'ordre 5mm pour les sols sableux et de 12 mm pour le sol argileux. Le facteur de drainage (DRNDF) permet de

CHAPITRE III : IMPACT DE LA SECHERESSE SUR LES PARAMETRES AGRONOMIQUES DU BLE

drainer l'eau emmagasinée entre la limite supérieure de drainage (SWUL) et la saturation (SWSAT).

Le facteur de retrait d'eau du sol (SWWF) dépend de la relation entre l'humidité du sol et sa conductivité hydraulique. La valeur (SWWF) égale à 5 correspond à une redistribution de l'eau au-delà de 100cm, une valeur de 15 correspond à une redistribution au-delà de 50 cm de profondeur.

- fichier irrigation (IRRI).

Ce fichier contient des informations sur le programme d'irrigation utilisé dans les simulations. Chaque programme est identifié par un numéro KIRRI, par les dates d'irrigation JDAY et par les doses d'irrigation AIRR en mm.

CHAPITRE III : IMPACT DE LA SECHERESSE SUR LES PARAMETRES AGRONOMIQUES DU BLE

Récapitulatif des données d'entrée du modèle.

Les données d'entrée nécessaires à l'application du modèle sont :

| | |
|--|---|
| 1- <i>Données climatiques (quotidiennes)</i> | -Température maximale TEMPMX (°C) -Température minimale (°C) -Rayonnement solaire (MJ/m ²) -Précipitation, RAIN (mm). |
| 2- <i>Données agronomiques</i> | -Cultivar KVARTY -Date de semis, ISOW -Densité de semis, PLANTS (plants/m ²) -Profondeur de semis, SDEPTH (mm) -Date d'irrigation, JDAY(J) et quantité AIRR(J) (si c'est applicable). |
| 3- <i>Données pédologiques</i> | -Albédo de surface SALB (-) -Capacité de rétention, CN2 (-) -Valeur initiale d'évaporation du sol, U(mm) -Facteur de drainage, DRNF (mm/mm) -Facteur de retrait d'eau du sol, SWWF(-) -Facteur de température du sol TEMPSO (-) et les informations suivantes pour chaque couche du sol, NLAYR (contenu hydrique comme une fraction de volume) -Epaisseur de la couche, DLAYR(L) (mm) -Contenu initial de l'eau, SW(L) -Contenu en eau « air sec » SWAD(L) -Limite inférieure de l'eau du sol -Contenu de l'eau de saturation SWSAT (L). |
| 4 - <i>Données génétiques</i> | -Sensibilité photopériodique PPS (h ⁻¹) -Photopériode critique, PPC (h) - Cumul de températures entre l'émergence et l'initiation florale= DP1A (°C.J) - Cumul de températures entre l'émergence et l'anthère= DP3 (°C jour) -Sensibilité de vernalisation, VNS (-) -Facteur de croissance de grains, GGF (mg/°C/jour/noyau). |

III.2.2. Sorties du modèle

Les principales données d'entrée et de sortie sont présentées dans le fichier WCROP.

La subroutine WRITE génère le fichier de sortie WATER pour le bilan hydrique et le fichier WGROW pour la croissance de la culture. La sortie du modèle peut se faire chaque jour ou selon une fréquence spécifiée par les paramètres respectifs KPOW et KPOG. Les données

CHAPITRE III : IMPACT DE LA SECHERESSE SUR LES PARAMETRES AGRONOMIQUES DU BLE

climatiques et les taux d'évaporation sont moyennés sur l'intervalle KPOW dans le fichier de sortie KWATER.

Toutes les composantes du bilan hydrique annuel sont stockées sur le même fichier. Un bilan hydrique sur la période simulée est calculé, résumé et imprimé dans le fichier de sortie WCROP. D'autres résultats intermédiaires peuvent être inscrits dans le fichier de sortie WLEAF (croissance et développement de la feuille).

Ce dernier fichier peut être utilisé pour imprimer les résultats intermédiaires relatifs aux effets de la photopériode et de la vernalisation.

Des exemples de fichiers de sortie figurent dans l'annexe III. Ils résument la simulation par le modèle d'une variété de blé tendre pour les trois années, 1990-1991, 1991-1992 et 1993-1994 dans le site considéré.

III.2.3. Exécution de la simulation

C:\SIMTAGPC.EXE

Introduire le nom du fichier paramètre.

TIARET.PRM

Introduire le nom du fichier climatique

TIARET.DAI

Introduire le numéro de la variété

1..... (= KVARTY)

Introduire le nombre d'essai

1..... (= KTRIAL)

Introduire 0 (= une année) ou 1 (= plusieurs années)

1..... (=MULTYR)

Introduire 0 (= quitter) ou 1 (= autre variété)

1..... (= NEWVAR)

Introduire le numéro de la variété

2..... (= KVARTY)

Introduire le nombre d'essai

1..... (= KTRIAL)

CHAPITRE III : IMPACT DE LA SECHERESSE SUR LES PARAMETRES AGRONOMIQUES DU BLE

Introduire **0** (= quitter) ou **1** (= autre variété)

1

Introduire le numéro de la variété

111

Introduire le nombre d'essai

1

Introduire **0** (= une année) ou **1** (plusieurs années)

0

Introduire **0** (= quitter) ou **1** (= autre variété)

0

C:\EDIT WCROP.OUT

Le fichier DECILE de cet exemple n'est pas présenté à cause de l'insuffisance de série de données climatiques. Cette dernière doit avoir une taille minimale de dix années. Toutefois, il renferme les probabilités (valeurs de DECILE) des rendements en grains, de la longueur de période de croissance, de la germination, des dates de floraison et de maturité. Dans ce fichier, les dates de germination, de l'anthère et de la maturité sont présentées comme la différence avec les dates standards considérées au préalable.

Les fréquences relatives pour chaque semaine de la saison concernent:

- le pourcentage d'eau disponible dans la zone racinaire;
- la profondeur des racines;
- la profondeur d'arrosage.

III.2.4. Application du modèle

Pour les mêmes raisons que celles évoquées précédemment, nous appliquerons le modèle à la culture du blé. C'est une culture pluviale majoritairement répandue dans les plaines intérieures, les hauts plateaux ainsi que le littoral et dont les diverses variétés utilisées ont des exigences assez communes, notamment en matière de besoins en eau. La simulation a été effectuée avec 23 variétés de blé durant trois années agricoles caractérisées par des conditions

CHAPITRE III : IMPACT DE LA SECHERESSE SUR LES PARAMETRES AGRONOMIQUES DU BLE

climatiques particulières, soient 1990-1991, 1991-1992 et 1993-1994. Les caractéristiques génétiques de ces cultivars sont résumées dans le tableau 10 ci-après.

Tableau 10. Caractéristiques génétiques des variétés de blé tendre considérées.

| Variété | VNS* | PPS* | PPC* | DP1A* | DP3* | PHF* | GGF* |
|------------------|-------|------|------|-------|------|------|-------|
| MEXIPAK | 0.003 | 0.20 | 5.0 | 135 | 630 | 1.13 | 0.127 |
| EARLYSMALL | 0.003 | 0.20 | 5.0 | 102 | 583 | 1.00 | 0.127 |
| SEMIEARLYSMALL | 0.003 | 0.20 | 5.0 | 118 | 606 | 1.00 | 0.127 |
| MIDSMALL | 0.003 | 0.20 | 5.0 | 135 | 630 | 1.00 | 0.127 |
| LATEMIDSMALL | 0.003 | 0.20 | 5.0 | 176 | 671 | 1.00 | 0.127 |
| LATESMALL -VER) | 0.004 | 0.20 | 5.0 | 176 | 671 | 1.00 | 0.127 |
| YECORA 70 | 0.003 | 0.20 | 5.0 | 102 | 600 | 1.00 | 0.137 |
| KLOKA | 0.003 | 0.25 | 8.0 | 80 | 630 | 1.00 | 0.137 |
| EARLYMEDIUM | 0.003 | 0.20 | 5.0 | 102 | 583 | 1.00 | 0.137 |
| SEMI-EARLY-MED | 0.003 | 0.20 | 5.0 | 118 | 606 | 1.00 | 0.137 |
| MIDMEDIUM | 0.003 | 0.20 | 5.0 | 135 | 630 | 1.00 | 0.137 |
| LATEMIDMEDIUM | 0.003 | 0.20 | 5.0 | 176 | 671 | 1.00 | 0.137 |
| LATE MED (VERN.) | 0.004 | 0.20 | 5.0 | 176 | 671 | 1.00 | 0.137 |
| SENSLATE | 0.003 | 0.25 | 8.0 | 200 | 750 | 1.00 | 0.137 |
| INSENSLATE | 0.003 | 0.20 | 5.0 | 200 | 750 | 1.00 | 0.137 |
| SONALIKA | 0.003 | 0.25 | 5.0 | 102 | 583 | 1.00 | 0.157 |
| EARLYBIG | 0.003 | 0.20 | 5.0 | 102 | 583 | 1.00 | 0.157 |
| SEMIEARLYBIG | 0.003 | 0.20 | 5.0 | 118 | 606 | 1.00 | 0.157 |
| MIDBIG | 0.003 | 0.20 | 5.0 | 135 | 630 | 1.00 | 0.157 |
| LATEMIDBIG | 0.003 | 0.20 | 5.0 | 176 | 671 | 1.00 | 0.157 |
| LATEBIG | 0.004 | 0.20 | 5.0 | 176 | 671 | 1.00 | 0.157 |
| NASMA | 0.003 | 0.20 | 5.0 | 200 | 700 | 1.00 | 0.200 |

* La nomenclature des variables est donnée au paragraphe ci-dessus « Récapitulatif des données d'entrée du modèle ».

A l'issue de la simulation, nous avons sélectionné 10 variables quantitatives qui permettront d'une part de caractériser la croissance et le développement du blé et d'autre part de comparer son comportement physiologique sous des conditions climatiques différentes. (Tableau 11).

CHAPITRE III : IMPACT DE LA SECHERESSE SUR LES PARAMETRES AGRONOMIQUES DU BLE

Tableau 11. Liste des variables issues de la simulation.

| Nom de la variable | Signification |
|--------------------|--|
| Mat. Sèche | Matière sèche au-dessus du sol en g/m ² |
| Durée | Durée de la saison agricole en jours |
| Epi.m ² | Nombre d'épis par mètre carré de surface de sol |
| Nbf | Nombre de feuilles par plante |
| Pdep | Poids de l'épi à la maturité en g/m ² |
| Rdt | Rendement grain en g/m ² |
| Pdgm | Poids du grain à la maturité en mg |
| Tpro | Teneur en protéine du grain en % |
| Nbgr | Nombre de grains par épi |
| Poidrac | Poids des racines en g/m ² |

Ces variables sont calculées à l'aide d'équations suivantes :

1. La matière sèche

La production totale de matière sèche par plante GROPLA est calculée à partir du rayonnement photo synthétiquement actif (PAR) absorbé en utilisant l'équation suivante :

$$\text{GROPLA} = \text{ALPHA} \times \frac{\text{TEMCO} \times \text{SWDF1} \times \text{PAR}}{\text{PLANTS}} \text{ (g. plant}^{-1}\text{)}$$

où :

ALPHA est le facteur de conversion de matière sèche (g.MJ⁻¹).

PLANTS est la densité des plantes (plantes.m⁻²).

SWDF1 est le premier facteur de déficit hydrique affectant la production de matière sèche.

TEMCO est le facteur de température de sol affectant la production journalière de matière sèche.

2. Durée de la saison agricole : Durée

$$\text{GPL(NY)} = \text{IDAY6} - \text{IDAY9}$$

GPL (NY) est la longueur de la période de croissance de l'année NY

IDAY6 = Date de maturité, IDAY9= date de germination

3. Nombre d'épis par m² de surface

Le nombre minimal d'épis correspondant à une certaine densité de semis et non soumis au stress hydrique peut être décrit par l'équation suivante :

$$\text{SHOOTS} = \text{SHOOTS} + 1.1 \times \text{PHFRA} \times \text{PLANTS} \times \text{ORDER}$$

Où ORDER est un facteur qui garantit le développement de la talle secondaire sur les talles primaires de la tige principale.

PLANTS est le nombre de plantes établi après la levée (plantes.m⁻²)

PHFRA représente la fraction de phyllochron, soit la fraction totale de PHINT apparue dans une journée.

Elle est calculée à l'aide de la relation

$$\text{PHFRA} = \frac{\text{DTT}}{\text{PHINT}}$$

DTT représente le temps thermique journalier, dérive de la température quotidienne et le zéro de végétation TBASE, il est exprimé en degrés. Jours (°C.J)

PHINT désigne le phyllochron calculé par la relation :

$$\text{PHINT} = (98 - 3.33 \times \text{DAYLNC}) \times \text{PHF}$$

Où :

DAYLNC représente la longueur du jour civil, y compris le crépuscule (en heures)

PHF est le facteur de phyllochron, paramètre génétique d'entrée, régulateur du taux d'apparition des feuilles

Le phyllochron, ou taux d'apparition des feuilles, est défini comme le temps qui s'écoule entre l'apparition des feuilles successives. Il est généralement exprimé en unités de degrés-jours de croissance (DTT) par feuille. Les premiers travaux sur l'apparition des feuilles étaient largement descriptifs, et se concentrent sur l'emplacement dans la feuille où la croissance se produit, le taux d'allongement, et le nombre total de feuilles produites. La modélisation des cultures a suscité l'intérêt d'établir les équations pour prédire le phyllochron.

À partir de 1980, neuf équations ont été publiées pour prédire le phyllochron du blé. En 1980, Baker et al. ont publié une équation pour calculer le phyllochron du blé d'hiver en fonction de

la variation de la durée du jour qui suit immédiatement la levée pour un seul cultivar (Maris Huntsman) cultivé en Angleterre.

Deux hypothèses sont que le phyllochron est déterminé au moment de la levée des semis et qu'il reste relativement constant au cours de la saison de croissance. De nombreuses études appuient ces hypothèses (par exemple, Belford et al, 1987;. Delkolle et al, 1989;. Kirby et Eisenberg, 1966; Malvoisin, 1984; Masle et al, 1989.).

D'autres études, menées principalement en chambre expérimentales présentent des résultats contradictoires (Baker et al, 1986;. Boone et Wall, 1990; Cao et Moss, 1991; Hay et DelCcolle, 1989). Les résultats expérimentaux montrent que plus la date de semis est retardée, plus le phyllochron diminue (Baker et al, 1980; Jones et Allen, 1986; Kirby et Perry, 1987; Kirby et al, 1982, 1985).

Du fait de la variation de la durée du jour en fonction de la date de semis, les effets de celle-ci ont été considérés pour prévoir le phyllochron. En 1987, Kirby et Perry ont publié une équation similaire à celle de Baker et al. (1980), pour des cultivars australiens. Cao et Moss (1989a, b, c) ont mené une série d'expériences en chambre de croissance pour examiner la réponse du phyllochron de quatre blés d'hiver et quatre cultivars d'orge de printemps à des températures différentes, la durée du jour, et de leurs interactions.

L'expérience a suivi les quatre premières feuilles, qui peuvent avoir un impact sur les taux observés parce que l'embryon graine a généralement 3 à 4 feuilles primordia (Baker et Gallagher, 1983; Bo ~ ett, 1966; Lersten, 1987; Malvoisin, 1984) et les premières feuilles peuvent apparaître à un rythme plus rapide que les feuilles dont les ébauches n'ont pas été engagées dans l'embryon. Le but de leur expérience n'était pas de prédire le phyllochrone sur le terrain, mais plutôt de comprendre les effets de la température et de la photopériode sur le phyllochron (W. Cao, 1992).

L'équation de Cao et Moss (1989) suppose une relation curvilinéaire avec la température. Il s'agit d'un écart important de la prise en charge de Baker et al. (1980) et Kirby et Perry (1987) d'une relation linéaire avec la température. Cette approche permet au phyllochron de varier dans le temps avec la température, et n'a donc pas à supposer un phyllochron relativement constant dans le développement de la culture.

4. Nombre de feuilles par plante

Le nombre total des feuilles (LFNOFL) est déterminé lorsque la plante atteint l'initiation florale. L'initiation florale (DP1A) est un paramètre génétique d'entrée. Ce paramètre est très

important car il détermine non seulement la date d'initiation florale, mais également la date de la fin de l'épiaison, le nombre total de feuilles et l'indice foliaire. Une relation est établie entre le nombre total de feuilles et le cumul de températures de la germination à l'initiation florale, exprimé en degrés jours (DPGFI) (Figure 57).

$$LFNOFL = 4.0 + 0.0224 \times DPGFI$$

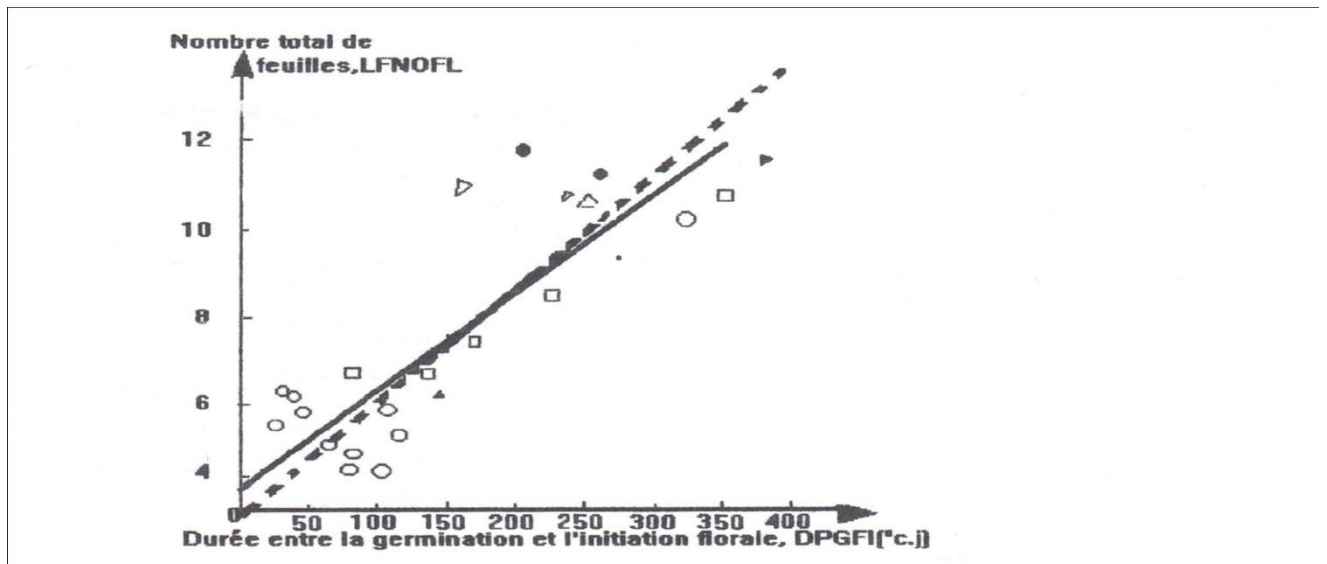


Figure 57. Corrélation entre le nombre de feuilles et le cumul de température de la germination à l'initiation florale (en °C.Jours).

5. Nombre de grains par épi

Il est donné par la relation :

$$KPPLT = KPSM / PLANTS$$

KPSM est le nombre réel de grains par mètre carré, donné par la relation

$$KPSM = 21.6 \times DWTANT$$

DWTANT = Poids sec à l'anthere en g. m⁻²

6. Poids de l'épi à la maturité

Le poids de l'épi est calculé par la formule suivante :

$$DWTSPA = DWTEAR * PLANTS$$

$$DWTEAR = GGF \times DTT \times KPPLT / 1000$$

CHAPITRE III : IMPACT DE LA SECHERESSE SUR LES PARAMETRES AGRONOMIQUES DU BLE

GGF représente le facteur de croissance du grain, introduit comme paramètre génétique déterminant le taux potentiel de croissance du grain (en mg. °C⁻¹).

7. Poids du grain à la maturité : Pdgr

Le poids du grain à la maturité est donné par la relation :

$$DWTGRN = DWTGRN + GROGRN \text{ avec}$$

$$GROGRN = GGF * DTT * KPPLT / 1000$$

GGF¹ désigne le facteur de croissance de grain. Introduit comme paramètre génétique, il définit le taux pote⁴ntiel de croissance de grain en en mg. °C⁻¹.J⁻¹.

8. Rendement : Rdt

Le rendement de l'année NY est donné par la relation :

$$GRNY(NY) = DWTGRN * PLANTS ;$$

9. Teneur en protéines : Tpro

Le contenu du grain en protéine est défini par :

$$GPC = (NITGR / GRNY(NY)) * 625$$

Où NITGR désigne l'azote contenu dans le grain (réel) exprimé en g.m⁻²

10. Poids des racines : Poidrac

Le poids des racines DWTRTA est donné par :

$$DWTRTA = GRORT * PLANTS \text{ (en g par mètre carré)}$$

$$GRORT = GROPLA * (1 - PTFRAC) \text{ où :}$$

GROPLA représente la production totale de matière sèche par plante

PTFRAC est la fraction de la production journalière de matière sèche par épi

Leurs valeurs respectives obtenues pour les trois années agricoles consécutives 90-91, 91-92 et 93-94 dont les cumuls pluviométriques annuels respectifs sont 380 mm, 339 mm et 173mm sont données dans les tableaux 12, 13 et 14 ci-dessous.

¹ Voir également le lexique de l'annexe II explicitant les noms de variables utilisées

CHAPITRE III : IMPACT DE LA SECHERESSE SUR LES PARAMETRES AGRONOMIQUES DU BLE

Tableau 12. Valeurs des variables résultant de la simulation pour la saison 1990-1991.

| Variété | Nom | Mat. Sèche | Duré | EpiM2 | Nbf | Pdep | Rdt | Pdgm | Tpro | Nbgr | Poidrac |
|---------|----------------|------------|------|-------|------|------|-----|------|------|------|---------|
| 1 | Mexipak | 963 | 224 | 266 | 10,3 | 314 | 256 | 24,3 | 14 | 39,5 | 115 |
| 2 | Mexico 120 | 817 | 218 | 316 | 8,9 | 343 | 250 | 25,2 | 13,8 | 31,4 | 93 |
| 3 | Condor | 939 | 227 | 250 | 11,1 | 339 | 269 | 24,7 | 13,7 | 43,5 | 127 |
| 4 | WW15 | 939 | 227 | 250 | 11,1 | 339 | 269 | 24,7 | 13,7 | 43,5 | 127 |
| 5 | Early small | 859 | 221 | 280 | 9,5 | 359 | 268 | 25,8 | 13,5 | 37,1 | 112 |
| 6 | Sem-Ear-small | 877 | 223 | 273 | 10 | 352 | 267 | 25,8 | 13,6 | 37,8 | 115 |
| 7 | Midsmall | 967 | 224 | 255 | 10,5 | 353 | 274 | 24,3 | 13,7 | 44,1 | 135 |
| 8 | latemidsmall | 1057 | 227 | 250 | 12 | 340 | 283 | 24,7 | 13,9 | 45,8 | 140 |
| 9 | Latesmall | 984 | 222 | 277 | 11,2 | 318 | 250 | 24,3 | 14,3 | 37,1 | 111 |
| 10 | NoviSad | 984 | 222 | 277 | 11,2 | 294 | 226 | 25,6 | 14,9 | 31,8 | 111 |
| 11 | Yecora 70 | 858 | 222 | 275 | 9,5 | 330 | 239 | 26,2 | 14,2 | 33,1 | 120 |
| 12 | Kloka | 815 | 231 | 250 | 9,6 | 309 | 221 | 24,3 | 14,5 | 36,5 | 167 |
| 13 | Early mediu | 859 | 221 | 280 | 9,5 | 344 | 253 | 27,9 | 13,9 | 32,4 | 112 |
| 14 | Semi Early-Med | 877 | 223 | 273 | 10 | 335 | 250 | 27,9 | 14 | 32,8 | 115 |
| 15 | Mid Medium | 967 | 224 | 255 | 10,5 | 329 | 249 | 26,2 | 14,2 | 37,2 | 135 |
| 16 | Senslate | 1337 | 240 | 250 | 14,8 | 403 | 358 | 27,6 | 13,9 | 51,8 | 272 |
| 17 | Insenslate | 1190 | 233 | 250 | 12,9 | 359 | 305 | 27,6 | 14,2 | 44,2 | 189 |
| 18 | Sonalika | 817 | 218 | 316 | 8,9 | 342 | 249 | 31,2 | 13,9 | 25,3 | 93 |
| 19 | Early Big | 859 | 221 | 280 | 9,5 | 351 | 260 | 31,9 | 13,7 | 29 | 112 |
| 20 | Semi Early Big | 877 | 223 | 273 | 10 | 342 | 256 | 31,9 | 13,8 | 29,4 | 115 |
| 21 | Midbig | 967 | 224 | 255 | 10,5 | 347 | 268 | 30,1 | 13,8 | 34,9 | 135 |
| 22 | Latemidbig | 1057 | 227 | 250 | 12 | 355 | 298 | 30,6 | 13,6 | 39 | 140 |
| 23 | Nasma | 1172 | 229 | 250 | 12,8 | 433 | 382 | 35,4 | 12,8 | 43,1 | 166 |

**CHAPITRE III : IMPACT DE LA SECHERESSE SUR LES PARAMETRES AGRONOMIQUES
DU BLE**

Tableau 13. Valeurs des variables résultant de la simulation pour l'année 1991-1992.

| Variété | Nom | Mat. Sèche | Durée | EpiM2 | Nbf | Pdep | Rdt | Pdgm | Tpro | Nbgr | Poidrac |
|---------|-------------------|------------|-------|-------|------|------|-----|------|------|------|---------|
| 1 | Mexipak | 144 | 233 | 280 | 10,4 | 41 | 38 | 24,8 | 33,7 | 5,5 | 33 |
| 2 | Mexico 120 | 113 | 218 | 375 | 9 | 62 | 54 | 30,8 | 32,2 | 4,6 | 26 |
| 3 | Condor | 167 | 227 | 250 | 10,9 | 42 | 37 | 25,5 | 33,1 | 5,8 | 38 |
| 4 | WW15 | 167 | 227 | 250 | 10,9 | 42 | 37 | 25,5 | 33,1 | 5,8 | 38 |
| 5 | Early small | 136 | 219 | 339 | 9,2 | 70 | 59 | 27,3 | 29,1 | 6,4 | 32 |
| 6 | Sem-Ear-small | 877 | 223 | 273 | 10 | 352 | 267 | 25,8 | 13,6 | 37,8 | 115 |
| 7 | Midsmall | 159 | 223 | 275 | 10,5 | 48 | 43 | 24,8 | 31,1 | 6,3 | 38 |
| 8 | latemidsmall | 273 | 227 | 250 | 12 | 65 | 58 | 25,5 | 25,3 | 9 | 50 |
| 9 | Latesmall | 185 | 222 | 273 | 11,5 | 51 | 47 | 25,1 | 28,9 | 6,9 | 40 |
| 10 | NoviSad | 185 | 222 | 273 | 11,5 | 53 | 50 | 26,5 | 28,3 | 6,9 | 40 |
| 11 | Yecora 70 | 135 | 221 | 327 | 9,2 | 67 | 56 | 25,8 | 29,6 | 6,6 | 33 |
| 12 | Kloka | 113 | 231 | 270 | 9,3 | 56 | 46 | 24,3 | 33,7 | 7,1 | 39 |
| 13 | Early medium | 136 | 219 | 339 | 9,2 | 71 | 60 | 27,7 | 28,9 | 6,4 | 32 |
| 14 | Semi Early Medium | 103 | 224 | 344 | 9,8 | 54 | 50 | 28,4 | 34,4 | 5,1 | 29 |
| 15 | Mid Medium | 136 | 219 | 339 | 9,2 | 71 | 60 | 27,7 | 28,9 | 6,4 | 32 |
| 16 | Senslate | 354 | 241 | 250 | 14,8 | 92 | 87 | 27,3 | 20,6 | 12,8 | 97 |
| 17 | Insenslate | 315 | 233 | 250 | 12,7 | 81 | 72 | 26,8 | 22,7 | 10,7 | 66 |
| 18 | Sonalika | 113 | 218 | 375 | 9 | 70 | 62 | 35,3 | 31 | 4,6 | 26 |
| 19 | Early Big | 136 | 219 | 339 | 9,2 | 70 | 59 | 27,2 | 29,1 | 6,4 | 32 |
| 20 | Semi Early Big | 103 | 224 | 344 | 9,8 | 57 | 52 | 29,9 | 33,9 | 5,1 | 19 |
| 21 | Midbig | 159 | 223 | 275 | 10,5 | 59 | 53 | 30,6 | 28,6 | 6,3 | 38 |
| 22 | Latemidbig | 273 | 227 | 250 | 12 | 78 | 71 | 31,5 | 22,9 | 9 | 50 |
| 23 | Nasma | 321 | 229 | 250 | 12,7 | 116 | 107 | 39,3 | 19,1 | 10,9 | 59 |

CHAPITRE III : IMPACT DE LA SECHERESSE SUR LES PARAMETRES AGRONOMIQUES DU BLE

Tableau 14. Valeurs des variables résultant de la simulation pour la saison 1993 – 1994.

| Variété | Nom | Mat. Sèche | Durée | EpM2 | Nbf | Pdep | Rdt | Pdgm | Tpro | Nbgr | Poidrac |
|---------|----------------|------------|-------|------|------|------|-----|------|------|------|---------|
| 1 | Mexipak | 156 | 230 | 250 | 10,5 | 29 | 28 | 25 | 38,3 | 4,5 | 70 |
| 2 | Mexico120 | 245 | 202 | 250 | 8,9 | 52 | 51 | 24,9 | 27 | 8,2 | 78 |
| 3 | Condor | 170 | 211 | 250 | 11 | 33 | 32 | 24,7 | 35,7 | 5,1 | 68 |
| 4 | WW15 | 170 | 211 | 250 | 11 | 33 | 32 | 24,7 | 35,7 | 5,1 | 68 |
| 5 | Early small | 230 | 205 | 250 | 9,3 | 50 | 48 | 25 | 27,9 | 7,7 | 85 |
| 6 | Sem-Earsmall | 205 | 207 | 250 | 9,9 | 44 | 42 | 25,3 | 30,2 | 6,6 | 78 |
| 7 | Midsmall | 62 | 211 | 375 | 10,5 | 45 | 43 | 24,3 | 29,5 | 7,1 | 87 |
| 8 | latemidsmall | 175 | 211 | 250 | 11,9 | 34 | 33 | 24,7 | 34,7 | 5,4 | 70 |
| 9 | Latesmall | 229 | 208 | 250 | 11,6 | 49 | 48 | 25,3 | 27,8 | 7,7 | 91 |
| 10 | NoviSad | 229 | 208 | 250 | 11,6 | 52 | 51 | 26,7 | 27,1 | 7,7 | 91 |
| 11 | Yecora 70 | 227 | 207 | 250 | 9,3 | 56 | 55 | 28,8 | 26,3 | 7,6 | 87 |
| 12 | Kloka | 181 | 215 | 250 | 9,4 | 38 | 37 | 26,5 | 32,5 | 5,6 | 101 |
| 13 | Early edium | 230 | 205 | 250 | 9,3 | 53 | 52 | 27 | 26,9 | 7,7 | 85 |
| 14 | SemiEarly-Med | 205 | 207 | 250 | 9,9 | 47 | 45 | 27,3 | 29,1 | 6,6 | 78 |
| 15 | Mid Medium | 217 | 208 | 250 | 10,5 | 48 | 47 | 26,2 | 28,4 | 7,1 | 87 |
| 16 | Senslate | 273 | 248 | 250 | 14,6 | 69 | 67 | 28,2 | 23,5 | 9,6 | 88 |
| 17 | Insenslate | 245 | 202 | 250 | 8,9 | 64 | 63 | 30,8 | 24,4 | 8,2 | 78 |
| 18 | Sonalika | 245 | 202 | 250 | 8,9 | 64 | 63 | 30,8 | 24,4 | 8,2 | 78 |
| 19 | Early Big | 230 | 205 | 250 | 9,3 | 61 | 59 | 30,9 | 25,3 | 7,7 | 85 |
| 20 | Semi Early Big | 205 | 207 | 250 | 9,9 | 53 | 52 | 31,3 | 27,3 | 6,6 | 78 |
| 21 | Midbig | 217 | 208 | 250 | 10,5 | 55 | 54 | 30,1 | 26,7 | 7,1 | 87 |
| 22 | Latemidbig | 175 | 211 | 250 | 11,9 | 42 | 41 | 30,5 | 31,3 | 5,4 | 70 |
| 23 | Nasma | 180 | 213 | 250 | 12,9 | 54 | 54 | 38,9 | 27,5 | 5,6 | 76 |

III. 2.5. Analyse des résultats

Il s'agit d'apprécier l'impact de la sécheresse sur les différents paramètres (représentés ici par les variables issues de la simulation) caractérisant le cycle de développement du blé.

CHAPITRE III : IMPACT DE LA SECHERESSE SUR LES PARAMETRES AGRONOMIQUES DU BLE

Cependant, il est nécessaire de vérifier la pertinence de ces variables et s'assurer que la majorité des cultivars répond de manière uniforme à ce phénomène ; ceci nous permettra notamment de généraliser les résultats à travers un type de cultivar donné. Pour cela, nous avons soumis les tableaux 12, 13 et 14 correspondant aux trois années agricoles simulées et constitués chacun de 10 colonnes(variables) et 23 lignes (variétés) à une analyse multi variée, de type analyse en composantes principales.

L'analyse effectuée selon le schéma classique fournit, pour chaque année les statistiques élémentaires, les valeurs propres ainsi que la matrice de corrélations.

1. Année agricole 1990-1991

- Statistiques élémentaires :

| Variable | Moyenne | Ecart-type |
|-----------|---------|------------|
| Mat.sèche | 958,174 | 29,296 |
| Durée | 224,826 | 4,869 |
| EpiM2 | 267,435 | 19,135 |
| Nbf | 10,709 | 1,406 |
| Pdep | 344,783 | 28,006 |
| Rdt | 269,565 | 36,509 |
| Pdgm | 27,313 | 3,045 |
| Tpro | 13,896 | 0,393 |
| Nbgr | 37,404 | 6,267 |
| Poidrac | 132,913 | 37,207 |

- Valeurs propres :

Les valeurs propres représentent la variance des individus (c.à.d. les diverses variétés de blé considérées) sur l'axe correspondant (Figure 58).

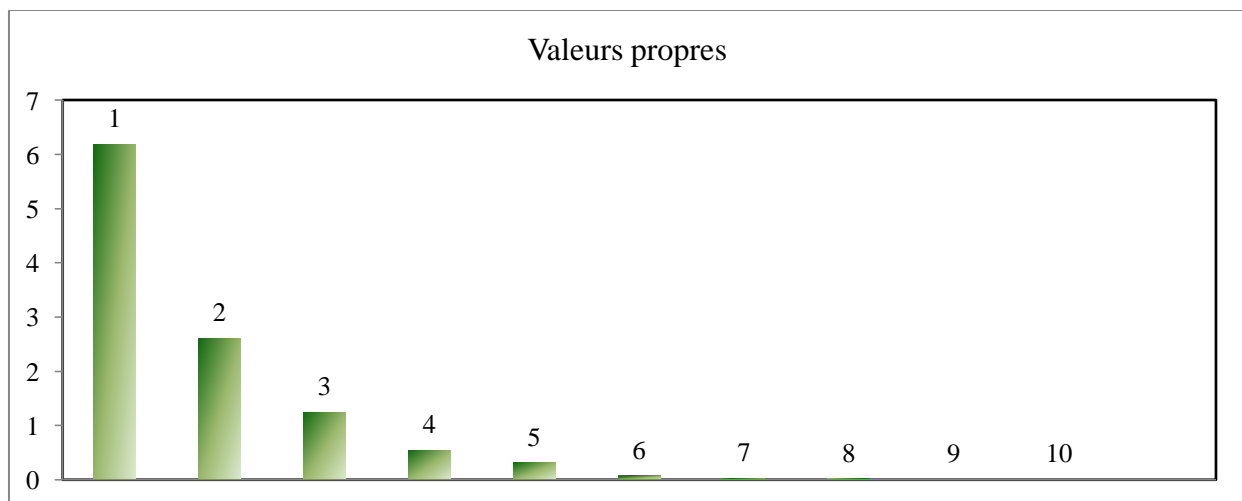


Figure 58. Valeurs propres sur les axes principaux.

CHAPITRE III : IMPACT DE LA SECHERESSE SUR LES PARAMETRES AGRONOMIQUES DU BLE

Cependant ces variances respectives de 6,066 sur le premier axe ; 2,294 sur le second axe etc. ne sont pas facilement interprétables ; aussi chaque valeur propre (ou encore chaque variance) est exprimée en valeur relative (c'est-à-dire en pourcentage) de la variance totale (somme des valeurs propres) dans la troisième ligne du tableau 15.

Tableau 15. Pourcentage de variance expliquée par les axes principaux.

| | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 | F6 | F7 | F8 | F9 | F10 |
|---------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Valeur propre | 6,17 | 2,60 | 1,25 | 0,541 | 0,313 | 0,067 | 0,025 | 0,016 | 0,008 | 0,004 |
| % variance | 56,16 | 23,6 | 11,3 | 4,9 | 2,8 | 0,6 | 0,3 | 0,14 | 0,07 | 0,03 |
| % cumulé | 56,16 | 79,80 | 91,1 | 96,0 | 98,8 | 99,4 | 99,7 | 99,84 | 99,91 | 99,94 |

- Matrice de corrélation :

La matrice des corrélations (tableau 16) met en évidence la contribution d'un grand nombre de variables à la synthèse du rendement, parmi lesquelles on distingue la matière sèche élaborée, de nombre de feuilles et le poids des racines (valeur élevée des coefficients de corrélation respectifs avec le rendement Rdt).

Tableau 16. Matrice de corrélation entre les variables considérées.

| | Mat. sèche | Durée-saison | EpM2 | Nbf | Pdep | Rdt | Pdgm | Tpro | Nbgr | Poidrac |
|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Mat. se | 1 | 0,802 | -0,599 | 0,977 | 0,582 | 0,823 | 0,172 | -0,145 | 0,771 | 0,827 |
| Durée- | 0,802 | 1 | -0,756 | 0,846 | 0,443 | 0,642 | -0,002 | -0,030 | 0,802 | 0,954 |
| EpM2 | -0,599 | -0,756 | 1 | -0,662 | -0,229 | -0,440 | 0,075 | 0,099 | -0,762 | -0,620 |
| Nbf | 0,977 | 0,846 | -0,662 | 1 | 0,528 | 0,787 | 0,114 | -0,114 | 0,804 | 0,827 |
| Pdep | 0,582 | 0,443 | -0,229 | 0,528 | 1 | 0,924 | 0,594 | -0,791 | 0,441 | 0,542 |
| Rdt | 0,823 | 0,642 | -0,440 | 0,787 | 0,924 | 1 | 0,472 | -0,651 | 0,659 | 0,687 |
| Pdgm | 0,172 | -0,002 | 0,075 | 0,114 | 0,594 | 0,472 | 1 | -0,515 | -0,289 | 0,082 |
| Tpro | -0,145 | -0,030 | 0,099 | -0,114 | -0,791 | -0,651 | -0,515 | 1 | -0,230 | -0,040 |
| Nbgr | 0,771 | 0,802 | -0,762 | 0,804 | 0,441 | 0,659 | -0,289 | -0,230 | 1 | 0,732 |
| Poidrac | 0,827 | 0,954 | -0,620 | 0,827 | 0,542 | 0,687 | 0,082 | -0,040 | 0,732 | 1 |

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil $\alpha=0,050$ (test bilatéral)

CHAPITRE III : IMPACT DE LA SECHERESSE SUR LES PARAMETRES AGRONOMIQUES DU BLE

2. Année agricole 1991-1992

- Statistiques élémentaires :

| Variable | Moyenne | Ecart-type |
|--------------|---------|------------|
| Mat.sèche | 208,826 | 29,296 |
| Durée-saison | 224,739 | 5,674 |
| EpiM2 | 295,217 | 43,562 |
| Nbf | 10,578 | 1,481 |
| Pdep | 76,870 | 61,009 |
| Rdt | 66,304 | 45,544 |
| Pdgm | 27,974 | 3,539 |
| Tpro | 28,339 | 5,262 |
| Nbgr | 8,365 | 6,603 |
| Poidrac | 43,565 | 22,012 |

- Valeurs propres :

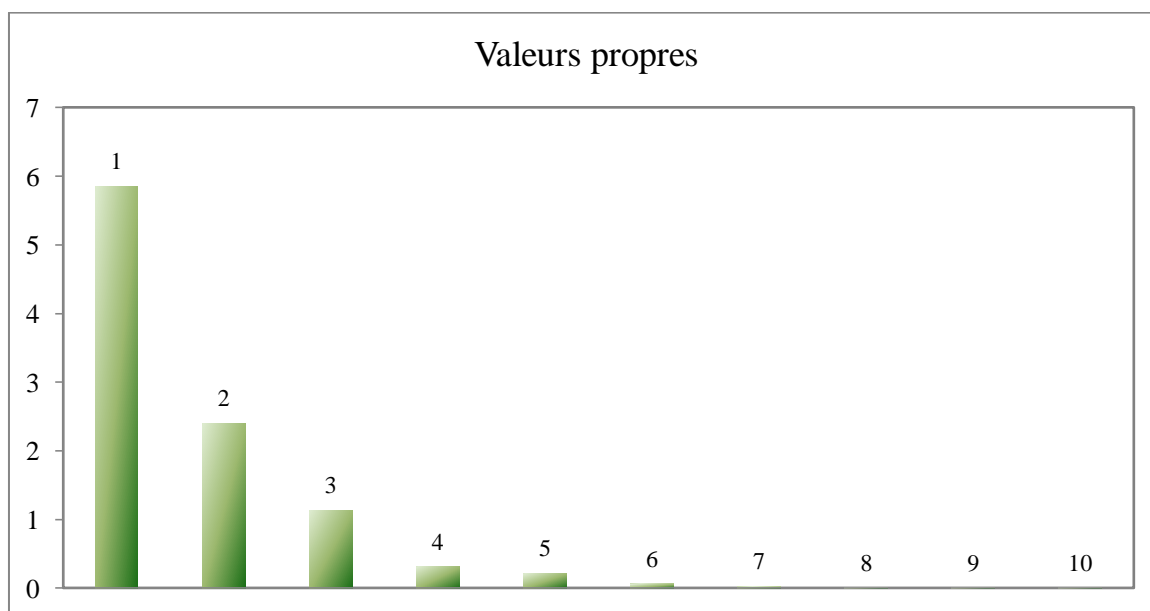


Figure 59 . Valeurs propres sur les axes principaux.

Tableau 17 . Pourcentage de variance expliquée par les axes principaux.

| | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 | F6 | F7 | F8 | F9 | F10 |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Valeur propre | 5,851 | 2,397 | 1,136 | 0,313 | 0,214 | 0,061 | 0,023 | 0,006 | 0,001 | 0,000 |
| % variance | 58,512 | 23,966 | 11,357 | 3,131 | 2,138 | 0,607 | 0,227 | 0,056 | 0,005 | 0,000 |
| % cumulé | 58,512 | 82,478 | 93,835 | 96,966 | 99,104 | 99,711 | 99,938 | 99,994 | 100,00 | 100,00 |

CHAPITRE III : IMPACT DE LA SECHERESSE SUR LES PARAMETRES AGRONOMIQUES DU BLE

Tableau 18 . Matrice de corrélation.

| | Mat. sèche | Durée-saison | EpiM2 | Nbf | Pdep | Rdt | Pdgm | Tpro | Nbgr | Poidrac |
|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------|---------------|---------------|---------------|
| M.sèche | 1 | 0,250 | -0,421 | 0,351 | 0,935 | 0,945 | -0,027 | -0,862 | 0,980 | 0,917 |
| Durée- | 0,250 | 1 | -0,710 | 0,771 | -0,008 | 0,033 | -0,139 | -0,269 | 0,155 | 0,520 |
| EpiM2 | -0,421 | -0,710 | 1 | -0,770 | -0,118 | -0,143 | 0,229 | 0,428 | -0,302 | -0,554 |
| Nbf | 0,351 | 0,771 | -0,770 | 1 | 0,032 | 0,096 | 0,075 | -0,541 | 0,187 | 0,594 |
| Pdep | 0,935 | -0,008 | -0,118 | 0,032 | 1 | 0,996 | 0,055 | -0,760 | 0,975 | 0,777 |
| Rdt | 0,945 | 0,033 | -0,143 | 0,096 | 0,996 | 1 | 0,109 | -0,800 | 0,973 | 0,804 |
| Pdgm | -0,027 | -0,139 | 0,229 | 0,075 | 0,055 | 0,109 | 1 | -0,240 | -0,083 | -0,070 |
| Tpro | -0,862 | -0,269 | 0,428 | -0,541 | -0,760 | -0,800 | -0,240 | 1 | -0,793 | -0,873 |
| Nbgr | 0,980 | 0,155 | -0,302 | 0,187 | 0,975 | 0,973 | -0,083 | -0,793 | 1 | 0,870 |
| Poidrac | 0,917 | 0,520 | -0,554 | 0,594 | 0,777 | 0,804 | -0,070 | -0,873 | 0,870 | 1 |

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0,050 (test bilatéral)

3. Année agricole 1993-1994

▪ Statistiques élémentaires :

| Variable | Moyenne | Ecart-type |
|--------------|---------|------------|
| Mat.sèche | 202,500 | 39,798 |
| Durée-saison | 207,818 | 3,420 |
| EpiM2 | 255,682 | 26,037 |
| Nbf | 10,314 | 1,119 |
| Pdep | 48,318 | 9,212 |
| Rdt | 47,136 | 9,226 |
| Pdgm | 27,682 | 3,469 |
| Tpro | 29,032 | 3,346 |
| Nbgr | 6,805 | 1,061 |
| Poidrac | 80,727 | 8,449 |

▪ Valeurs propres :

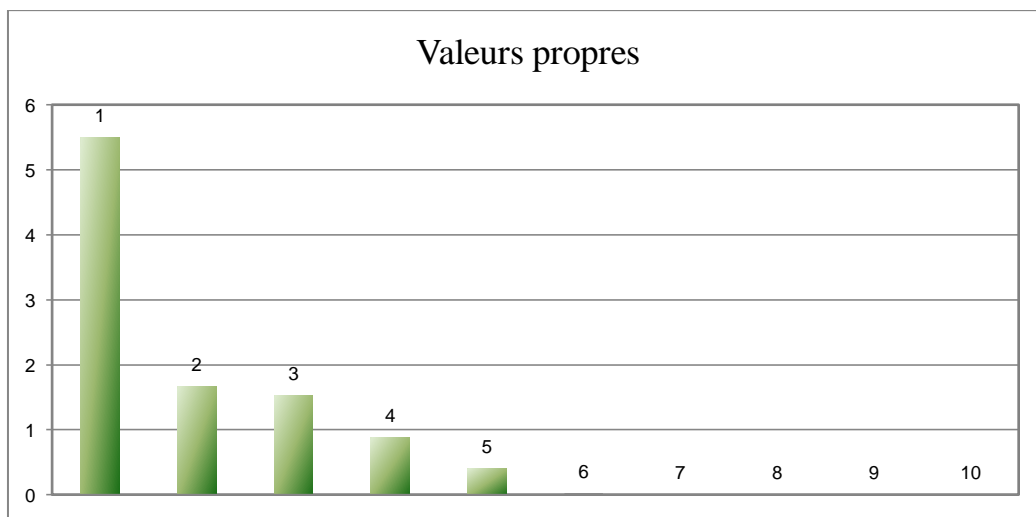


Figure 60 . Valeurs propres sur les axes principaux.

CHAPITRE III : IMPACT DE LA SECHERESSE SUR LES PARAMETRES AGRONOMIQUES DU BLE

Tableau 19 . Pourcentage de variance expliquée par les axes principaux.

| | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 | F6 | F7 | F8 | F9 | F10 |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Valeur propre | 5,505 | 1,664 | 1,524 | 0,878 | 0,403 | 0,017 | 0,005 | 0,003 | 0,001 | 0,000 |
| % variance | 55,054 | 16,635 | 15,242 | 8,782 | 4,029 | 0,169 | 0,052 | 0,028 | 0,007 | 0,002 |
| % cumulé | 55,05 | 71,690 | 86,931 | 95,713 | 99,742 | 99,911 | 99,963 | 99,992 | 99,998 | 100,0 |

▪ Matrice de corrélation

| | Mat. sèche | Durée-saison | EpiM2 | Nbf | Pdep | Rdt | Pdgm | Tpro | Nbgr | Poidrac |
|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Mat.sèche | 1 | -0,698 | -0,770 | -0,427 | 0,591 | 0,598 | 0,201 | -0,581 | 0,589 | 0,173 |
| Durée- | -0,698 | 1 | 0,203 | 0,683 | -0,695 | -0,681 | -0,011 | 0,691 | -0,822 | 0,014 |
| EpiM2 | -0,770 | 0,203 | 1 | 0,036 | -0,079 | -0,098 | -0,213 | 0,031 | 0,061 | 0,162 |
| Nbf | -0,427 | 0,683 | 0,036 | 1 | -0,450 | -0,426 | 0,165 | 0,447 | -0,603 | -0,282 |
| Pdep | 0,591 | -0,695 | -0,079 | -0,450 | 1 | 0,999 | 0,588 | -0,980 | 0,826 | 0,355 |
| Rdt | 0,598 | -0,681 | -0,098 | -0,426 | 0,999 | 1 | 0,611 | -0,976 | 0,811 | 0,346 |
| Pdgm | 0,201 | -0,011 | -0,213 | 0,165 | 0,588 | 0,611 | 1 | -0,506 | 0,046 | -0,028 |
| Tpro | -0,581 | 0,691 | 0,031 | 0,447 | -0,980 | -0,976 | -0,506 | 1 | -0,874 | -0,455 |
| Nbgr | 0,589 | -0,822 | 0,061 | -0,603 | 0,826 | 0,811 | 0,046 | -0,874 | 1 | 0,494 |
| Poidrac | 0,173 | 0,014 | 0,162 | -0,282 | 0,355 | 0,346 | -0,028 | -0,455 | 0,494 | 1 |

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0,050 (test bilatéral)

Interprétation:

L'analyse en composantes principales montre la pertinence des variables choisies pour caractériser le cycle biologique du blé.

Pour les deux premières années considérées, les variances expliquées sont de l'ordre de 80 % sur le premier plan factoriel F1-F2, en d'autres termes, la majorité des variables choisies contribuent notablement au développement de la culture, pour peu que les conditions climatiques lui soient favorables, notamment en matière d'alimentation en eau.

En cas de déficit hydrique (cas de l'année sèche 1993-1994), les deux premières composantes principales totalisent 71 % de variance expliquée et indiquent que certaines variables considérées n'ont pas ou peu contribué à la réalisation du cycle. Ceci signifie que certains processus, de par leur interaction avec le climat, n'ont pu s'accomplir complètement, faute de conditions climatiques favorables.

En zones arides et semi-arides, les températures élevées qui surviennent en période sèche ont pour effet d'accroître la vitesse de croissance et de réduire le cycle biologique au détriment d'un développement harmonieux et complet de la plante.

Le coefficient de corrélation entre la durée du cycle phénologique du blé et le rendement final passe de **0.642** en année humide à **-0.681** en année sèche : ceci montre qu'en cas de déficit hydrique, la longueur de la saison agricole a pour effet de renforcer l'action de la sécheresse et de réduire le rendement. Il convient dans ce cas d'opter pour des cultivars à cycle court.

III.2.5. Comparaison des variables

La comparaison des variables issues de la simulation en année sèche et en année humide a été effectuée à l'aide du test de Student-Newman-Keuls dont nous rappelons ci –après la théorie et le principe d'utilisation.

Notons au passage qu'un test significatif pour une variable donnée témoigne d'une sensibilité accrue de cette variable à la sécheresse et il convient d'en tenir compte dans les mesures d'adaptation à prendre au cas où cet aléa s'installe durablement suite au changement climatique.

Rappels de théorie : Test d'hypothèse et niveau de signification

Il s'agit de comparer deux échantillons aléatoires de tailles N_1 et N_2 , de moyennes \bar{X}_1 et \bar{X}_2 , et d'écart types S_1 et S_2 .

Pour tester l'hypothèse H_0 (appelée également hypothèse nulle) que les deux échantillons sont significativement identiques, on calcule la statistique t définie par :

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sigma \sqrt{\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2}}} \quad \text{avec} \quad \sigma = \sqrt{\frac{N_1 S_1^2 + N_2 S_2^2}{N_1 + N_2 - 2}}$$

dont la distribution est celle de Student à $v = N_1 + N_2 - 2$ degrés de liberté.

Si la valeur calculée de t est inférieure à la valeur critique au seuil de signification considéré, on adopte l'hypothèse nulle H_0 , autrement on opte pour l'hypothèse alternative H_1 , soit les échantillons sont significativement différents. Le tableau 20 donne les résultats de l'application du test au seuil de 5 %.

CHAPITRE III : IMPACT DE LA SECHERESSE SUR LES PARAMETRES AGRONOMIQUES DU BLE

Tableau 20. Valeurs calculée et critique de la statistique t de Student.

| Variable | t (calculé) | t (critique) | Signification du test |
|------------|-------------|--------------|--------------------------|
| Mat. Sèche | 26.214 | 2.015 | Différence significative |
| Durée | 13.52 | 2.015 | Différence significative |
| EpiM2 | 0.0 | 2.015 | Pas de différence |
| Nbf | 1.177 | 2.015 | Pas de différence |
| Pdep | 47.13 | 2.015 | Différence significative |
| Nbgr | 22.61 | 2.015 | Différence significative |
| Pdgm | -0.258 | 2.015 | Pas de différence |
| Poidrac | 6.41 | 2.015 | Différence significative |
| Tpro | -21.369 | 2.015 | Pas de différence |
| Rdt | 27.754 | 2.015 | Différence significative |

Ces résultats montrent des différences significatives entre la majorité des variables compilées, à l'exception du nombre de feuilles et de leur rythme d'apparition qui demeurent pratiquement identiques dans les deux cas.

III.2.6. Impact de la sécheresse sur le cycle du blé

Les conditions climatiques dominantes influent considérablement sur la croissance et le développement des cultures en général et du blé en particulier. Dans le cas de la sécheresse, cette influence s'exerce différemment sur chacun des stades phénologiques et les principaux paramètres de développement, tels le nombre de feuilles, la biomasse, le poids de l'épi etc.

La comparaison de ces dits paramètres avec les mêmes paramètres obtenus en conditions optimales d'alimentation en eau nous a permis de mettre en évidence des différences significatives qui confirment l'impact de la sécheresse sur le cycle de développement du blé. Examinons, pour le cultivar « Mexipak », dans quelle mesure les principaux paramètres du développement sont ainsi affectés par la sécheresse.

III.2.6.1. Evolution du nombre de feuilles

L'évolution du nombre de feuilles débute à la levée. Le nombre maximal de feuilles par tige est de l'ordre de onze. Il indique la fin de la phase végétative, dont la durée moyenne est de quatre à cinq mois. Le pallier de la courbe indique le début de la phase reproductive. Le rythme moyen d'apparition des feuilles et par suite l'intervalle de phyllochron est sensiblement le même durant les années agricoles considérées. Il semble donc dépendre beaucoup plus de la variété considérée que des conditions climatiques. Les figures 61 et 62 indiquent, pour la variété Mexipak, l'évolution du nombre de feuilles à partir de la levée pour les années 1990-1991 et 1993-1994.

CHAPITRE III : IMPACT DE LA SECHERESSE SUR LES PARAMETRES AGRONOMIQUES DU BLE

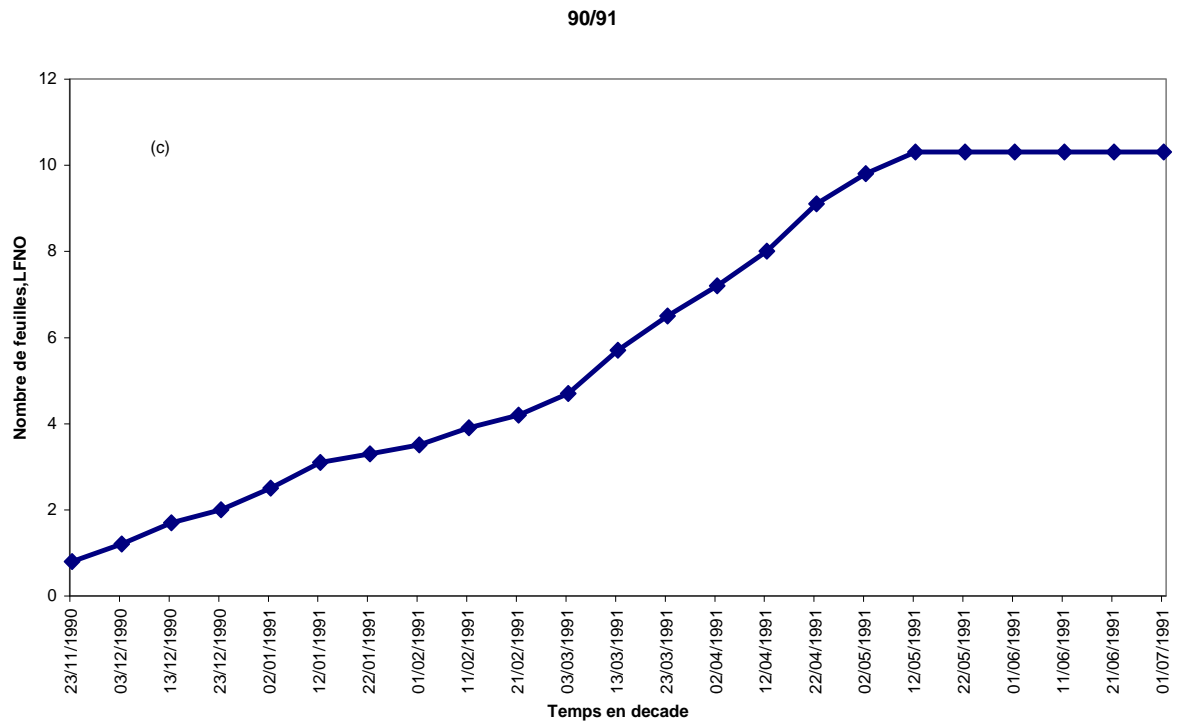


Figure 61. Evolution du nombre de feuilles à partir de la levée pour l'année 90-91.

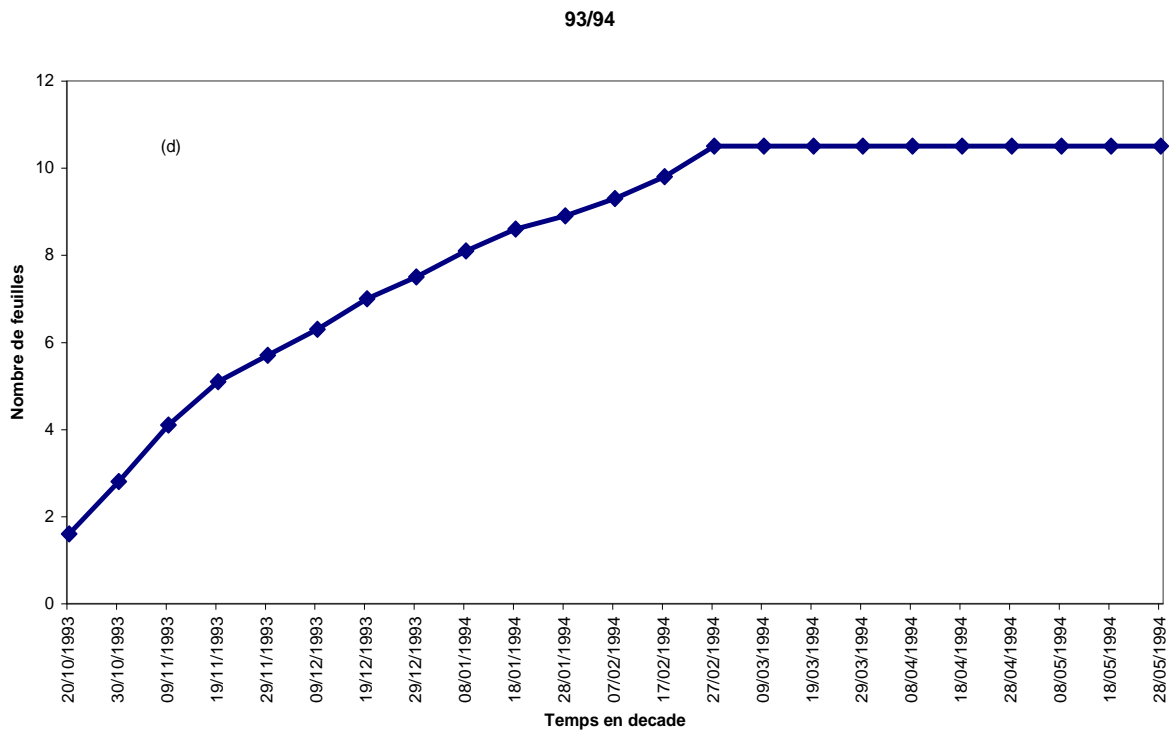


Figure 62. Evolution du nombre de feuilles à partir de la levée pour l'année 93-94.

III.2.6.2. Indice de surface verte

L'indice de surface verte est nettement moins important pour l'année 1993-1994 que pour l'année 1990-1991. Ceci peut être dû aux faibles précipitations enregistrées durant la première année, du fait que les températures sont comparables en termes de cumuls (Figure 63). Pour la même raison, la levée est plus précoce et induit un déphasage avance des autres stades phénologiques, comparativement au cycle simulé en année humide.

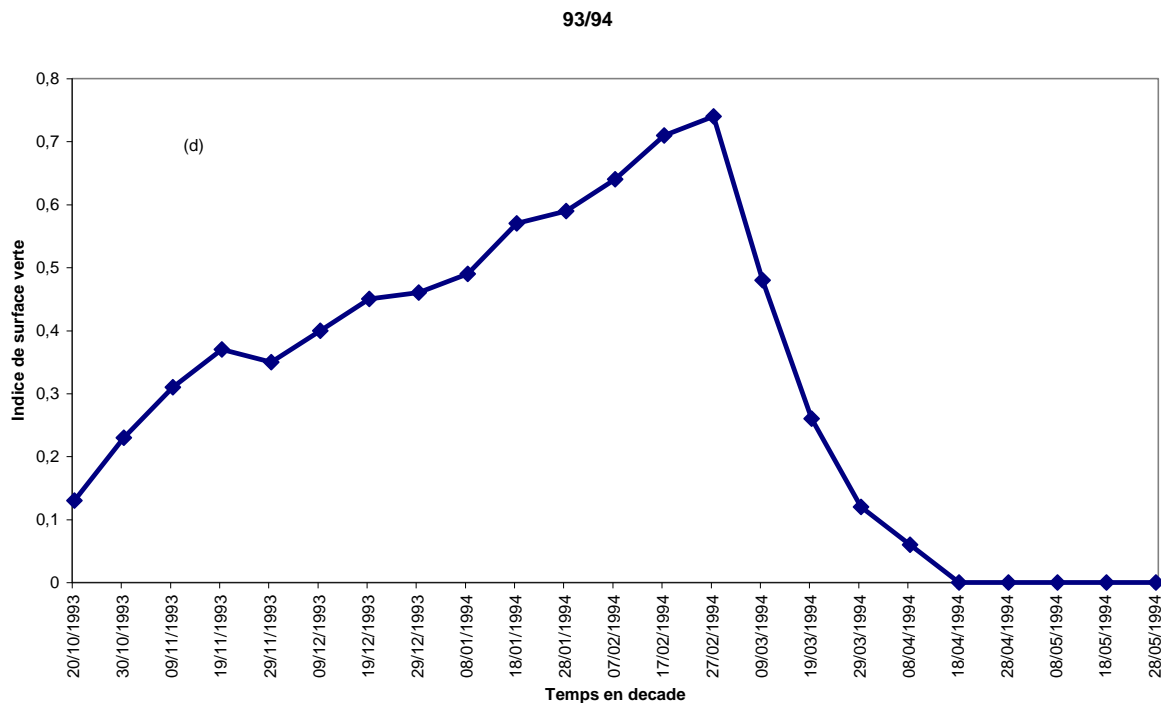


Figure 63. Evolution de l'indice de surface verte en fonction de temps. (année 1993-1994)

La valeur maximale de l'indice de surface verte est de l'ordre de 0.75 cm² de surface foliaire par cm² de surface du sol. La vitesse de croissance assez élevée ne permet aux feuilles d'atteindre leur dimension optimale. La sénescence des feuilles, amorcée plus tôt, aura pour conséquence une réduction des réserves qui serviront à la formation de l'épi.

En année humide, on observe un retard dans la levée. En revanche l'indice foliaire est relativement élevé, de l'ordre 3 cm² de surface foliaire par cm² de surface de sol et la vitesse de croissance moins élevée. Ceci est rendu possible par une précipitation annuelle appréciable. (Figure 64).

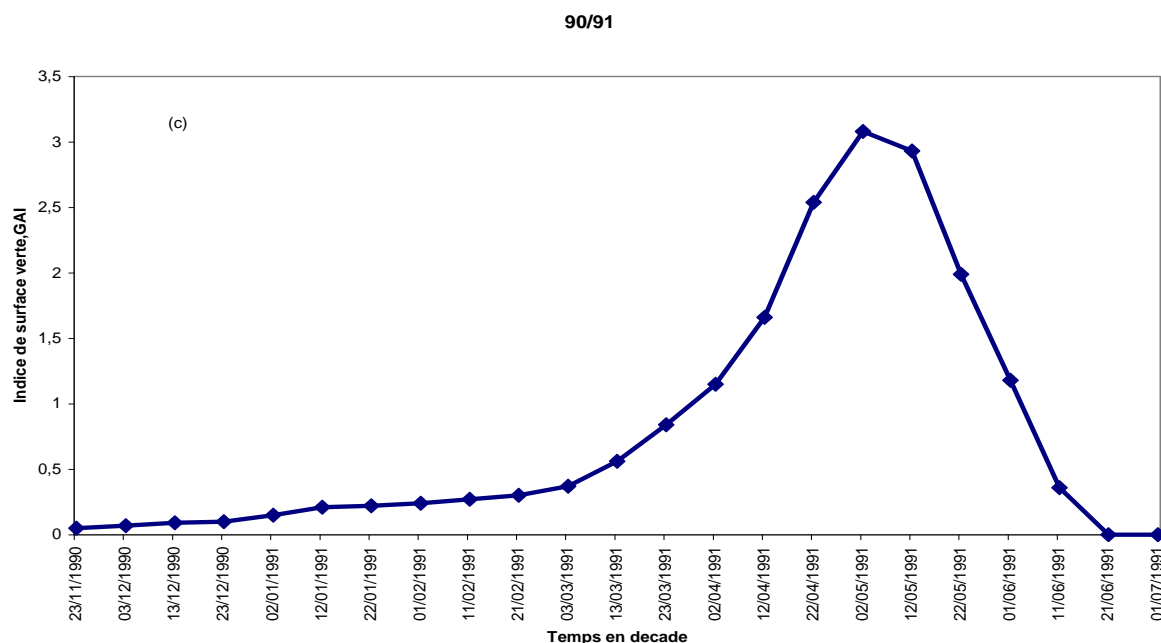


Figure 64. Evolution de l'indice de surface verte en fonction de temps.
(année 1990-1991)

Cette biomasse importante intercepte une plus grande partie du rayonnement photo synthétiquement actif à l'origine des réserves qui contribueront au remplissage ultérieur de la graine.

III.2.6.3. Evolution du poids de l'épi

Le poids de l'épi dépend de la migration des réserves de matière sèche vers le grain et sera déterminant dans le rendement final. L'évolution du poids de l'épi à partir de l'anthere pour les deux années considérées est donnée par les figures 65 et 66 ci-après.

Les points de repère utilisés correspondent aux stades début de grossissement du grain, fin de grossissement du grain et maturité, la période de temps séparant les stades consécutifs est cotée en degrés. Jours. La comparaison s'effectuera notamment sur la phase début-fin de grossissement du grain équivalente à 165 degrés. Jours pour apprécier la différence entre les poids de l'épi en conditions de températures identiques doublées de conditions hydriques différentes.

Le poids de l'épi à partir de l'anthere pour l'année 1993-1994 est stabilisé à 1 g/m² entre l'anthere et le début du grossissement et atteint environ 25 g/m² au stade fin de grossissement du grain. Le poids de l'épi à la maturité est de 40 g/m².

En année humide, le poids moyen de l'épi passe de 20 g/m² au stade de grossissement à 146g/m² au stade fin de grossissement pour atteindre 170 g/m² à la maturité. Ceci a été rendu

CHAPITRE III : IMPACT DE LA SECHERESSE SUR LES PARAMETRES AGRONOMIQUES DU BLE

possible par une précipitation appréciable recueillie durant la saison agricole et bien répartie dans le temps. La durée moyenne de remplissage des grains est de l'ordre de 20 à 30 jours.

Année 1990-1991

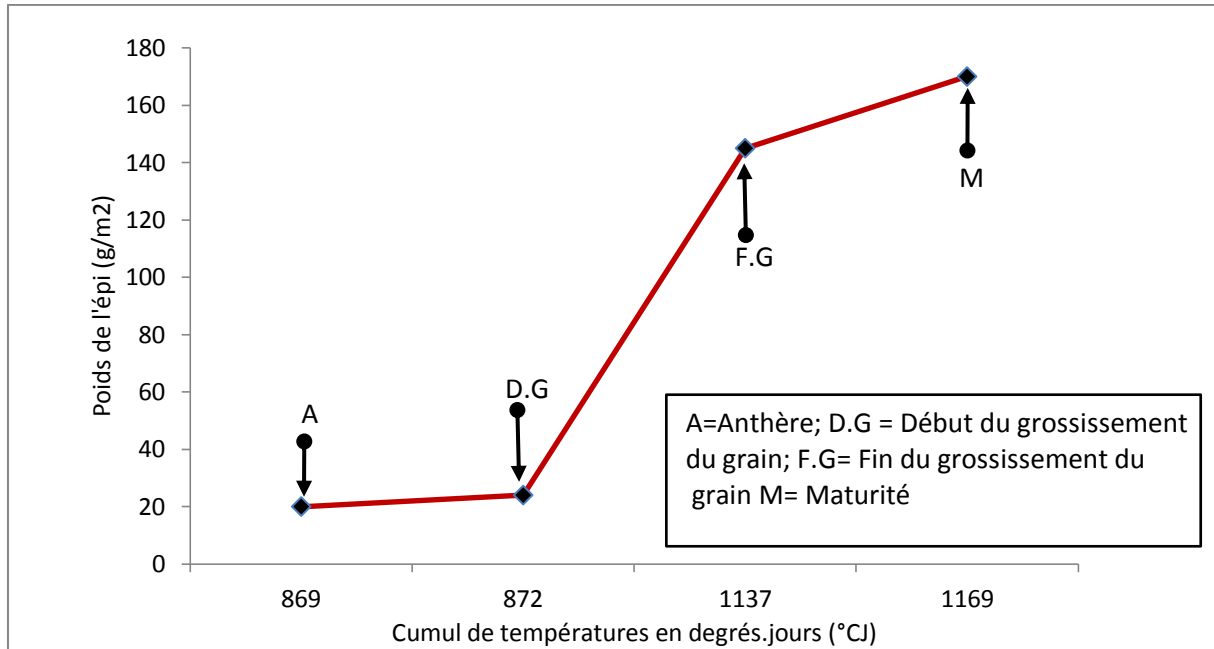


Figure 65. Evolution du poids de l'épi à partir de l'anthère pour l'année 1990-1991.

Année 1993-1994

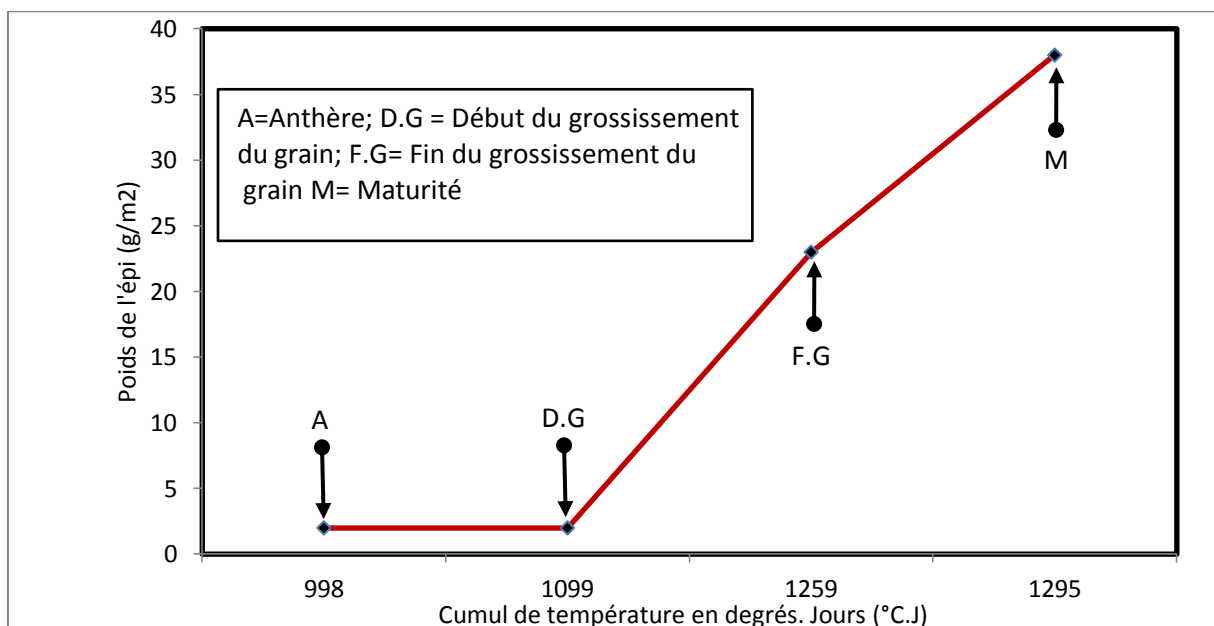


Figure 66. Evolution du poids de l'épi à partir de l'anthère pour l'année 1993-1994.

III.2.6.4. Evolution du poids total des feuilles, de la tige et de la plante

La production de matière sèche se répartit inégalement entre les feuilles, les tiges et les racines selon le stade de développement. La part de matière sèche revenant aux racines est relativement faible, l'activité racinaire cessant juste après l'anthere.

Alors que le nombre de feuilles est pratiquement identique pour les deux saisons agricoles simulées, leur poids est quatre à cinq fois plus élevé en année humide qu'en année sèche (figures 67, 68). Ce facteur quatre reste également valable pour la tige et la plante entière.

Le même nombre de feuilles présentant des poids significativement différents traduit le fait que la sécheresse a considérablement réduit leurs dimensions, notamment la surface réceptrice du rayonnement photo synthétiquement actif.

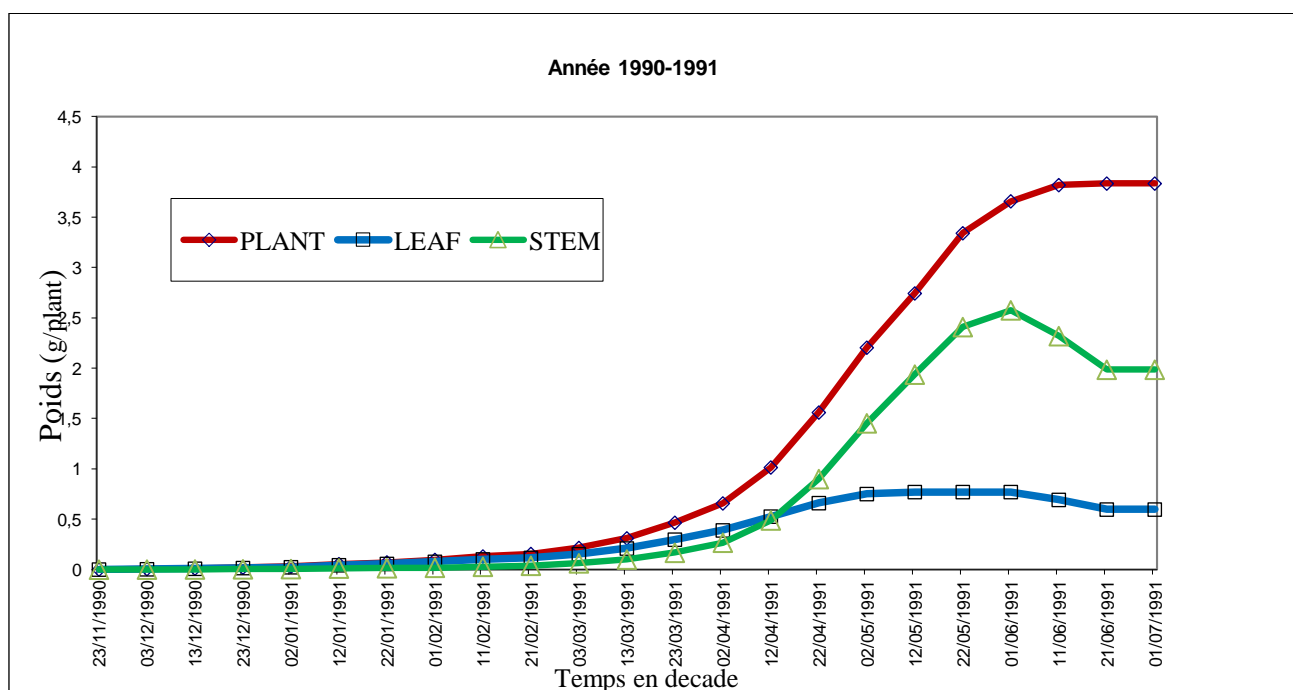


Figure 67. Evolution du poids total des feuilles, de la tige et de la plante durant la saison agricole 1990-1991. (Mexipak)

Le déficit hydrique dû à la sécheresse observée durant l'année 1993-1994 a provoqué la sénescence des feuilles pendant la phase végétative, réduisant ainsi le rayonnement photo synthétiquement actif absorbé par la plante, principal catalyseur dans l'élaboration de matière sèche (figure 68).

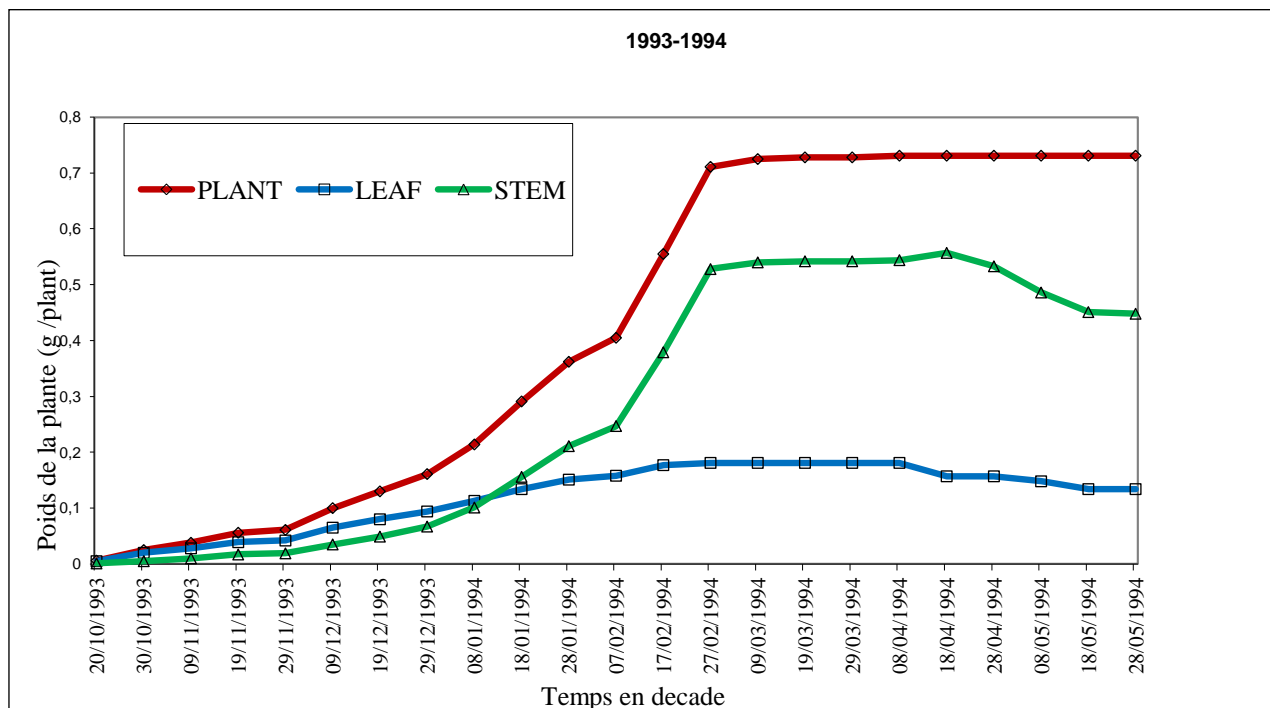


Figure 68. Evolution du poids total des feuilles, de la tige et de la plante durant la saison agricole 1993-1994. (Mexipak)

D'autre part, la matière sèche élaborée (tiges et feuilles) est très importante comparée aux deux autres années, et le poids de l'épi à maturité passe de 344.7 g.cm⁻² en année humide à 48 g.cm⁻² en année sèche en passant par 76.8 g.cm⁻² en année intermédiaire. La durée du cycle de développement du blé (de l'ordre de 200 jours) étant pratiquement la même pour les années considérées, cela montre que les cumuls de températures globaux nécessaires au déroulement du cycle sont également comparables. Ainsi, l'on peut admettre que les quantités de précipitations différentes réparties sur une même période végétative ont été à l'origine des différences entre les variables caractéristiques, et qui traduisent le fait que certaines fonctions physiologiques ont été affectées de façon significative par la sécheresse.

Cet effet réducteur de la sécheresse peut, dans un premier temps, être atténué en fixant un itinéraire biologique favorable par le choix d'une date de semis convenable.

De la même manière, on constate que la précipitation annuelle est un facteur déterminant du rendement final qui passe de 270 g/m² à 47 g/m² pour une faible pluviométrie.

CHAPITRE III : IMPACT DE LA SECHERESSE SUR LES PARAMETRES AGRONOMIQUES DU BLE

Le tableau 21 ci-dessous résume, pour trois niveaux de disponibilité annuelle en eau, l'interdépendance entre le rendement et les diverses variables mises à contribution dans la phénologie du blé.

Tableau 21. Corrélations entre les variables considérées et le rendement annuel.

| | Rendement 90-91 Pluie annuelle : 380 mm | Rendement 91-92 Pluie annuelle : 339mm | Rendement 93-94 Pluie annuelle : 203 mm |
|--------------|--|---|--|
| Mat. Sèche | 0,823 | 0,945 | 0,598 |
| Durée saison | 0,642 | 0,033 | -0,681 |
| EpiM2 | -0,440 | -0,143 | -0,098 |
| Nbf | 0,787 | 0,096 | -0,426 |
| Pdep | 0,924 | 0,996 | 0,999 |
| Pdgm | 0,47 2 | 0,509 | 0,611 |
| Tpro | -0,651 | -0,800 | -0,976 |
| Nbgr | 0,659 | 0,973 | 0,811 |
| Poidrac | 0,687 | 0,804 | 0,346 |

III.3. Commentaires

Quelle que soit la quantité de pluie reçue au cours de la saison agricole, les principales composantes qui déterminent le rendement, incluses parmi les 10 variables considérées, demeurent intrinsèques : le poids moyen de l'épi (Pdep), le poids moyen du grain à la maturité (Pdgm), et le nombre de grains par épi (Nbgr) se caractérisent par des coefficients de corrélation élevés dans les trois cas envisagés.

En année humide, la plupart des variables contribuent de manière positive à la synthèse du produit final : les conditions de température étant généralement peu limitantes sous nos climats, une pluviométrie suffisante permet en effet une réalisation quasi-complète des principales phases phénologiques, condition nécessaire à un bon rendement. C'est ainsi que les 380 mm de pluie (valeur proche de la normale annuelle estimée à 400 mm), enregistrés au cours de la saison agricole 1990-1991, et convenablement répartis au cours du temps ont permis l'accomplissement d'un cycle à durée convenable de l'ordre de 224 jours.

En cas de pluie insuffisante, la durée de la saison végétative influe négativement sur le rendement par allongement des épisodes secs et l'augmentation de l'intensité de la sécheresse

Conclusion

La simulation effectuée sur deux années particulières montre en partie ce qu'il pourrait advenir du cycle biologique du blé dans un contexte de changement du climat tel que perçu actuellement ou envisagé dans un proche avenir par de nombreux scientifiques. Pratiquement, toutes les phases phénologiques sont affectées par le stress hydrique induit par la sécheresse.

C'est ainsi que la phase montaison s'est caractérisée par une réduction du nombre d'épillets par épi, tandis que la phase épiaison se distingue, en plus de la réduction du nombre d'épillets par épi, par une diminution du poids du grain.

De même, les températures élevées qui accompagnent cet aléa climatique ont pour effet de raccourcir la phase de grossissement du grain, provoquant ainsi la diminution du poids du grain. Notons enfin que quelle que soit son intervention dans le cycle, le stress hydrique causé par la sécheresse réduit inmanquablement le rendement de la culture.

Introduction

D'après le glossaire OMM-OMS-PNUE l'adaptation désigne une réaction des systèmes naturels ou humains aux conditions propres à un milieu nouveau ou en évolution. L'adaptation aux changements climatiques fait référence à l'adaptation aux stimuli climatiques réels ou prévus ou à leurs effets, de façon à atténuer leurs inconvénients ou à tirer parti de leurs avantages.

Les sécheresses, aggravées par des vagues de chaleur, risquent d'être plus fréquentes à l'avenir, mais resteront difficiles à prévoir et donc à anticiper. Il convient de les considérer comme un risque structurel à intégrer dans les nouvelles pratiques agricoles.

Leur caractère à la fois aléatoire et imprévisible constitue une contrainte majeure au développement de l'agriculture en général et des cultures pluviales en particulier.

Dans le chapitre précédent, nous avons pu apprécier les effets à la fois quantitatifs et qualitatifs de la sécheresse sur le cycle de développement du blé. Ces effets concourent le plus souvent à une baisse importante des rendements.

C'est pourquoi beaucoup de nos agriculteurs hésitent, par précaution, à investir dans des cultures stratégiques comme le blé, dont le rendement dépend pour une large part des aléas du climat. Ceci a d'ailleurs amené la caisse nationale de mutualité agricole à proposer une nouvelle prestation destinée à couvrir le risque sécheresse. Cette solution aval, fort encourageante par ailleurs, contribue faiblement à l'auto suffisance alimentaire en matière de céréales.

Aussi, nous préconisons, en guise d'adaptation à la sécheresse, une solution consistant à déterminer une date optimale de semis. Celle-ci permet de prédéfinir un itinéraire technique susceptible de soustraire la plante des incidences de la sécheresse et par suite d'assurer un niveau de production viable en conditions climatiques défavorables.

IV.1. Hypothèses de travail

Dans le contexte de changement climatique, le risque de sécheresse subsiste et son effet dépend du stade phénologique de la culture.

Différents auteurs, en particulier Doorenbos et Kassam (1980) ont fait la synthèse des travaux relatifs à la sensibilité de 25 espèces végétales. Les résultats obtenus convergent pour définir, pour la plupart des espèces étudiées une période critique de sensibilité à la sécheresse vers les phases floraison formation des fruits.

De plus, le déficit hydrique engendré par la sécheresse augmente la sensibilité des plantes aux valeurs extrêmes de température, notamment en dehors de la saison humide (G. Guyot, 1993).

Tenant compte de ces résultats, la date de semis à déterminer sera telle que la probabilité d'occurrence d'épisodes secs en période de floraison soit la plus faible possible. Cette date de semis est choisie parmi six dates de semis utiles qui coïncident en pratique avec le début de la saison des pluies.

IV.2. Données et méthode

Les données climatologiques utilisées sont les températures et les précipitations quotidiennes recueillies à la station météorologique d'Oran. Nous avons utilisé deux séries de données, une de référence, se rapportant à la période 1945-1977, utilisée pour une analyse fréquentielle des saisons pluvieuses et l'autre représentant la période 1994-2004, susceptible d'inclure certains événements apparus à la faveur du changement climatique et sur laquelle seront effectuées les diverses simulations. Un jour présente un caractère pluvieux si la quantité de pluie recueillie en 24 heures est supérieure ou égale à 0.1 mm.

La méthodologie adoptée consiste en une analyse des données à l'aide du logiciel statistique Instat+ afin de déterminer les principaux événements climatiques tels que le début et la fin des précipitations, les séquences sèches, la longueur des saisons pluvieuses, la date moyenne du début de la floraison etc. Ces informations permettent notamment de définir des dates hypothétiques de semis (qui coïncident en pratique avec le début des pluies) parmi lesquelles sera choisie la date de semis répondant aux critères de départ.

IV.3. Analyse des données

IV.3.1. Période de référence

La distribution annuelle des précipitations peut réduire considérablement de leur efficacité (Dastane, 1977), d'où la nécessité de connaître et de délimiter dans le temps la période des pluies. Cette information sera mise à profit par les agriculteurs pour entamer la campagne agricole et planifier les diverses interventions culturales.

A cet effet, nous avons utilisé la période de référence et procédé à une analyse fréquentielle des périodes pluvieuses.

L'histogramme de la figure 1 montre une valeur modale de l'ordre de 150 jours de pluie par an. La pluviométrie moyenne annuelle est de l'ordre de 300 à 350 mm et reste insuffisante pour satisfaire les besoins en eau des cultures annuelles.

Ainsi, compte tenu de la définition adoptée, la saison pluvieuse dure en moyenne 145 jours ; elle débute vers le 10 octobre pour s'achever durant la première décade de mars, à l'exception de la période 1951-1958 où les pluies ont commencé au delà du 31 octobre.

L'analyse fréquentielle des durées des saisons pluvieuses (figure 69) montre une valeur modale de 150 jours. Cette séquence peut s'avérer insuffisante dans le cas où elle ne cadre pas avec le cycle des cultures, d'où la nécessité de mettre en place une stratégie consistant à repérer les épisodes favorables du climat pour en tirer le meilleur parti. Cette approche probabiliste permet, entre autres, d'estimer les chances d'occurrence de deux jours pluvieux consécutifs et d'entrevoir la période pouvant concentrer le maximum de précipitations.

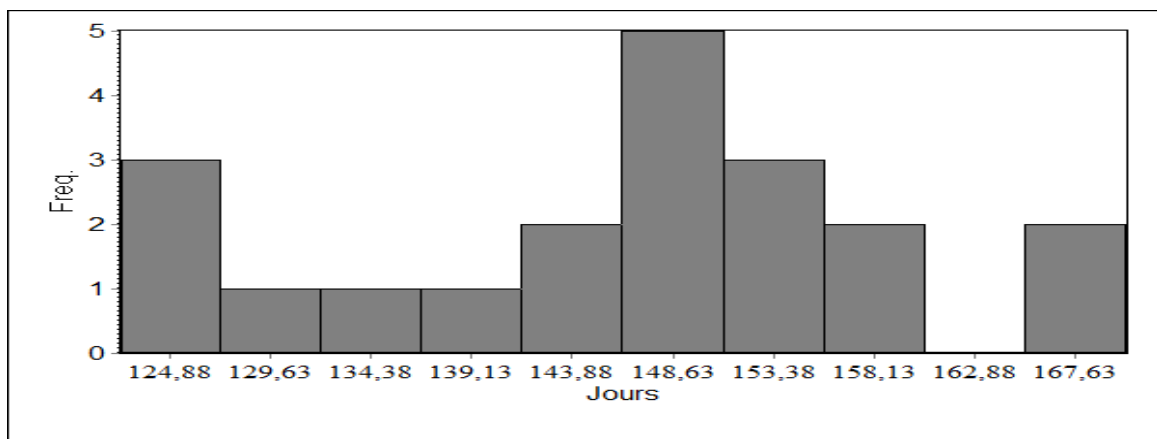


Figure 69. Histogramme des durées des saisons pluvieuses.

IV.3.2. Période 1994-2004

L'étude des données se rapportant à cette période récente permet de tenir compte du régime pluviométrique actuel et d'intégrer certains événements susceptibles de s'être produits à la faveur du changement climatique comme l'occurrence d'épisodes de sécheresse.

Cette période fait partie des onze dernières années (1995-2006) notées les plus chaudes depuis qu'on dispose d'enregistrements de la température de surface (depuis 1850).

Un aperçu des données quotidiennes de l'année agricole 1994-1995 est donné par le tableau 22 ci-dessous, complétée par le graphe de la figure 70.

CHAPITRE IV : ADAPTATION A LA SECHERESSE

Tableau 22. Données de pluie quotidienne pour l'année 1994-1995.

| Mon | Sep | Oct | Nov | Dec | Jan | Feb | Mar | Apr | May | Jun | Jul | Aug |
|-----------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|-----|-----|
| ----- | | | | | | | | | | | | |
| Day. | ----- | | | | | | | | | | | |
| 1 | -- | -- | -- | -- | 2.4 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 2 | -- | -- | -- | -- | 0.1 | -- | 1.3 | -- | -- | -- | -- | -- |
| 3 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 4 | -- | -- | 3.8 | -- | -- | -- | -- | -- | 0.8 | -- | -- | -- |
| 5 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | 4.6 | -- | 0.2 | -- | -- | -- |
| 6 | -- | 8.1 | -- | -- | 0.4 | -- | 0.5 | -- | 0.1 | 0.1 | -- | -- |
| 7 | -- | 0.2 | -- | -- | 6.2 | -- | -- | -- | -- | 0.1 | -- | 0.1 |
| 8 | -- | 0.1 | -- | -- | 6.9 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 9 | -- | 0.6 | 0.3 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | 0.1 |
| | | | | | | | | | | | | |
| 26 | -- | 0.2 | -- | -- | -- | 3.0 | -- | 0.7 | -- | -- | -- | -- |
| 27 | 4.0 | 0.4 | -- | -- | -- | 43.3 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 28 | 3.0 | 1.9 | -- | -- | -- | 21.5 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 29 | -- | -- | -- | -- | -- | 22.8 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 30 | 7.4 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | 0.9 |
| 31 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| Mean | 0.7 | 1.5 | 0.6 | 0.4 | 0.5 | 3.3 | 2.4 | 0.8 | 0.1 | 0.3 | 0.0 | 0.2 |
| Total | 22.3 | 46.5 | 18.3 | 13.6 | 16.4 | 94.4 | 73.7 | 23.4 | 2.6 | 10.0 | 0.0 | 7.1 |
| Number greater than 0 | 6 | 11 | 4 | 3 | 10 | 6 | 6 | 5 | 5 | 8 | 0 | |

Ce tableau montre que la saison des pluies débute en octobre, avec des maxima mensuels respectifs en février et mars de l'ordre de 94 mm et 73mm.

Dans la perspective d'une représentation graphique de la série chronologique des pluies quotidiennes de l'année agricole considérée (figure 70), il est nécessaire d'établir une correspondance entre le numéro du jour dans l'année et sa date calendaire. (Tableau 23)

CHAPITRE IV : ADAPTATION A LA SECHERESSE

Tableau 23. Correspondance entre numéro de jour et date calendaire.

| Mois | Sep | Oct | Nov | Dec | Jan | Feb | Mar | Apr | May | Jun | Jul | Aug |
|-------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| jour. | ----- | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | 31 | 62 | 92 | 123 | 154 | 183 | 214 | 244 | 275 | 305 | 336 |
| 2 | 2 | 32 | 63 | 93 | 124 | 155 | 184 | 215 | 245 | 276 | 306 | 337 |
| 3 | 3 | 33 | 64 | 94 | 125 | 156 | 185 | 216 | 246 | 277 | 307 | 338 |
| 4 | 4 | 34 | 65 | 95 | 126 | 157 | 186 | 217 | 247 | 278 | 308 | 339 |
| 5 | 5 | 35 | 66 | 96 | 127 | 158 | 187 | 218 | 248 | 279 | 309 | 340 |
| 6 | 6 | 36 | 67 | 97 | 128 | 159 | 188 | 219 | 249 | 280 | 310 | 341 |
| 7 | 7 | 37 | 68 | 98 | 129 | 160 | 189 | 220 | 250 | 281 | 311 | 342 |
| 8 | 8 | 38 | 69 | 99 | 130 | 161 | 190 | 221 | 251 | 282 | 312 | 343 |
| 9 | 9 | 39 | 70 | 100 | 131 | 162 | 191 | 222 | 252 | 283 | 313 | 344 |
| 10 | 10 | 40 | 71 | 101 | 132 | 163 | 192 | 223 | 253 | 284 | 314 | 345 |
| 11 | 11 | 41 | 72 | 102 | 133 | 164 | 193 | 224 | 254 | 285 | 315 | 346 |
| 12 | 12 | 42 | 73 | 103 | 134 | 165 | 194 | 225 | 255 | 286 | 316 | 347 |
| 13 | 13 | 43 | 74 | 104 | 135 | 166 | 195 | 226 | 256 | 287 | 317 | 348 |
| 14 | 14 | 44 | 75 | 105 | 136 | 167 | 196 | 227 | 257 | 288 | 318 | 349 |
| 15 | 15 | 45 | 76 | 106 | 137 | 168 | 197 | 228 | 258 | 289 | 319 | 350 |
| 16 | 16 | 46 | 77 | 107 | 138 | 169 | 198 | 229 | 259 | 290 | 320 | 351 |
| 17 | 17 | 47 | 78 | 108 | 139 | 170 | 199 | 230 | 260 | 291 | 321 | 352 |
| 18 | 18 | 48 | 79 | 109 | 140 | 171 | 200 | 231 | 261 | 292 | 322 | 353 |
| 19 | 19 | 49 | 80 | 110 | 141 | 172 | 201 | 232 | 262 | 293 | 323 | 354 |
| 20 | 20 | 50 | 81 | 111 | 142 | 173 | 202 | 233 | 263 | 294 | 324 | 355 |
| 21 | 21 | 51 | 82 | 112 | 143 | 174 | 203 | 234 | 264 | 295 | 325 | 356 |
| 22 | 22 | 52 | 83 | 113 | 144 | 175 | 204 | 235 | 265 | 296 | 326 | 357 |
| 23 | 23 | 53 | 84 | 114 | 145 | 176 | 205 | 236 | 266 | 297 | 327 | 358 |
| 24 | 24 | 54 | 85 | 115 | 146 | 177 | 206 | 237 | 267 | 298 | 328 | 359 |
| 25 | 25 | 55 | 86 | 116 | 147 | 178 | 207 | 238 | 268 | 299 | 329 | 360 |
| 26 | 26 | 56 | 87 | 117 | 148 | 179 | 208 | 239 | 269 | 300 | 330 | 361 |
| 27 | 27 | 57 | 88 | 118 | 149 | 180 | 209 | 240 | 270 | 301 | 331 | 362 |
| 28 | 28 | 58 | 89 | 119 | 150 | 181 | 210 | 241 | 271 | 302 | 332 | 363 |
| 29 | 29 | 59 | 90 | 120 | 151 | 182 | 211 | 242 | 272 | 303 | 333 | 364 |
| 30 | 30 | 60 | 91 | 121 | 152 | | 212 | 243 | 273 | 304 | 334 | 365 |
| 31 | | 61 | | 122 | 153 | | 213 | | 274 | | 335 | 366 |

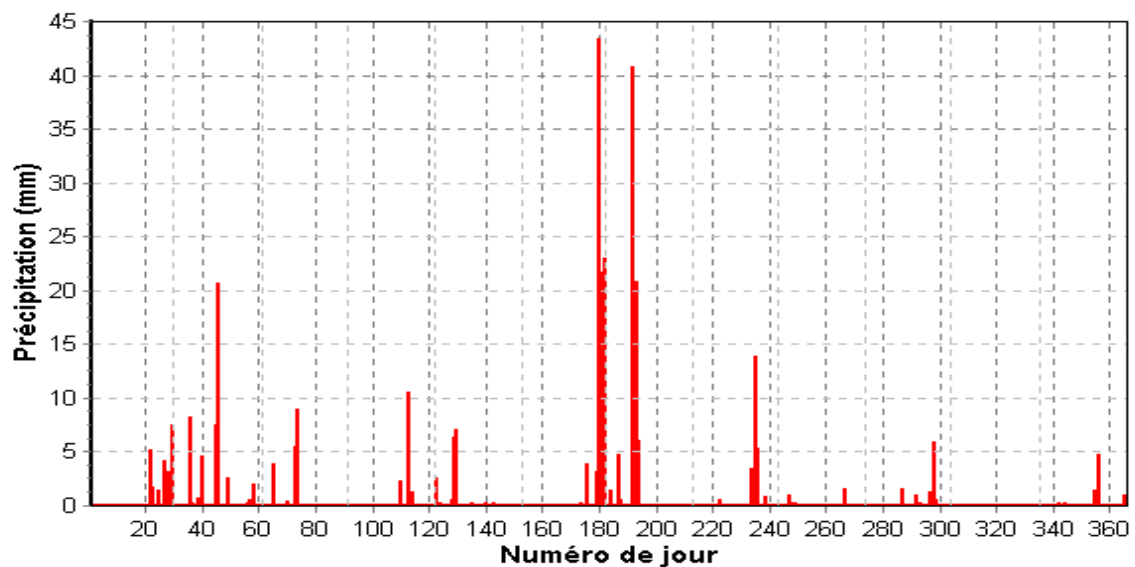


Figure 70. Variation de la pluie quotidienne de l'année agricole 1994-1995.

La variation des pluies quotidiennes montre un arrêt franc des précipitations vers le 200^{ème} jour correspondant à la mi-mars, soit en période de floraison, puis une reprise des précipitations vers la mi-avril sous forme orageuse et au-delà une baisse de plus en plus marquée. Cette variation des pluies quotidiennes étant comparable pour l'ensemble des années considérées, la phase floraison-épiaison coïncide la plupart du temps avec l'occurrence de la sécheresse. Le déficit hydrique qui s'ensuit, associé aux hautes températures provoque la coulure des fleurs et une réduction du nombre d'épillets. Pour parer à une telle coïncidence, l'intervention en amont consistant à fixer une date de semis reste une option peu coûteuse et à portée grâce aux progrès de la simulation.

IV.4. Détermination d'une date optimale de semis

La détermination d'une date de semis optimale est subordonnée comme signalé précédemment à la connaissance des occurrences des deux principaux événements encadrant le cycle de développement du blé, à savoir une date de semis favorable qui ne soit pas immédiatement suivie d'épisode sec et la date de floraison à partir de laquelle on estime le risque de sécheresse de durée déterminée.

IV.4.1. Début de la saison des pluies

On adoptera dans ce qui suit trois définitions du début de la saison pluvieuse couvrant une période de semis utile allant du 1^{er} octobre pour un semis précoce à début décembre pour un semis tardif, soit :

- la première occasion à partir du premier octobre avec plus de 5mm cumulés sur une période de 2 jours.
- la première occasion à partir du premier novembre avec plus de 5mm cumulés sur une période de 2 jours.
- la première occasion à partir du premier décembre avec plus de 5mm cumulés sur une période de 2 jours.

Le choix de ces dates n'est pas arbitraire ; il tient compte de la climatologie locale et du fait que les premières pluies surviennent habituellement en période d'automne.

Ces pluies assurent également des conditions propices au semis de cultures annuelles, notamment les céréales. De ce fait, elles constituent le point de départ de la campagne agricole. Les trois définitions retenues génèrent des dates hypothétiques qui s'étalent du 1^{er} octobre au 26 décembre (tableau 24).

CHAPITRE IV : ADAPTATION A LA SECHERESSE

La Commande appropriée dans Instat+ est

```
Define the start of the rainy season
RUN X1-X10; RANge 0.1;SUM 2 5;FIRst 31 62 92;DAYs X91-X93
```

| Year | 1 | 2 | 3 |
|-------|----|----|-----|
| 94_95 | 31 | 73 | 113 |
| 95_96 | 41 | 84 | 92 |
| 96_97 | 99 | 99 | 99 |
| 97_98 | 59 | 67 | 95 |
| 98_99 | 37 | 84 | 92 |
| 99_00 | 37 | 73 | 107 |
| 00_01 | 31 | 75 | 117 |
| 01_02 | 39 | 70 | 114 |
| 02_03 | 39 | 76 | 131 |
| 03_04 | 55 | 73 | 92 |

La colonne 1 ci-dessus indique le numéro du jour de l'année, à compter du 1^{er} septembre, où commence la saison pluvieuse. Ainsi, pour la première année agricole (94/95), la saison pluvieuse a débuté le 1^{er} octobre selon la première définition, le 12 novembre selon la deuxième définition et le 22 décembre selon la dernière définition.

Tableau 24. Date de début des pluies (1994/2004).

| Année | Date de début des pluies | | | N° de jour dans l'année | | |
|-------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------|-----|-----|
| | 1 ^{ere} Définition (1) | 2 ^{eme} Définition (2) | 3 ^{eme} Définition (3) | (1) | (2) | (3) |
| 94/95 | 01 oct | 12 nov | 22 déc | 31 | 73 | 113 |
| 95/96 | 11 oct | 23 nov | 01 déc | 41 | 84 | 92 |
| 96/97 | 08 déc. | 08 déc | 08 déc | 99 | 99 | 99 |
| 97/98 | 29 oct | 06 nov | 04 déc | 59 | 67 | 95 |
| 98/99 | 07 oct | 23 nov | 01 déc | 37 | 84 | 92 |
| 99/00 | 07 oct | 12 nov | 16 déc | 37 | 73 | 107 |
| 00/01 | 01 oct | 14 nov | 26 déc | 31 | 75 | 117 |
| 01/02 | 09 oct | 09 nov | 23 déc | 39 | 70 | 114 |
| 02/03 | 09 oct | 15 nov | 09 jan | 39 | 76 | 131 |
| 03/04 | 25 oct | 12 nov | 01 déc | 55 | 73 | 92 |

CHAPITRE IV : ADAPTATION A LA SECHERESSE

Un premier examen de ce tableau montre qu'un semis effectué en début d'octobre présente un faible taux d'échec dans la mesure où dans la plupart des cas la pluie survient dans la semaine ou la décade qui suit, tandis qu'un semis tardif risque de subir une fois sur deux les effets de la sécheresse dès le départ.

Les dates de début des pluies générées à partir de la deuxième définition semblent peu favorables au démarrage de la campagne agricole. Cependant les paramètres climatiques tels que les températures de l'air ou l'insolation habituellement relevées en novembre ont peu d'effets sur l'évaporation de sorte qu'un semis effectué durant la première quinzaine du mois présente également de fortes chances de réussite.

A partir des dates hypothétiques ainsi générées et afin de lever la difficulté inhérente à l'initialisation du début de la pluie, nous avons défini six dates de semis utiles couvrant la période automnale durant laquelle est lancée habituellement la campagne labours-semailles. L'une d'entre elles coïncidera avec la date optimale de semis (Tableau 25).

Tableau 25. Dates de début des pluies correspondant aux dates de semis choisies.

| Dates de semis choisies | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|
| | 1 ^{er} Groupe | | 2 ^{eme} Groupe | | 3 ^{eme} Groupe | | 4 ^{eme} Groupe | | 5 ^{eme} Groupe | | 6 ^{eme} Groupe | |
| | 1 ^{er} Octobre | | 15 Octobre | | 30 Octobre | | 15 Novembre | | 30 Novembre | | 15 Décembre | |
| Années | Jour | Date | Jour | Date | Jour | Date | Jour | Date | Jour | Date | Jour | Date |
| 94/95 | 31 | 01oct | 45 | 15oct | 73 | 12nov | 113 | 22dec | 113 | 22dec | 113 | 22dec |
| 95/96 | 41 | 11oct | 84 | 23nov | 84 | 23nov | 84 | 23nov | 92 | 01dec | 107 | 16dec |
| 96/97 | 99 | 08déc | 99 | 08déc | 99 | 08dec | 99 | 08dec | 99 | 08dec | 115 | 24dec |
| 97/98 | 59 | 29oct | 59 | 29oct | 60 | 30oct | 82 | 21nov | 95 | 04dec | 121 | 30dec |
| 98/99 | 37 | 07oct | 84 | 23nov | 84 | 23nov | 84 | 23nov | 91 | 30nov | 123 | 01Jan |
| 99/00 | 37 | 07oct | 55 | 25oct | 73 | 12nov | 76 | 15nov | 107 | 16dec | 107 | 16dec |
| 00/01 | 31 | 01oct | 53 | 23oct | 75 | 14nov | 76 | 15nov | 117 | 26dec | 117 | 26dec |
| 01/02 | 39 | 09oct | 70 | 09nov | 70 | 09nov | 76 | 15nov | 114 | 23dec | 114 | 23dec |
| 02/03 | 39 | 09oct | 76 | 15nov | 76 | 15nov | 76 | 15nov | 131 | 09Jan | 131 | 09jan |
| 03/04 | 55 | 25oct | 55 | 25oct | 73 | 12nov | 78 | 17nov | 92 | 01dec | 142 | 20jan |

CHAPITRE IV : ADAPTATION A LA SECHERESSE

La simulation de chaque date ainsi considérée, génère un ensemble d'évènements climatiques (occurrence de pluie) pour chaque année agricole. Pour vérifier si les dates choisies sont explicitement différentes les unes des autres, on applique le test de Student aux événements climatiques ainsi générés. On pose l'hypothèse suivante :

H_0 : Les deux dates sont semblables (provoquent des événements climatiques identiques)

H_1 : Les deux dates sont différentes (différence entre les événements)

Avec un $DDL=N1+N2-2$ ($N1$: taille du 1^{er} groupe des dates).

($N2$: taille du 2^{eme} groupe des dates).

Les résultats du test T de Student sont consignés dans le tableau 26 ci-après

Tableau 26. Valeurs calculées du test T de Student.

| | Dates de semis choisies | | | | | |
|-------------------------|-------------------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| | 1 ^{er} octobre | 15octobre | 30octobre | 15novembre | 30novembre | 15décembre |
| 1 ^{er} octobre | 0 | 2.49 | 4.29 | 4.97 | 7.51 | 9.84 |
| 15octobre | 2.49 | 0 | 1.51 | 2.44 | 5.33 | 7.87 |
| 30octobre | 4.29 | 1.51 | 0 | 1.43 | 5.34 | 9.19 |
| 15novembre | 4.97 | 2.44 | 1.43 | 0 | 3.59 | 6.67 |
| 30novembre | 7.51 | 5.33 | 5.34 | 3.59 | 0 | 2.54 |
| 15décembre | 9.84 | 7.87 | 9.19 | 6.67 | 2.54 | 0 |

Nombre de degrés de liberté $DDL=18$.

$T_{critique}=1.73$ au niveau de signification 0.05.

$T_{calculé} > T_{critique}$: H_0 est rejetée.

$T_{calculé} < T_{critique}$: H_0 est acceptée.

L'application de ce test au seuil de signification de 0.05 montre qu'il n'existe pas de différence significative entre les dates "15 octobre" et "30 octobre".

La différence non significative entre les deux dates signifie entre autres qu'il n'y a pas d'évènements climatiques importants (occurrence de pluie) pouvant avoir des effets différents en période de floraison et qui permettent de les considérer comme distinctes ; de ce fait on considérera par la suite indifféremment l'une ou l'autre de ces deux dates.

La détermination d'une date de semis optimale est subordonnée comme signalé précédemment à la connaissance des occurrences des deux principaux événements encadrant le cycle de développement du blé, à savoir une date de semis favorable qui ne soit pas immédiatement suivie d'épisode sec et la date de floraison à partir de laquelle on estime le risque de sécheresse de durée déterminée

IV.4.2. Fin de la saison des pluies

Le calcul du bilan hydrique permet de localiser dans le temps la fin de la saison des pluies ; en général un bilan hydrique proche de zéro témoigne de la fin des précipitations. Cependant, du fait de la contribution du sol à l'alimentation en eau des cultures, on admet que la fin de la saison pluvieuse survient, en pratique, quelques jours après les dernières pluies.

IV.4.3. Début de la Floraison

Le choix de la date de la floraison est difficile à déterminer du fait que la durée de la phase semis floraison varie d'une année à l'autre, par suite de conditions climatiques différentes. On utilise alors le cumul de température à base 0 °C observé entre les deux phases. Les principales phases du cycle du blé nécessitent des cumuls partiels suivants :

- phase semis-levée : 150 degrés. jours
- phase levée-tallage : 500 degrés. jours
- phase tallage-floraison : 850 degrés. jours
- phase floraison-maturité des grains : 820 degrés. jours.

Ainsi, la date de floraison est déterminée à partir de la connaissance du cumul relatif à la phase semis-floraison qui est de l'ordre de 1500 degrés-jours.

En adoptant cette dernière valeur et en utilisant le cumul de températures à base 0 °C à partir du 1^{er} septembre, on aboutit aux résultats mentionnés dans le tableau 27 ci-dessous.

Tableau 27. Dates de semis et dates de floraison correspondantes.

| Jour de l'année | Date de semis | Cumul de températures à partir du 1 ^{er} septembre (degrés jours) | Cumul de températures de la phase semis-floraison | Date de floraison | N° de jour dans l'année |
|-----------------|---------------|--|---|-------------------|-------------------------|
| 31 | 01oct | 720 | 1500 | 4 janvier | 126 |
| 60 | 30oct | 1301 | 1500 | 21 février | 174 |
| 76 | 15nov | 1572 | 1500 | 13 mars | 195 |
| 91 | 30nov | 1784 | 1500 | 27 février | 209 |
| 106 | 15dec | 1975 | 1500 | 8 avril | 221 |

IV.4.4. Estimation des séquences sèches à partir de la floraison

L'événement que nous considérons ici concerne les séquences sèches. La saison des pluies, même si elle couvre une bonne partie des besoins en eau des cultures annuelles présente des discontinuités marquées par un nombre variable de jours secs. Du point de vue climatologique, on définit un jour sec comme étant un jour ayant reçu une pluie inférieure ou égale à 0.1 mm en 24 heures.

En agro climatologie, il est possible de déterminer, à partir de l'analyse des données quotidiennes de pluie, la durée de la plus longue séquence sèche pendant une période donnée, en particulier en période de floraison. Une sécheresse prolongée en pareille période provoque une élévation de température pouvant provoquer la coulure des fleurs.

Les durées des plus longues séquences sèches décomptées à partir des dates de floraison correspondant à chaque date de semis sont consignées dans le tableau 28 ci-dessous et représentées graphiquement en figures 71 à 75.

CHAPITRE IV : ADAPTATION A LA SECHERESSE

La commande appropriée pour le dénombrement des séquences sèches dans Instat+ est :

| Spell Lengths | | | | | |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|
| SPELL X1-X10;RANge 0 0.1;CONd ;FROm 126 174 195 180 221;DAYs 20;MAX X16-X20 | | | | | |
| Year | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Durée | X16 | X17 | X18 | X19 | X20 |
| Année1 | 15 | 3 | 20 | 5 | 10 |
| Année2 | 3 | 7 | 16 | 7 | 13 |
| Année3 | 9 | 20 | 20 | 20 | 5 |
| Année4 | 9 | 19 | 13 | 13 | 9 |
| Année5 | 6 | 9 | 7 | 9 | 20 |
| Année6 | 15 | 20 | 18 | 16 | 18 |
| Année 7 | 4 | 7 | 20 | 11 | 11 |
| Année 8 | 10 | 12 | 11 | 6 | 15 |
| Année 9 | 5 | 12 | 6 | 18 | 6 |
| Année10 | 15 | 8 | 13 | 11 | 9 |

Tableau 28. Durées des séquences sèches maximales à partir de la floraison.

| Année | Dates de floraison | | | | |
|-------|--------------------|------------|---------|------------|---------|
| | 4 janvier | 21 février | 13 mars | 27 février | 8 avril |
| 94/95 | 15 | 3 | 20 | 5 | 10 |
| 95/96 | 3 | 7 | 16 | 7 | 13 |
| 96/97 | 9 | 20 | 20 | 20 | 5 |
| 97/98 | 9 | 19 | 13 | 13 | 9 |
| 98/99 | 6 | 9 | 7 | 9 | 20 |
| 99/00 | 15 | 20 | 18 | 16 | 18 |
| 00/01 | 4 | 7 | 20 | 11 | 11 |
| 01/02 | 10 | 12 | 11 | 6 | 15 |
| 02/03 | 5 | 12 | 6 | 18 | 6 |
| 03/04 | 15 | 8 | 13 | 11 | 9 |

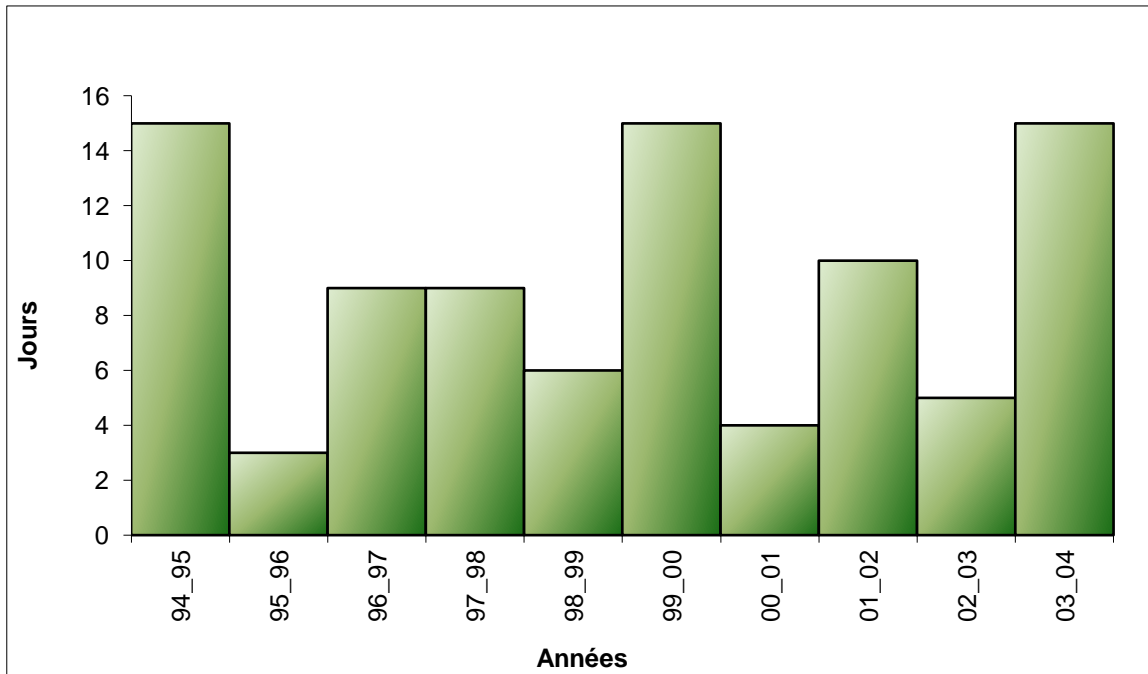


Figure 71. Durées des séquences sèches à partir de la floraison (Date de semis : 1er octobre).

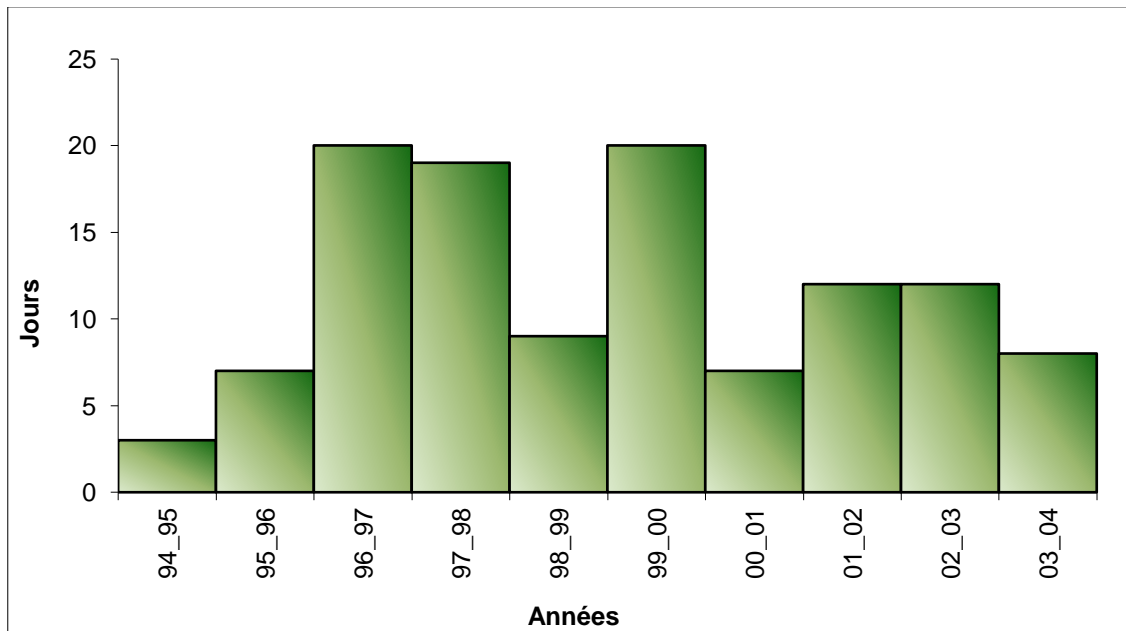


Figure 72. Durées des séquences sèches à partir de la floraison (Date de semis : 30 octobre)

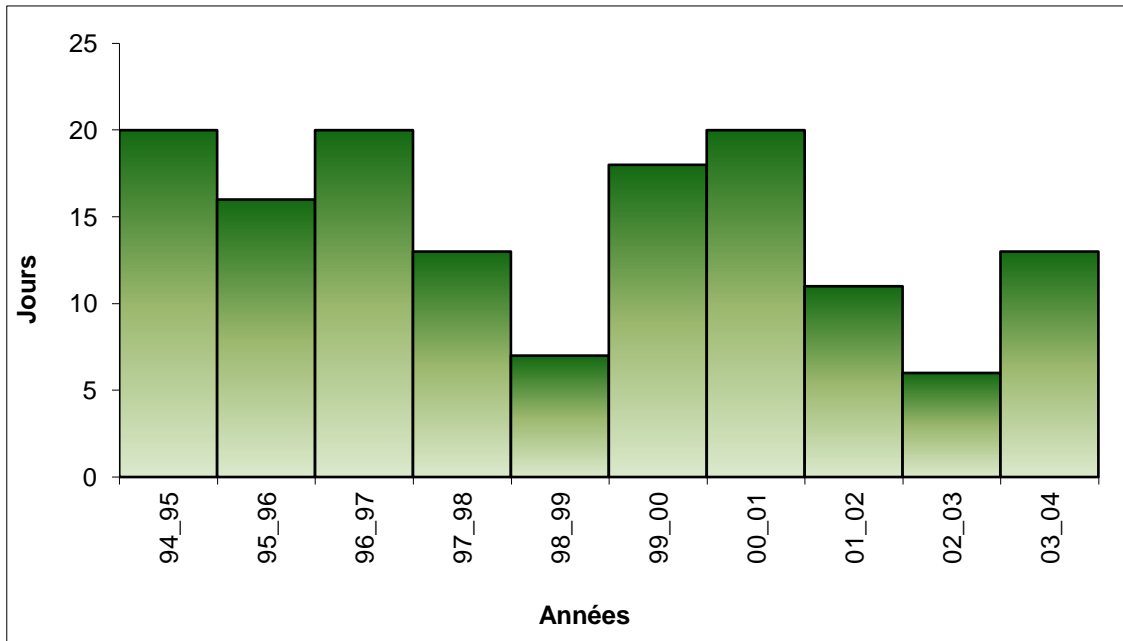


Figure 73. Durées des séquences sèches à partir de la floraison (Date de semis : 15 novembre).

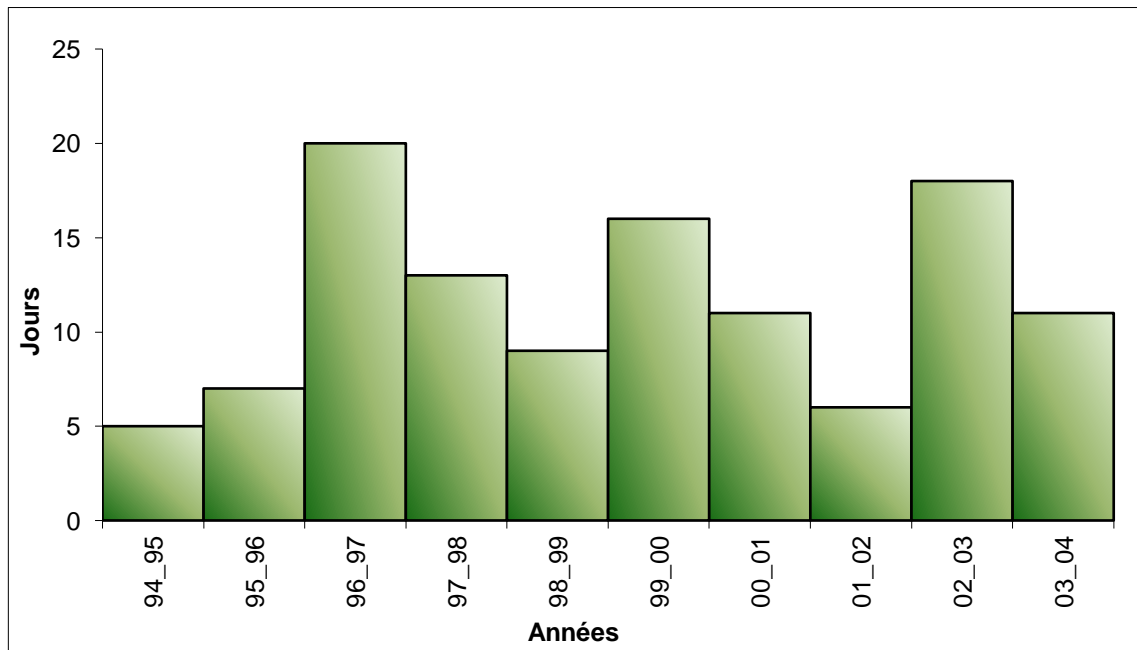


Figure 74. Durées des séquences sèches à partir de la floraison (Date de semis : 30 novembre).

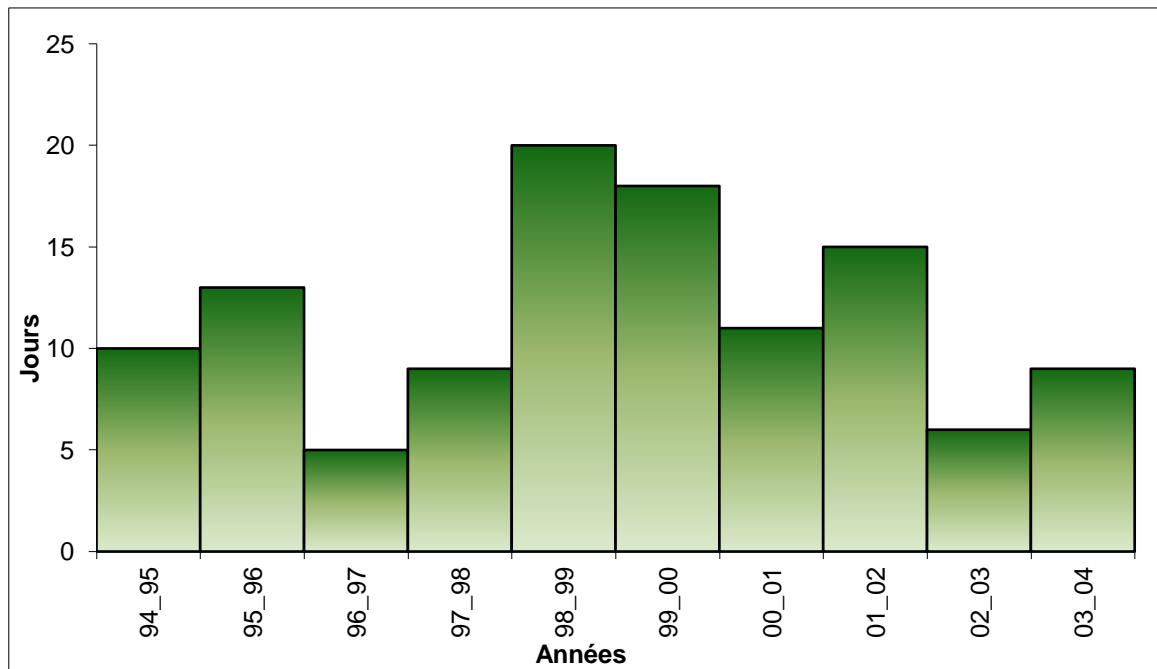


Figure 75. Durées des séquences sèches à partir de la floraison (Date de semis : 15 Décembre).

Le tableau 28 montre que les durées des séquences sèches à partir de la floraison peuvent aller de trois à vingt jours selon la date de semis. Il permet de conforter le choix préalable de la date de semis. Un semis précoce semble réduire le risque d'occurrence d'une longue sécheresse à partir de la floraison, il reste cependant à évaluer ce risque en termes de probabilités.

Le calcul des probabilités de certains événements climatiques nécessite un ajustement des pluies quotidiennes par le modèle de Markov. La phase préparatoire consiste à inventorier les jours secs, les jours pluvieux et les couples pluie-sécheresse et sécheresse-pluie pour le modèle de Markov d'ordre 1 à partir des pluies quotidiennes des dix années considérées.

Le tableau 29 ci-dessous présente un extrait de la phase préparatoire des données, à l'aide de la commande appropriée dans INSTAT+

Prepare daily rainfall data for Markov chain modelling

MARKov X1-X10;ORDer 1;COUnTs X12-X15;THR 0.1;PREvious 0;TOT X16;LOG X17

CHAPITRE IV : ADAPTATION A LA SECHERESSE

Tableau 29. Evènements climatiques à partir du 1er septembre.

| dd | dr | rd | rr | Tr | Ir |
|----|----|----|----|-------|----------|
| 7 | 0 | 3 | 0 | 12.9 | 1.45 |
| 6 | 3 | 1 | 0 | 0.154 | -1.87 |
| 9 | 0 | 0 | 1 | 0.916 | 7738E-02 |
| 7 | 1 | 2 | 0 | 3.8 | 0.959 |
| 7 | 2 | 1 | 0 | 0.5 | -0.693 |
| 9 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 1 | 0 | 0.1 | -2.302 |
| 9 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 1 | 0 | 5 | 1.609 |
| 8 | 0 | 1 | 1 | 3.6 | -1.04 |
| 8 | 1 | 0 | 1 | 8.5 | 2.14 |
| 9 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 1 | 0 | 3.1 | 1.131 |
| 9 | 0 | 0 | 1 | 5.2 | 1.648 |
| 9 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 2 | 0 | 11.04 | 3.172 |
| 8 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Nature des événements :

dd = jour sec suivi d'un jour sec

rd = jour sec suivi d'un jour pluvieux etc.....

Tr = pluie totale des jours pluvieux

Ir = Logarithme des valeurs et dont la somme permettra d'évaluer le paramètre de forme de la distribution gamma.

Ce tableau montre qu'il y a trois jours pluvieux et sept jours secs pour la date du premier septembre de la période utilisée, le total de la pluie des trois jours pluvieux est de 12.9 mm ;

un jour est considéré comme pluvieux s'il reçoit une quantité de pluie supérieure ou égale à 0.1mm.

Les probabilités conditionnelles (p_{rd} et p_{rr}) associées aux événements sont représentées à l'aide du graphique de la figure 76.

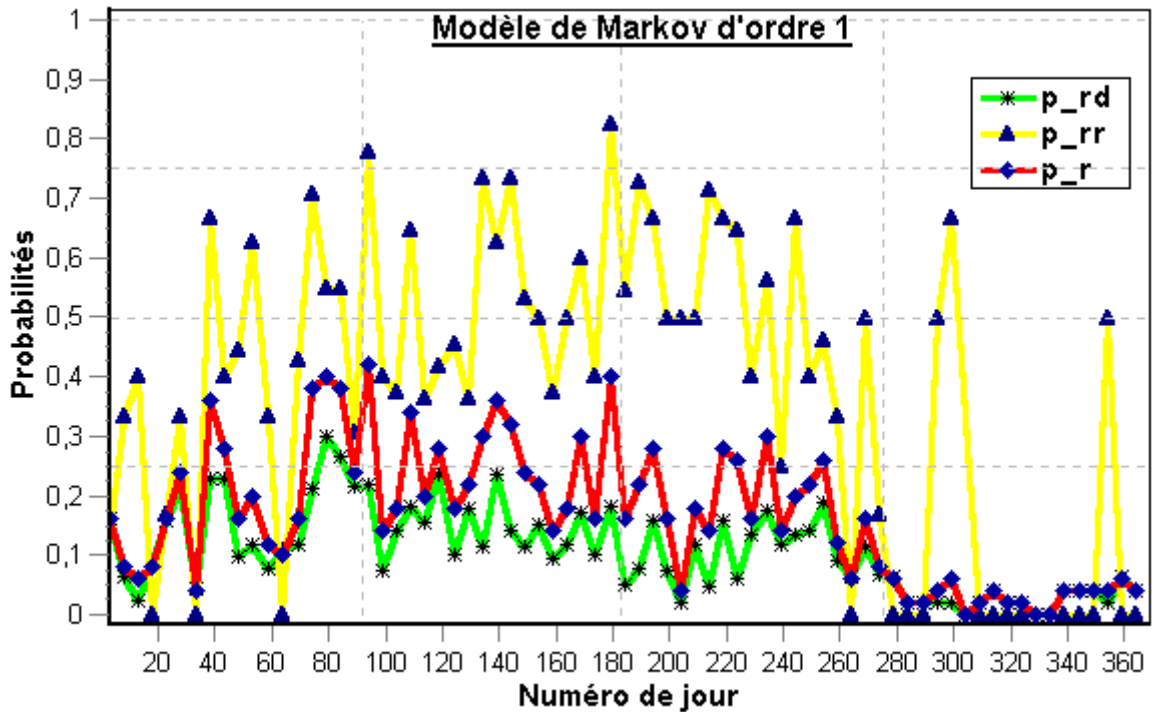


Figure 76. Probabilité d'occurrence d'événements climatiques.

p_r : Probabilité d'occurrence de la pluie pour un jour donné de l'année.

p_{rr} : Probabilité d'occurrence de deux jours consécutifs pluvieux

p_{rd} : Probabilité d'occurrence d'un jour pluvieux précédé d'un jour sec

Ces probabilités successives ajustées par le modèle de Markov sont représentées en figures 77 et 78 ci-dessous.

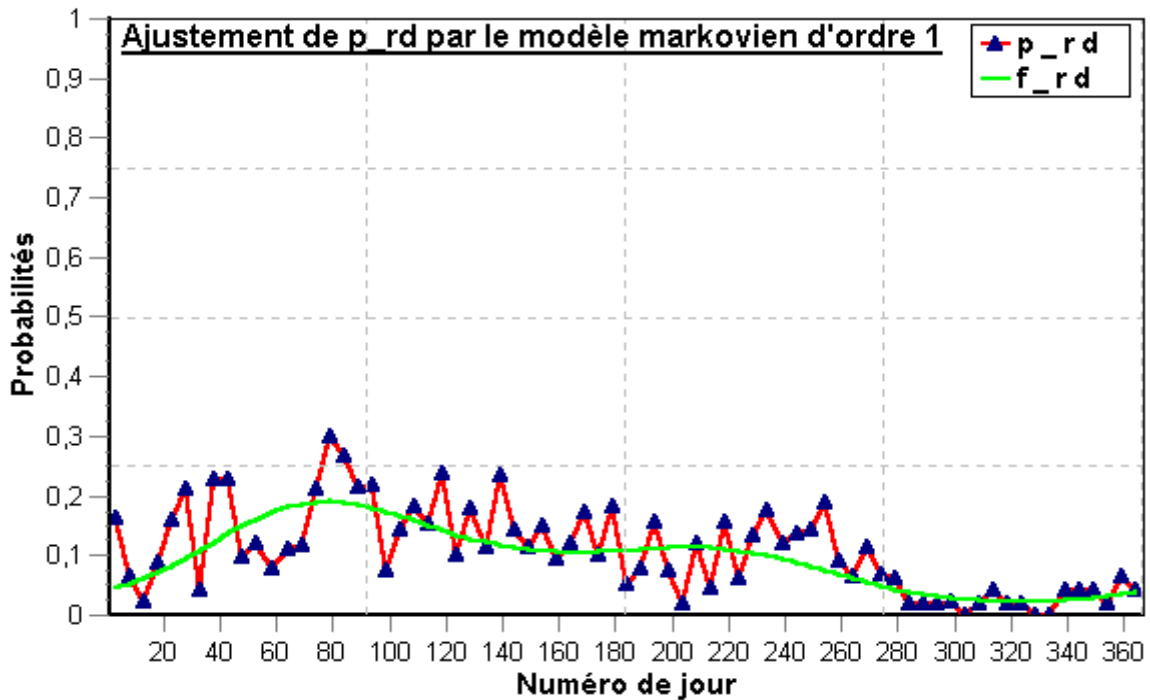


Figure 77. Ajustement de p_{rd} par le modèle markovien d'ordre 1.

p_{rd} : Probabilité de pluie d'un jour donné sachant que le jour précédent est sec.

f_{rd} : Probabilité p_{rd} ajustée par le Modèle de Markov d'ordre 1.

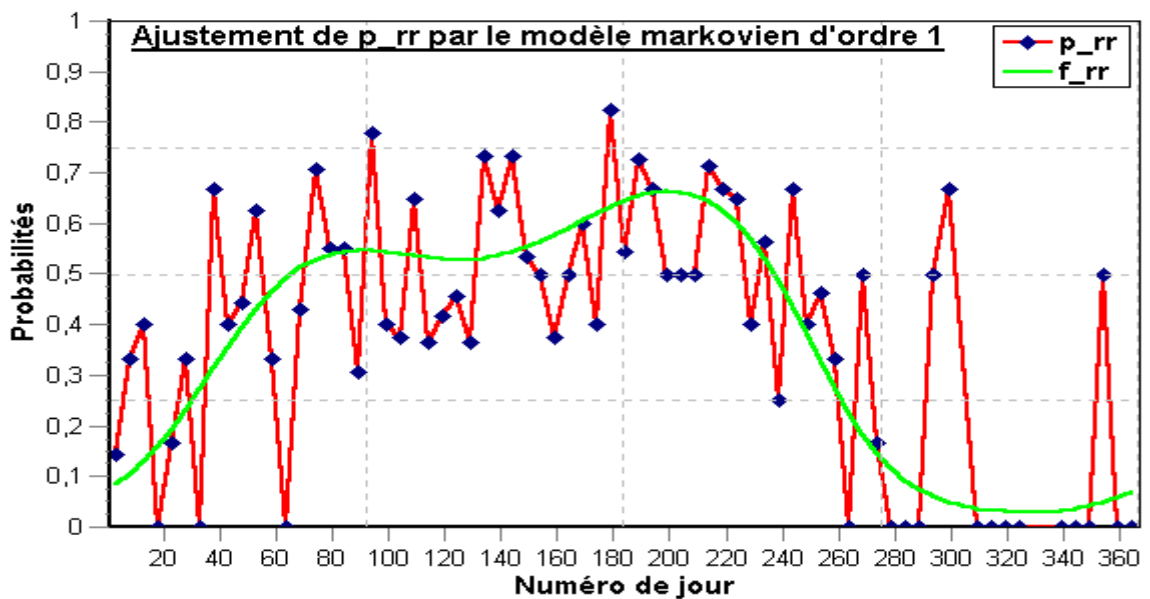


Figure 78. Ajustement de p_{rr} par le modèle de Markov.

p_{rr} : Probabilité de pluie d'un jour donné sachant que le jour précédent est pluvieux.

f_{rr} : Probabilité p_{rr} ajustée par le Modèle de Markov.

Les deux courbes résultantes ajustées par le Modèle de Markov sont représentées simultanément sur le même graphe (figure 79)

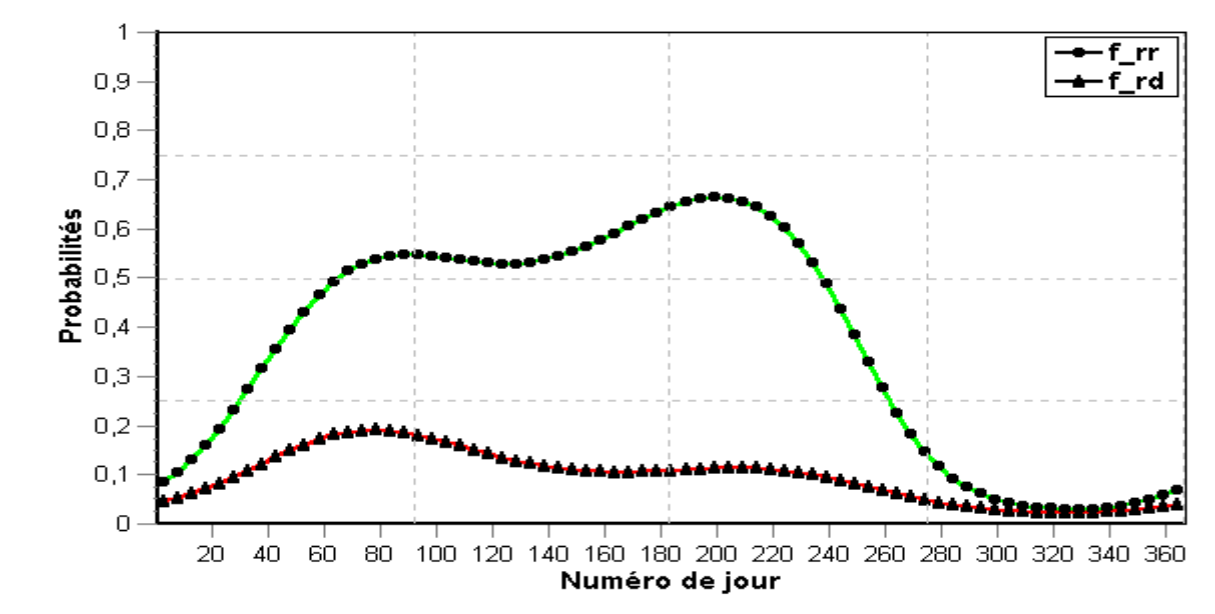


Figure 79. Courbes résultantes f_{rr} et f_{rd} ajustées par le Modèle de Markov d'ordre 1.

Cette courbe montre une relative continuité dans la distribution temporelle des précipitations entre début octobre et la fin avril. La probabilité d'un jour de pluie après un jour sec est plus importante en période automne-hiver (courbe en rouge) et relativement faible à partir du 240^e jour correspondant à la fin du mois d'avril. Ceci signifie un faible risque d'occurrence de séquence sèche en début de campagne agricole et de fortes chances qu'une longue sécheresse survienne à partir du début mai.

IV.4.5. Probabilités associées aux séquences sèches

Il s'agit de calculer les probabilités d'occurrence des séquences sèches pouvant survenir à partir de la floraison, soit au stade de forte sensibilité du blé au déficit hydrique. Ceci constitue un critère complémentaire pour un choix judicieux d'une date de semis, le premier critère étant, pour rappel, associé au début de la saison des pluies. Les deux critères ainsi réunis permettent de délimiter un itinéraire favorable au bon développement de la plante.

Le calcul portera sur des séquences de 7 jours (valeur modale prélevée dans la distribution des durées de sécheresse) et 11 jours (valeur susceptible de provoquer l'arrêt de la simulation par le modèle en déclarant une année sèche). Notons qu'une séquence sèche de 7 à 9 jours peut, dans certains cas, causer des dégâts physiologiques importants et réduire le rendement, sans toutefois compromettre complètement la saison agricole. C'est pourquoi nous avons considéré une séquence intermédiaire de 9 jours dans le calcul des probabilités. (Figures 80 à 84).

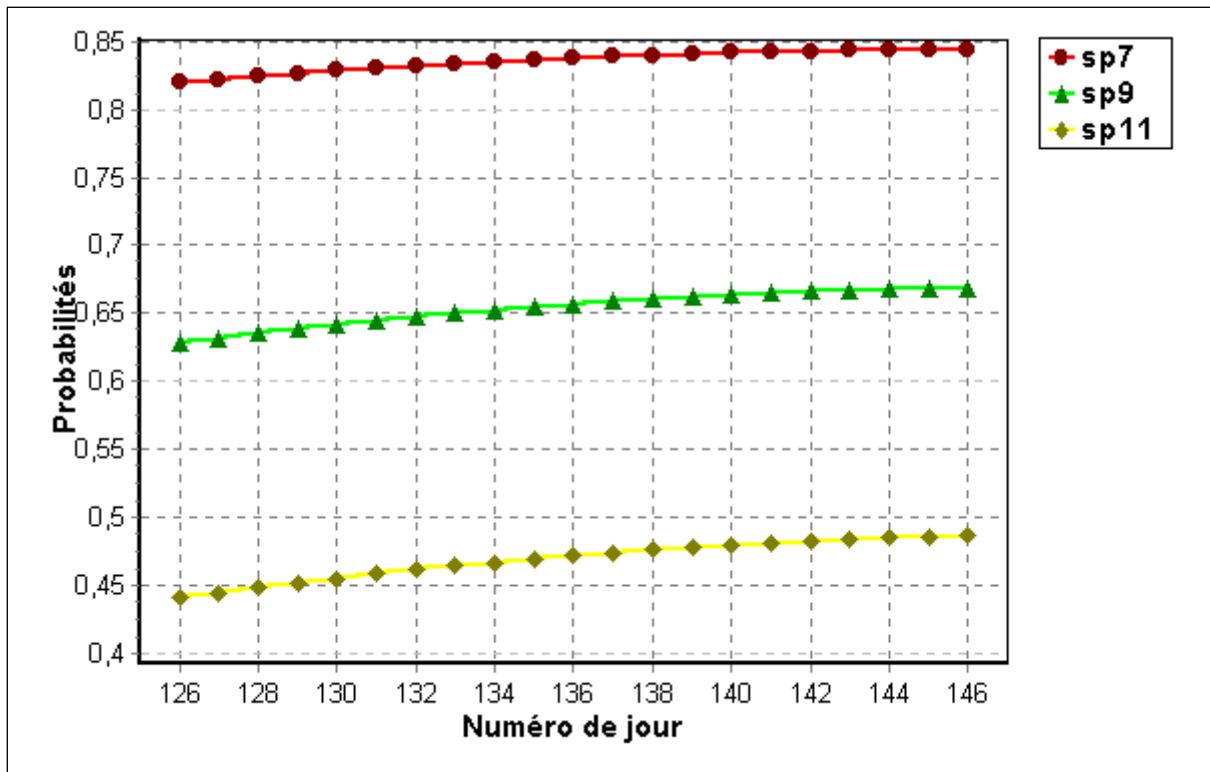


Figure 80. Probabilités d'occurrence de séquences sèches de 7, 9 et 11 jours à compter du 4 janvier (date de semis : 1 octobre).

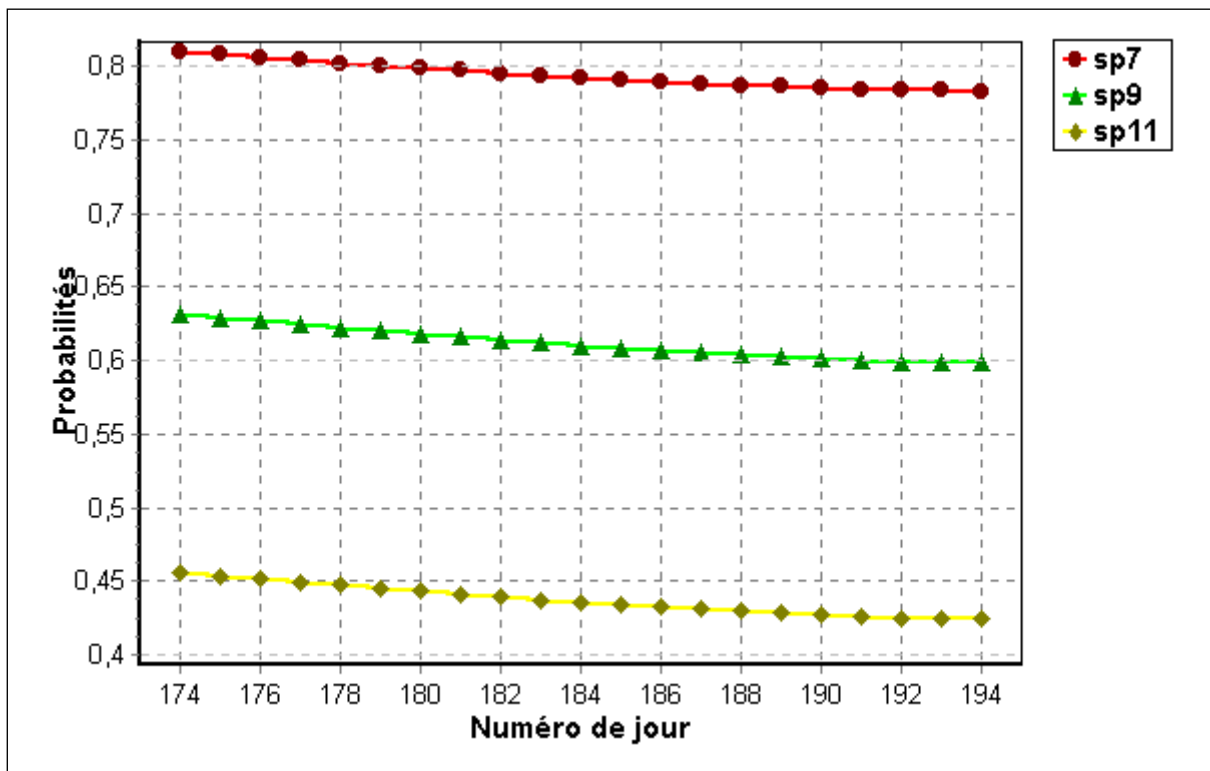


Figure 81. Probabilités d'occurrence de séquences sèches de 7, 9 et 11 jours à compter du 21 février (date de semis : 30 octobre).

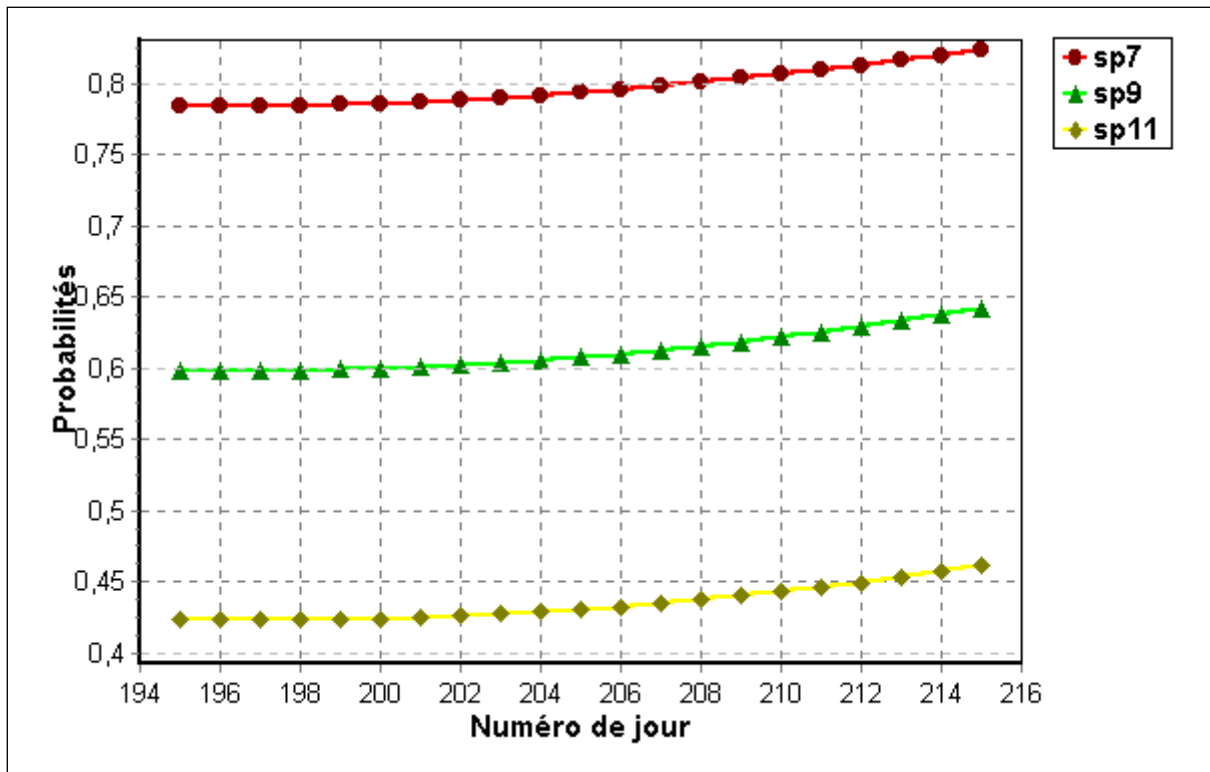


Figure 82. Probabilités d’occurrence de séquences sèches de 7, 9 et 11 jours à compter du 13 mars (date de semis : 15 novembre).

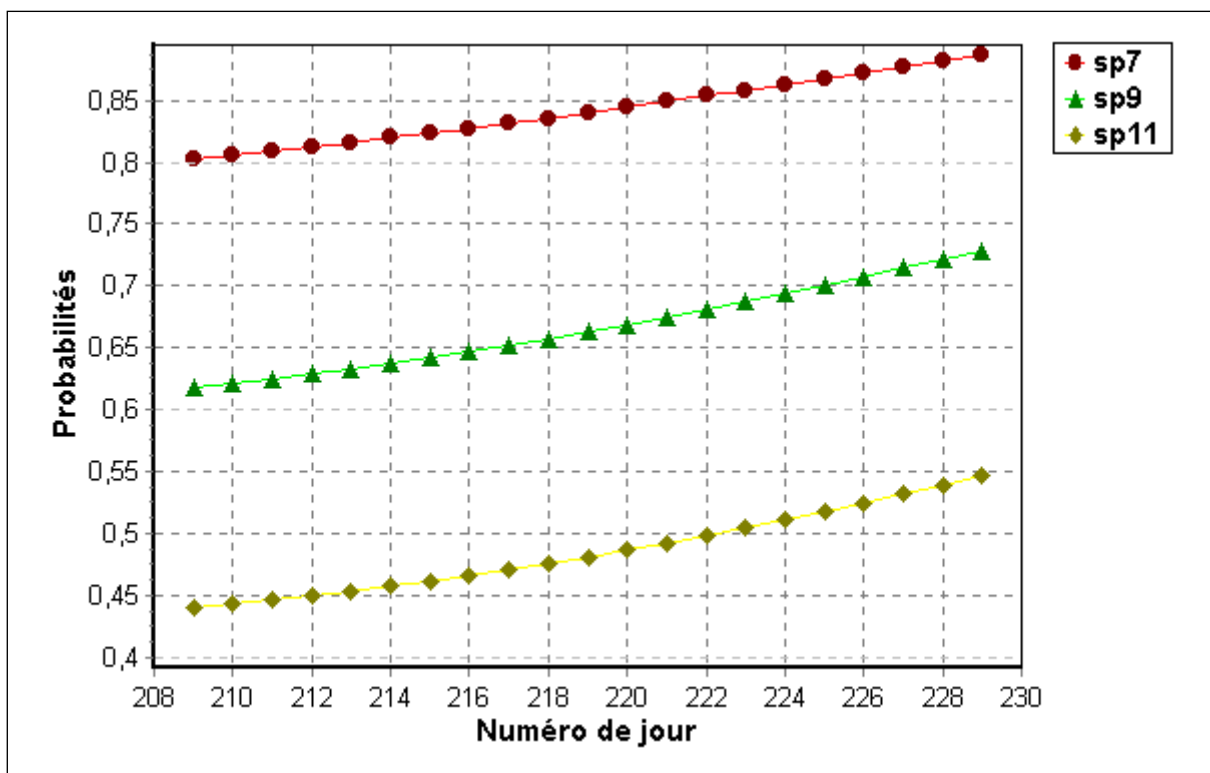


Figure 83. Probabilités d’occurrence de séquences sèches de 7, 9 et 11 jours à compter du 27 février (date de semis : 30 novembre).

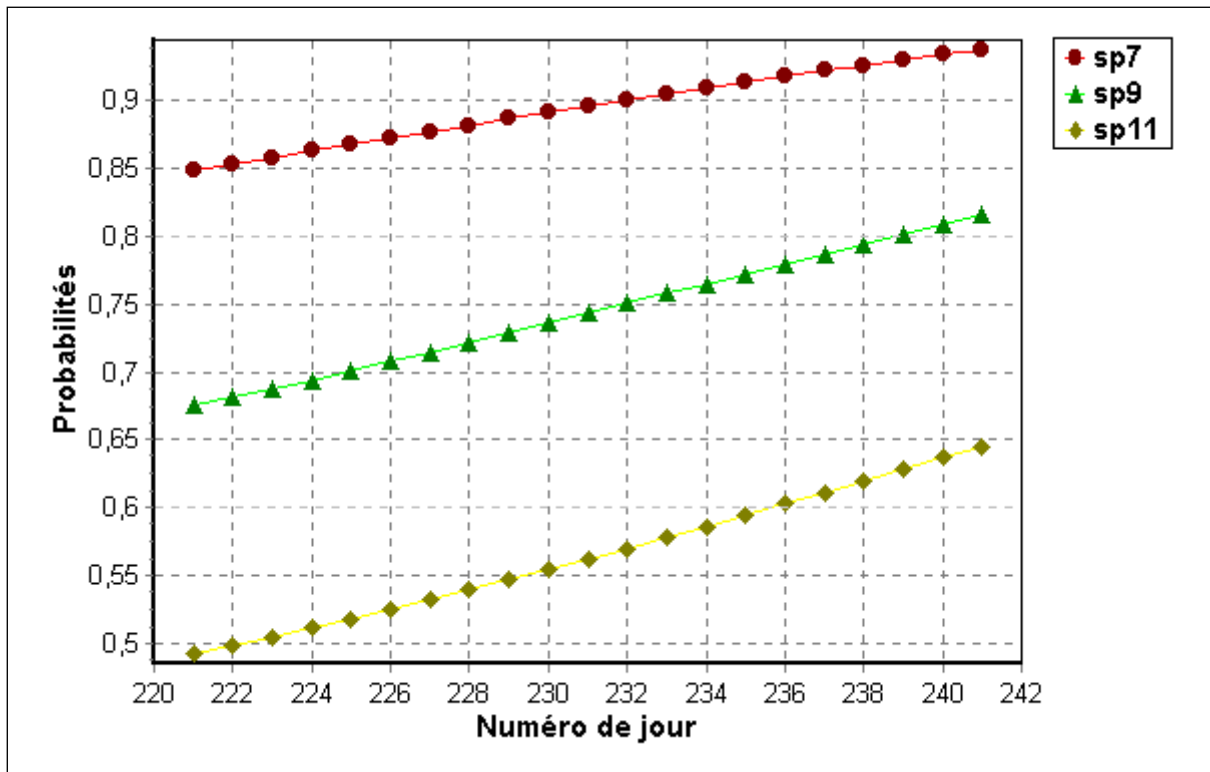


Figure 84. Probabilités d'occurrence de séquences sèches de 7, 9 et 11 jours à compter du 8 avril (date de semis : 15 décembre).

IV.5. Commentaires

Les séquences de sécheresse qui surviennent après la floraison induisent un stress hydrique qui affecte notamment la croissance des grains ainsi que le nombre de grains par épi (Aspinall, 1965).

Les probabilités associées à chacune des trois catégories de séquences augmentent au fur et à mesure que l'on se rapproche de la phase épiaison de sorte qu'un semis tardif (effectué vers le 15 décembre) exposera les plants de blé à la sécheresse et au risque d'échaudage physiologique.

Pour un semis effectué fin octobre, les probabilités d'épisodes secs après la floraison diminuent avec le temps du fait que le stade de floraison survient en période continue des pluies.

Conclusion

L'alternative entrevue présentement au changement climatique reste l'adaptation dite de premier degré consistant à revoir les pratiques agricoles adoptées jusque-là.

Il s'agit, entre autres, de délimiter des itinéraires biologiques adaptés au climat en cours et minimiser les risques liés aux variations qui l'accompagnent, notamment le risque de sécheresse.

Dans ce contexte, nous avons proposé une méthode basée sur l'analyse des pluies et des températures quotidiennes. Ces paramètres permettent de définir deux événements agro climatiques significatifs, à savoir le début de la saison des pluies et le stade de floraison et utilisés comme critères dans la détermination d'une date optimale de semis.

La modélisation montre qu'une grande proportion des précipitations survient, de manière continue entre novembre et avril, avec de fortes probabilités d'occurrence de jours consécutifs pluvieux.

Cette extension de la saison pluvieuse au-delà des limites habituellement observées sous nos latitudes peut être assimilée à une anomalie résultant du changement climatique et consistant en une délimitation moins nette entre les saisons météorologiques et un régime pluviométrique perturbé.

Ceci a favorisé l'occurrence de périodes sèches en phase de floraison, d'où la nécessité d'un réajustement de l'itinéraire biologique par un choix approprié de la date de semis, afin d'établir un calendrier agricole permettant à la culture de bénéficier au maximum des épisodes favorables du climat et de réduire les risques liés aux aléas climatiques dans les systèmes de production.

Dans notre cas, la simulation à partir de dates hypothétiques de semis montre qu'un semis tardif augmente la probabilité de sécheresse tandis qu'un semis précoce, effectué en fin octobre présente moins de risque d'échec, compte tenu du régime pluviométrique de la zone étudiée.

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

Le changement climatique, indépendamment des causes qui en sont à l'origine, est une réalité tangible, perceptible à travers des phénomènes extrêmes parmi lesquels les excédents pluviométriques ou les sécheresses récurrentes dont les conséquences se font de plus en plus sentir dans les diverses composantes de l'environnement, en particulier dans les secteurs de la santé et de l'agriculture.

En matière de santé animale, les résultats de notre étude montrent que la fièvre catarrhale ovine originaire des régions tropicales à climat chaud et humide est apparue dans la région d'El-Tarf à la faveur de conditions propices à la prolifération de l'insecte vecteur, à savoir les fortes humidités liées à la fois aux fortes précipitations et à l'existence de zones humides disséminées à travers la wilaya, associées à des températures relativement élevées.

Le bilan hydrique excédentaire durant les mois précédant l'épidémie explique en partie le développement de l'insecte. En effet l'ameublement du sol a permis de générer des gîtes larvaires par un taux de ponte élevé.

Les courbes ombrothermiques caractérisant les zones touchées par la maladie montrent une prévalence de celle-ci en période sèche, où le taux d'éclosion est important et la survie des larves assurée par les températures ambiantes élevées en pareille période, d'où un nombre élevé d'insectes adultes.

La tendance à la hausse des températures de ces dernières années a joué un rôle déclenchant dans l'émergence de la maladie : c'est ainsi que l'on a observé une nette prévalence de cette pathologie durant les mois de juillet et août des années 2000 et 2006 particulièrement marquées par la Blue Tongue dans les wilayas frontalières.

Le déplacement des insectes adultes est également favorisé par l'intensité de la lumière. Les durées d'insolation élevées sont généralement associées à de fortes intensités lumineuses, à l'origine de la dispersion active de l'insecte, augmentant ainsi aussi bien le nombre de foyers que le nombre de cas par foyer. Les fortes incidences observées à Guelma et Souk Ahras en Juillet semblent confirmer l'interdépendance de l'insolation et de la FCM

De plus, les principaux paramètres climatiques que sont la température et les précipitations sont régulièrement cités pour leur rôle sur la répartition et la dynamique des Culicoides. Ainsi, pour des températures favorables, la pluviométrie peut avoir un effet majeur sur la distribution et l'abondance de ces espèces (Mellor, 2004).

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

La vitesse et la direction du vent sont aussi des facteurs pouvant affecter la distribution des Culicoides adultes par une dispersion passive de ces derniers sur de larges distances (Braverman & Chechik, 1996; Alba et al. 2004).

Dans notre cas, nous avons à dessein, établi les différentes roses de direction et vitesse du vent au niveau des zones d'infestation pour indiquer la direction probable de l'insecte vecteur. Les différents tracés justifient en grande partie la distribution géographique de la maladie ; d'autres facteurs pouvant favoriser la « dispersion » de la maladie, tels que le transport de cheptel n'ont pas été considérés dans notre étude.

Enfin cet exemple confirme la possibilité d'apparition de pathologies nouvelles à la faveur du changement du climat. Leur prise en charge convenable nécessite des mesures de prévention et d'adaptation, parmi lesquelles :

- La surveillance de la tendance climatique.
- La formation en santé publique, consolidée par des connaissances en climatologie environnementale afin d'anticiper le type de pathologie pouvant résulter d'une brusque fluctuation du climat.
- Une mise en œuvre de systèmes d'alerte précoce performants
- Le maintien de la population dans un état de santé satisfaisant pour une plus grande résistance face à une épidémie.
- La remise en état et le maintien de l'infrastructure de santé publique pour répondre immédiatement à une situation d'urgence liée à un événement climatique.

Quant à l'impact du changement climatique sur l'agriculture, à travers l'exemple de la culture du blé, la réponse des différents paramètres de croissance aux paramètres du climat montre bien l'interdépendance climat-agriculture et qu'une tendance défavorable du climat peut réduire considérablement la production agricole.

Ainsi, la sécheresse ayant marqué la saison agricole 1993-1994 a eu pour effet de modifier le cycle biologique du blé par un raccourcissement des phases phénologiques, en particulier la phase de remplissage du grain, entraînant la diminution du poids du grain (Bruns et al. 1983) et par suite une réduction de rendement. Pour atténuer un tant soit peu cet effet réducteur de la sécheresse, la solution à court terme est de s'adapter aux effets changeants du climat qui demeure, sous nos latitudes, le principal régulateur de la production agricole.

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

La stratégie d'adaptation préconisée à cet effet repose sur une analyse statistique de l'occurrence de certains événements climatiques et permet de prédéfinir un itinéraire favorable au cycle du blé. De même, la méthode proposée comporte sans doute une part d'incertitude liée à l'extrapolation en avenir incertain car la sécheresse est et demeure un phénomène extrême imprévisible. Aussi est-il nécessaire de prendre des mesures complémentaires visant à limiter dans une large mesure les incidences négatives du climat sur l'agriculture et assurer une meilleure productivité. Pour cela, il convient

- D'adapter les pratiques culturales au changement climatique en cours,
 - De former des agriculteurs aux nouvelles techniques et technologies d'adaptation et d'atténuation
 - D'intégrer les changements climatiques dans les programmes de productivité agricole
 - D'amener les organismes de recherche et de vulgarisation agricole à associer les travaux de mise au point de variétés résistantes au changement climatique aux efforts d'amélioration des rendements.
-
- D'intégrer les considérations liées au changement climatique dans les politiques relatives à la sécurité alimentaire, s'agissant notamment de la recherche agronomique, des infrastructures et des services sociaux.
 - Tenir compte enfin des considérations liées aux changements climatiques à tous les niveaux de processus de planification et de prise de décision aux échelons national et régional.

Ces mesures d'adaptation permettent d'atténuer quelque peu les incidences négatives liées au changement du climat mais peuvent être complétées ultérieurement par des mesures de niveau supérieur comme la sélection variétale, objet de recherche de nombreux scientifiques de par le monde.

BIBLIOGRAPHIE

Abderrahmani B., Abbou M., Dobbi A. et Hassini N., Evénements climatiques : Caractérisation de la sécheresse dans la région d'Oran, Actes du XIX Colloque de l'AIC, Epernay, pp37-42, 2006.

Agoumi A., Snoussi S., Yacoubi M., Fakhredine A., Sayouti E.H., Mokssit A., Chikri N., (1999) : « *Changement climatique, ressources en eau* ». Hydrogéologie appliquée, 12(11), 163-182.

Army, T.J.1959.Precipitation yield relationships in dry land wheat production on medium and fine textured soils of the Southern High Plains. Agron.J., vol.51, no 12, p.721-724.

Arnell NW. Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change – Human and Policy Dimensions*, 2004, 14:31–52.

Asana., R. D., Mani,V.S, 1958. Analysis of drought resistance in crop plants.2: The influence of soil-drought on the relation between yield and ear characters in wheat.Indian J. Genet., vol.18, no 2, p. 187-198.

Asana, R. D., Saini, A.D ; Ray, D. 1958. Studies in physiological analysis of yield. III: The rate of grain development in wheat in relation to photosynthetic surface and soil moisture. *Physiologia Pl.*, vol.11, p 655-665.

Aspinall, D. The effects of soil moisture stress on the growth of barley. II: Grain growth. *Aust. J. Agric. Res.*, vol.16, p 265-275, 1965.

Benblidia M., Margat J., Vallee D., (1997) : « *L'eau en région méditerranéenne* ». Plan Bleu.

Bethan V. Purse, « Climate change and the recent emergence of bluetongue in Europe », *Nature Reviews Microbiology*, vol. 3, n° 2, février 2005, p. 171-181.

Bindi M., Moriondo M., (2005): "*Impact of a 2°C global temperature rise on the Mediterranean region : Agriculture impacts in the Mediterranean resulting from a 2°C global temperature rise*". WWF Report, pp. 54-66.

BIBLIOGRAPHIE

Bingham, J. Variety response in wheat to water supply in the field, and male sterility caused by a period of drought in a glasshouse experiment. *Ann. appl. Biol.*, vol 57 p 365-377, 1966.

Bouguerre K., (2001) : Potentialités en ressources en eau superficielle du Nord du pays (Algérie), N°71/ANRH/DHYL, 10p.

Bouma M, van der Kaay H. The El Niño Southern Oscillation and the historic malaria epidemics on the Indian subcontinent and Sri Lanka: an early warning system for future epidemics? *Tropical Medicine and International Health*, 1996, 1(1): 86-96.

Bouma MJ et al. Global Assessment of El Nino's Disaster Burden. *Lancet*, 1997, 350: 1435-1438.

Bouma MJ, van der Kaay HJ. Epidemic Malaria in India's Thar Desert. *Lancet*, 1995, 373: 132-133.

Brunetti M., Maugeri M., et Nanni T., Changes in total precipitation, rainy days and extremes events in Northern Italy, *Int. J. Climatol.*, 21, pp 861-871, 2001.

Choisnel E, l'agro météorologie, outil de décision, la météorologie VII^e série N°42 p 4-10, 1992.

Climate change 2007. Impacts, adaptation and vulnerability. Genève, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), 2007. Contribution du groupe de travail II au quatrième rapport du GIEC.

Cruiziat et J.P. Lagouarde Ed. INRA, Unité de bioclimatologie, Thiverval-Grignon, France, 62-82 (1996).

Dastane N.G., Précipitations efficaces, *Bull. FAO Irrigation et drainage*, 25, p 94-100, 1977.

Dept of Health (UK) Health Effects of Climate Change in the UK. London: DoH 2002.

BIBLIOGRAPHIE

DGAI, CIRAD & AFSSA. Vade-mecum sur la fièvre catarrhale ovine.

Direction des Services Agricoles de la wilaya d'Oran (DSA).

Djellouli Y.,(1990) : Flore et végétation de l'Algérie septentrionale. Thèse de doctorat d'Etat, USTHB.Alger 239p. +annexes.

Djellouli Y., (2006) : « *Ressources en eau dans les zones arides et semi-arides au Maghreb* ». *Actes du colloque, 24 p., Colloque international, WATARID, Urumqui, Chine, octobre 2006.*

Djellouli Y., (2007) : Impacts des changements climatiques dans les zones arides au Maghreb, acte des journées internationales sur l'impact des changements climatiques sur les régions arides et semi-arides,CRSTRA Biskra 15-17 décembre 2007.

Downing T.E., Ringius L., Hulme M., Waughray D., (1997) : "*Adapting to climate change in Africa, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*". 2(1), 19-44.

Fagan B. Floods, Famines and Emperors. El Nino and the Fate of Civilisations. New York: Basic Books, 1999.

FAO. Manual on the Preparation of National Animal Disease Emergency Preparedness.

Fedoroff N. & Courty M. , 1999.*Soil and soil forming processes under increasing aridity. In: Paleoenvironmental reconstruction in arid lands (ed. Singhvi A.K& Derbyshire E) pp 73-108, Oxford & IBH Publishing Co. PVT. Ltd, New Delhy.*

Fischer, R.; Kohn, G.D.1966. The relationship of grain yield to vegetative growth and post-flowering leaf area in the wheat crop under conditions of limited soil water.Aust,J. agric. Res., vol 17, p 281-295.

Gerbier G., Zientara S., Albina E., Grillet C., Gregory M., Baldet T. Fièvre catarrhale Ovine : évolution et répartition des sérotypes dans le bassin méditerranéen et en France. Bull. Epid.Afssa DGAI, 2004, **15**, 3-5.

BIBLIOGRAPHIE

Glantz M.H., (eds) (1988) : "*Societal responses to climate change : Forecasting by analogy*". Boulder : Westview Press.

Hales S et al. Potential effect of population and climate changes on global distribution of dengue fever: an empirical model. *The Lancet*, 2002, 360:830–834.

Hales S et al. Dengue Fever Epidemics in the South Pacific Region: Driven by El Nino Southern Oscillation? *Lancet*, 1996, 348: 1664- 1665.

Hales S. et al. Potential effect of population and climate changes on global distribution of dengue fever: an empirical model. *Lancet*, 2002, 360: 830-834.

Hénia L., (1993) : Climat et bilan de l'eau en Tunisie : essai de régionalisation climatique par les bilans hydriques, 2 vol. (391p.- 2 cartes).

Houghton J.T., Meira Filho L.G, Callender B.A., Harris N., Kattemberg A., Maskell A., Climate change 1995. The science of climate change. (eds), Cambridge University Press, Cambridge. IPCC, 1995.

Houghton T. T., Ding Y., Griggs D.J., Noguera M., Van Der Linden P.J. & Xiaosu D., (Eds.), 2001: "*Climate change: The Scientific Basis*". Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, UK. Pp 944.

Hourigan JL, Klingsporn AL. Epizootiology of bluetongue: the situation in the United States of America. *Aust Vet J.* 1975 Apr; 51(4):203–208.

Hulme M., Wigley T.M.L., Barrow E.M., Raper S.C.B., Centella A., SIMI li S. & Chipanshi A.C., (2000) : "*Using a Climate Scenario Generator for and Adaptation Assessments*". MAGICC and SCENGEN Version 2.4 Workbook, Climatic Research Unit, UEA, Norwich.

Iglesias A., Minguéz M.I., (1997) : "*Modelling crop-climate interactions in Spain : vulnerability, adaptation of different agricultural systems to climate change, Mitigation, adaptation and Strategies for Global Climate Change*". 1,273- 288.

BIBLIOGRAPHIE

IPCC. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution du Groupe de travail II au Troisième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge, Cambridge University Press, 2001.

Joffe, A.; Small, J. G. C. 1964 The effects of periods of water stress on the growth and tillering of wheat and oats under controlled conditions. *Phyton*, vol. 21, p 69-76.

Kadik B., (1983) : « *Contribution a l'etude du Pin d'Alep (Pinus halemensis MILL) en Algerie ecologie, dendrometrie, morphologie* ». These de doctorat es Sciences Université Aix-Marseille 320 p. + annexes.

Kalkstein LS, Greene JS. An Evaluation of Climate/Mortality Relationships in Large US Cities and the Possible Impacts of Climate Change. *Env.Hlth.Pers.*, 1997, 105(1): 84-93.

Kates R.W., (2000) : "*Cautionary tales : Adaptation and the global poor, Climatic Change*". 45(1), 5-17.

Katz R.W., Brown B.J., (1992) : "*Extreme events in a changing climate, Climatic Change*". 21, 289-302.

Kirkham M.B., , B.A. Stewart et D.R. Nielsen plant response to water deficit, In irrigation of agricultural crops Ed., Agronomy monograph **30**, ASA-CSSA-SSSA, Madison WI,USA, 323-342, 1990.

Le Houerou H.N., (1992) : "*Vegetation and land-use in the Mediterranean bassin by the year 2050 : A prospective study*". In: L. Jeftic, J.D. Milliman, G. Sestini (eds), «*Climatic Change and the Mediterranean*». Unep. Vol 1 (pp. 175-232).

L'évolution du climat (GIEC). Climate Change 2001: Third Assessment Report (Volume I). Cambridge, Cambridge University Press, 2001.

Lindgren E, Gustafson R. Tick-borne encephalitis in Sweden and climate change. *Lancet*, 2001, 358(9275): 16-87.

BIBLIOGRAPHIE

Magalftaes A.R., (1996) : "*Adapting to climate variations in developing regions : a planning framework*". In : J. Smith, N. Bhatti, G. Menzhulin, R. Benioff, Budyko, M. Campos, B. Jallow, & F. Rijsberman (eds.).

Margat J., Vallee D., (1999) : « *Vision mediterraneenne sur l'eau, la population et l'environnement au XXI' sieck* ». Plan Bleu.

Martens WJM, Rotmans J, Rothman DS In: Martens WJM, McMichael AJ,eds. Environmental Change, Climate and Health:Issues and Research Methods. Cambridge: Cambridge University Press, 2002, pp. 197-225.

Meiswinkel R. Discovery of a Culicoides imicola-free zone in South Africa : preliminary notes and potential significance. Onderstepoort J. Vet. Res., 1997, **64**,81-86.

Mellor, P. S. & Leake, C. J. Climatic and geographic influences on arboviral infections and vectors. Rev. Sci. Tech., 2000,19,41-54.

Mellor PS (2004) Environmental influences on arbovirus infections & vectors. In: Microbe-Vector Interactions in Vector-Borne Diseases, 63rd Symposium of the SGM, University of Bath, March 2004, (eds. SH Gillespie, GL Smith & A Osbourn), Cambridge University Press, pp. 181-198.

M.L.Parry, 1990 "*Climate Change and world agriculture, Earthscan Publications Ltd, 1990*

Moiselin J.M, Canelas M., Schneider M., Dubuisson B., Les longues séries de référence pour l'étude des changements climatiques, Actes des journées AMA Météo France, Toulouse, pp. 95-98, 2003.

Munasinghe M, Swart R. eds. Colombo, Sri Lanka, LIFE; Bilthoven, The Netherlands, RIVM; and Washington D.C., USA, World Bank, 1999, pp. 215-

NOAA. NOAA releases century's top weather, water, and climate events. 1999.

<http://www.noaanews.noaa.gov/stories/s334b.htm>.

BIBLIOGRAPHIE

OCHA. UNDAC Mission Report Fiji Drought. Bureau de la coordination des affaires humanitaires des Nations Unies, 1998.

Office National de la Météorologie Dar El Beida , Alger : Bulletin climatologique mensuel.

OMS. Rapport sur la santé dans le monde 2000 : Pour un système de santé plus performant. Organisation mondiale de la Santé, Genève, Suisse.

OMS, Rapport sur la santé dans le monde 2002: Réduire les risques et promouvoir une vie saine. OMS, Genève, 2002.

Ould Amara K., (2000) : la sécheresse en Algérie. ANRH Bir Mourad Rais 5P.

Parry ML, Carter T. Climate impact and adaptation assessment. London, UK, EarthScan, 1998.

Pascual M et al. Cholera dynamics and El Niño Southern Oscillation. Science, 2000, 289: 1766-69.

Patz JA et al. Effects of environmental change on emerging parasitic diseases. Int J Parasitol, 2000, 30(12-13): 1395-405.

Patz JA et al. The potential health impacts of climate variability and change for the United States: executive summary of the report of the health sector of the US National Assessment. Environ Health Perspect, 2000, 108: 367-376.

PNUD. Rapport mondial sur le développement humain 2000: Droits de l'homme et développement humain. Programme des Nations Unies pour le développement. Oxford University Press, New York, NY, USA.

PNUD-FEM, (1998) : « *Changements Climatiques et Ressources en Eau dans les pays du Maghreb, Algérie, Maroc, Tunisie : enjeux et perspectives* ». Projet RAB/94/G31.

BIBLIOGRAPHIE

Rayner S, Malone EL. Climate change, poverty and intragenerational equity: the national level. In: Climate change and its linkages with development, equity and sustainability. Actes de la réunion du GIEC à Colombo, Sri Lanka, 27-29 avril, 1999.

Rosensweig C., Tubiello F.N., (1997): "*Impacts of global climate change on Mediterranean: current methodologies and future directions, Mitigation, adaptation and Strategies for Global Climate Change*". 1, 219-232.

Santé Canada. National Health Impact and Adaptation Assessment Framework and Tools. Ottawa, Bureau du changement climatique et de la santé, Santé Canada, 2002.

Sellers, R. F. & Mellor, P. S. Temperature and the persistence of virus in *Culicoides* spp. during adverse conditions. *Revue Scientifique et Technique de l'Office International des Epizooties*, 1993, 12, 733-755.

Tardieu F., T.Améglie, N.Breda et S.Dayan, Régulation des transferts hydriques chez les plantes soumises à la sécheresse, In Actes de l'Ecole-chercheurs INRA en bioclimatologie, Le Croisic ? 3-7 avril, tome 1 : De la plante au couvert végétal, P.

Tardy Y. Probst J-L., 1992. Sécheresse, crises climatiques et oscillations du climat depuis cent ans. *Sécheresse*, Vol. 3. N°1. Pp 25-36.

United Nations, 1998: « Report on the adequacy of the global climate observing systems ». Framework Convention on Climate Change, November 2-13, 1998 Buenos Aires, Argentina, October. GCOS-48. Pp34.

US Centers for Disease Control (CDC). Rapid health needs assessment following Hurricane Andrew - Florida and Louisiana, 1992. *Morbidity and Mortality Weekly Report*, 1992, 41 (37): 685.

Walker, A. R. Adult lifespan and reproductive status of *Culicoides* species.

Walther G et al. Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 2002, 416: 389-395.

| BIBLIOGRAPHIE

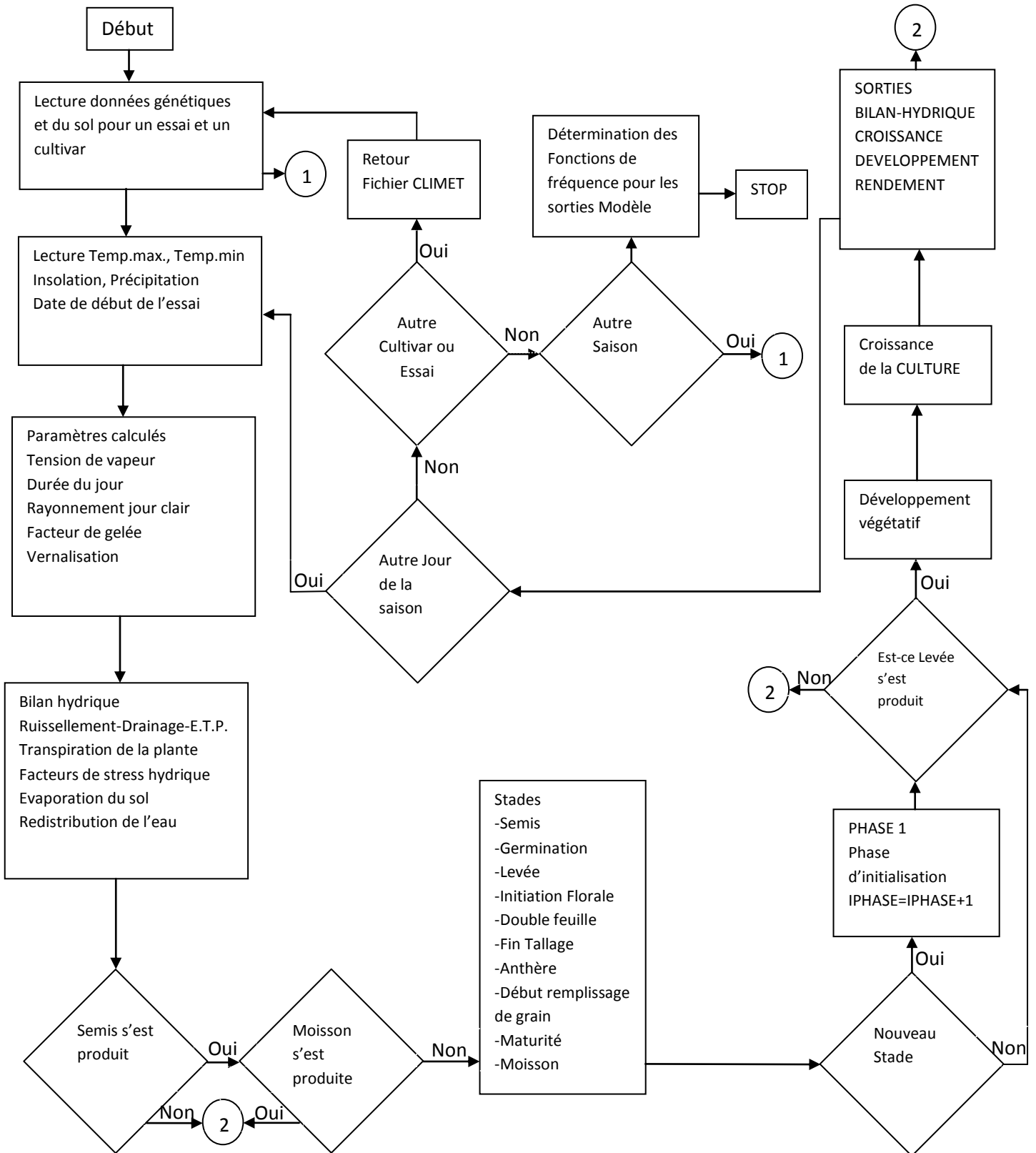
Ward, M. P. Climatic factors associated with the prevalence of bluetongue virus infection.

WHO Health impact assessment as a tool for intersectoral health policy. WHO European Centre for Environment and Health/European Centre for Health Policy, 1999.

Wilson ML. Ecology and infectious disease, in *Ecosystem Change and Public Health: A Global Perspective*, JL Aron, JA Patz, eds. Baltimore, Johns Hopkins University Press, 2001, pp. 283-324.

Zhou XN et al. Potential impact of climate change on schistosomiasis transmission in China. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 2008, 78:188–194.

ANNEXE I: ORGANIGRAMME DU MODELE SIMTAG



ANNEXE II: LEXIQUE DES NOMS DE VARIABLES UTILISEES

| | |
|---|---|
| ABLA(IT) | Surface réelle du développement des feuilles du pampre du nombre de talles. |
| ABLAGR : | Augmentation journalière de la surface des feuilles par pampre en cm^2 . |
| ABLAHX (IT, LFNO(IT)) : | Surface maximale du pampre pour un certain nombre de feuilles LFNO(IT) attendu au tallage IT en cm^2 . |
| ABLAT(M) : | Augmentation journalière en surface par pampre de M jours après le début de la phase 2, utilisée pour simuler le retard de l'expansion des feuilles des talles comparée à la tige principale en cm^2 . |
| ABLAX : | Surface du pampre restant après avoir atteint ABLAMX (IT, LFNO (IT)) de la surface des feuilles du pampre débutant à la feuille suivante en cm^2 . |
| AIRR(J) : | Dose d'irrigation ajoutée au jour julien J en mm. |
| ALBEDO : | Albédo de la surface ou reflectance. [-]. |
| ALPHA : | Le facteur de conversion de matière sèche. |
| ALPHAS : | Le facteur du sol affectant le taux d'évaporation durant le second stade (en $\text{mmj}^{-0.5}$). |
| ANGLE : (en degrés) | Angle zénithal distant du centre du disque solaire. |
| APLT : | Surface de la feuille par plante (cm^2). |
| APLT4 : | Surface de la feuille à l'anthere en cm^2 . |
| ATIL(IT) | Surface de la feuille des tailles IT en cm^2 . |
| CEP : | Transpiration cumulative de la plante en mm. |
| CES : (en mm.) | Evaporation cumulative du sol à partir du jour IBEGIN. |
| CET (en mm) | Evapotranspiration cumulative au jour IBEGIN. |
| CFDATR : | Facteur de conversion des jours en radians rad.j^{-1} |
| CFDGTR | Facteur de conversion de degrés en radians (rad deg^{-1}). |
| CFRATH : | Facteur de conversion de radian en heure en h.rad^{-1} . |
| CN2 : | Nombre de courbe établie pour les conditions de l'humidité moyenne du sol. |
| CPOOL : | Comparaison de la tige moyenne à la croissance du grain (céréale) ; la différence entre DTWTSMN g.plant^{-1} . |
| DAYLFC : | Facteur de longueur de jour qui influe sur l'apparition de la feuille et la phase du développement. |
| DAYLIN : | Taux journalier d'échange en DAYLNC à la date de la levée (hc). |
| DAYLN : | Longueur de jour entre le levée et le coucher du soleil. (hc). |
| DAYLNC : | Longueur de jour civil y compris le crépuscule (hc). |
| DECLIN : | Déclinaison du soleil (rad). |
| DELTA (en Pa. $^{\circ}\text{C}^{-1}$) | Inclinaison de la courbe de vapeur saturante de pression. |
| DEPCUM : | Profondeur cumulative du sol (mm). |
| DEPMAX | Profondeur du profil du sol considéré (mm). |
| DEPWET : | Profondeur du profil mouillé c'est-à-dire la partie du sol |

ANNEXE II: LEXIQUE DES NOMS DE VARIABLES UTILISEES

| | |
|--------------------|---|
| | contenant de l'eau facilement utilisable (mm). |
| DI4(NY) : | Différence entre la date julienne de l'anthere et la date julienne 105 (j). |
| DI6(NY) : | Différence entre la date julienne de maturité et la date julienne 140 (j). |
| DI9(NY) : | Différence entre la date de germination et 10 Novembre (NDS=41) (j). |
| DLAYR(L) : | Profondeur d'une couche L du sol (mm). |
| DODPG : | Delta sur delta plus gamma ; facteurs favorables aux calculs de EO. |
| DP1 : | Durée de la phase 1 de l'émergence au terme d'épillet en (°C.j). |
| DP1A : | Durée entre l'émergence à la fin de la formation d'épillet en degrés jours (°C.j). |
| DP1B : | Durée entre la levée et la double crête (°C.j). |
| DP1T : | Durée entre la levée et la fin de la double crête (°C.j). |
| DP4 : | Durée entre l'anthere et le début de comblement des grains (°C.j). |
| DP5 : | Durée entre le début de comblement des grains et la maturité (°C.j). |
| DPGFI : | Durée entre la germination et l'initiation florale utilisée pour calculer LFNOFL (°C.J) |
| DRAIN : | Taux de drainage (mm.J ⁻¹). |
| DRNF : | Facteur de drainage (mm.mm ⁻¹). |
| DTT : | Degrés jours dérivé de la température journalière et du zéro de végétation (°C.j). |
| DTTCUM | Degrés jours pour la saison (°C.J). |
| DTTSUM | Degrés jours pour la phase (°C.J). |
| DWET(NY) : (en mm) | Profondeur humide pour une certaine semaine de l'année NY |
| DWETT (NY, NW) : | Profondeur humide hebdomadaire NW de l'année NY (mm). |
| DWTANT : | Poids sec à l'anthere (g.m ⁻²). |
| ESX : | Valeur intermédiaire pour l'évaporation du sol (ES) (mm.J ⁻¹). |
| ET | Evapotranspiration réelle (mm.j ⁻¹). |
| EXTINC : | Coefficient d'extinction de la lumière dans voûte de feuillage. |
| FAW(L) : | Fraction de l'eau disponible dans une couche L pour le potentiel de la plante. |
| FAWCUM : | Quantité d'eau disponible dans les zones de racines (mm) |
| FAWTOT : | Pourcentage d'eau disponible dans tout le profil pour le potentiel de la plante(%). |
| FO | Fraction du jour où le ciel est nuageux. |
| FRAC : | Fraction de RADMAX qui atteint la surface terrestre en ciel clair. |
| FRAEAR : | Poids de l'épi en pourcentage du poids sec au-dessous de la terre (%). |
| FRAGRN : | Fraction du poids de grain, du poids de l'épi. |
| FRALF : | Poids des feuilles en pourcentage du poids sec au –dessous de la |

ANNEXE II: LEXIQUE DES NOMS DE VARIABLES UTILISEES

| | |
|------------------------------------|--|
| | terre. (%) |
| FRART : | Poids de la tige en pourcentage du poids sec total (%) |
| FRASTM : | Poids de la tige en pourcentage du poids sec au-dessous de la terre (%). |
| FROST : | Facteur de gelée calculé pour les températures inférieures à 0 °C et utilisé pour estimer les effets de gelée sur le développement de la plante (°C). |
| FROSTD : | Cumul des jours ayant les températures inférieures à -4°C, et utilisées dans le calcul des surfaces des feuilles (J) |
| FROSTE : | FROST pour la phase probable des gelées précoces, entre la double crête et les phases de feuillaison (J). |
| GAI : | Indice de surface verte ou indice de biomasse (cm ² .cm ⁻²). |
| GAMMA : | Constante psychrométrique (Pa. °C ⁻¹) |
| GGF : | Facteur de croissance de grain, introduit comme paramètre génétique déterminant le taux potentiel de croissance de grain (mg. °C ⁻¹ .J ⁻¹). |
| GPC : | Contenu du grain en protéine (%). |
| GPL(NY) : | Longueur de la période de croissance dans l'année NY ; période entre la germination et la maturité (J). |
| GRNY(NY) : (en g.m ⁻³) | Rendement grains de l'année NY, 0% de l'humidité. |
| GROEAR: | Augmentation journalière du poids de l'épi (g.plante ⁻¹). |
| GROGRN : | Augmentation journalière du poids grains (g.plante ⁻¹). |
| GROLF : | Augmentation journalière du poids de la feuille (g.plante ⁻¹). |
| GROPLA : | Augmentation journalière du poids sec total (g.plante ⁻¹). |
| GROPLT : | Augmentation journalière du poids sec au-dessus de la terre (g.plante ⁻¹). |
| GRORT : | Augmentation journalière du poids de racine (g.plante ⁻¹). |
| GROSTH : | Augmentation journalière du poids de la tige (g.plante ⁻¹). |
| HAS : | Angle horaire du soleil (rad). |
| HEMIS : | 0 correspond à l'hémisphère nord et 1 au sud. |
| HI : | Indice de récolte. |
| HOLD : | Quantité d'eau qui peut être stockée dans une couche de sol par rapport à un certain niveau inférieur. |
| HTVAP : | Chaleur latente de vaporisation de l'eau (mj.m ⁻² .mm ⁻¹). |
| IBEGIN : | Date julienne du début de la simulation. |
| IDAY1A : | Date julienne du début de la floraison. |
| IDAY1B : | Date julienne de la double crête. |
| IDAY2 : | Date julienne du stade final de floraison. |
| IDAY3 : | Date julienne du stade de feuillaison |
| IDAY5 : | Date julienne du début de comblement des grains. |
| IDAY6 : | Date julienne de maturité. |
| IDAY9 : | Date julienne de levée. |
| IDRSW : | Interrupteur de drainage indiquant si oui ou non le drainage arrive |

ANNEXE II: LEXIQUE DES NOMS DE VARIABLES UTILISEES

| | |
|---------------------------------|--|
| | dans le profil. |
| IEND : | Interrupteur utilisé pour terminer la simulation en une année. |
| IENDS : | Interrupteur utilisé pour terminer une simulation de plusieurs années successives. |
| IPHASE : | Code de la phase de développement. |
| ISOW : | Date julienne de semis. |
| IT : | Nombre de talles de la tige principale IT=1. |
| IYEAR : | Deux derniers chiffres de l'année de début simulation |
| IYR : | Deux derniers chiffres de l'année en cours |
| JDATE : | Date julienne. |
| JDATEX : | Interrupteur utilisé pour établir les jours /mois et imprimer la date du début. |
| JDAY(J) : | Date julienne de la j ^{ième} irrigation. |
| KIRRI : | Nombre assigné au plan d'irrigation. |
| KPEAR : | Nombre de noyaux par épi (réel). |
| KPNG : | Interrupteur utilisé pour déterminer la table de «détermination de croissance de rendement». |
| KPNW : | Interrupteur utilisé pour établir la table de «détermination du bilan hydrique». |
| KPOG : | Fréquence des jours pour imprimer la croissance du rendement (j). |
| KPOW : (en jours) | Fréquence des jours pour imprimer le rendement de l'eau. |
| KPPLT : | Nombre réel des grains par plante. |
| KPSM : | Nombre réel de grains par mètre carré. |
| KSOIL : | Numéro assigné au sol pour être utilisé dans le fichier SOILS. |
| KTRIAL : | Numéro assigné à l'essai. |
| KVARTY : | Numéro assigné au cultivar (variété). |
| LAT : | Latitude (degré). Les minutes sont transformées en degrés. |
| LFNO(IT) : | Nombre de feuilles des talles IT présentement développé. |
| LFNOL : | Nombre réel de feuilles visibles sur la tige principale. |
| LFNOFL : | Nombre réel des feuilles de la plante. |
| LG : | Nombre de feuilles vertes de la tige principale. |
| MULTYR : | Interrupteur utilisé pour simuler soit une année (=0) soit plus d'une année (=1). |
| ND : | Le jour du mois. |
| NDS : | Nombre de jours depuis IBEGN. |
| NEWVAR : | Interrupteur utilisé successivement dans la même année à l'aide de la variable KTRIAL=0 (essai=0). |
| NIRR : | Nombre d'irrigations. |
| NIRRI : | Nombre assigné au plan d'irrigation dans le fichier irrigation. |
| NITDM : (en g.m ⁻³) | L'azote contenu dans la matière sèche au –dessous du sol. |
| NITGR : | Azote contenu dans le grain (réel) (g.m ⁻²) |

ANNEXE II: LEXIQUE DES NOMS DE VARIABLES UTILISEES

| | |
|--------------------------------------|---|
| NITHI : | Azote de l'indice de récolte (réel). |
| NLAYR : | Nombre de couche dans le profil du sol. |
| NSOIL : | Nombre assigné au sol dans le fichier sol. |
| NTIL : | Nombre de pousses d'une plante. |
| NTRIAL : | Nombre assigné aux essais dans les fichiers paramètres. |
| NVARTY : | Nombre assigné aux cultivars dans le fichier génétique. |
| NW : | Nombre de semaines depuis IBEGIN. |
| NY : | Nombre d'années de simulation. |
| PAR : (en $Mj.m^2.j^{-1}$) | Rayonnement photosynthétiquement actif absorbé. |
| PAWRT : | Pourcentage du potentiel d'eau disponible dans la zone de racine. |
| PAWRZ(NY) : | Pourcentage du potentiel de l'eau dans la zone de racines en une semaine quelconque de l'année NY (%) |
| PEFRAC : | Fraction de la production journalière de matière sèche par épi. |
| PHF : | Facteur phyllochron, un paramètre génétique d'entrée régulateur du taux d'apparences des feuilles. |
| PHFRA : | Fraction phyllochron, la fraction totale de PHINT apparue dans une journée. |
| PHINT : (en $^{\circ}C.J$) | Intervalle de phyllochron; intervalle entre le temps thermique et les apparitions successives des feuilles. |
| PLANTS : | Nombre de plantes établi après la levée ($plantes.m^{-2}$). |
| PPC : | Photopériode critique, pas de développement des plantes à des longueurs de jour plus courtes que PPC (heures). |
| PPF : | Facteur photopériodique calculé à partir de PPC et PPS. |
| PPS : | Sensibilité photopériodique : le taux de changement de développement des plantes affecté par le changement de longueur de jour ($h. ^{\circ}C^{-1}$). |
| PTAN : | Période réelles restante avant que la période des anthères ne soit atteinte ($^{\circ}C.J$). |
| PTFL : | Période réelle restante avant que la phase de levée ne soit atteinte (IRRIS) ($^{\circ}C.J$). |
| PTFRAC : | Fraction totale de matière sèche divisée par les parties des «antennes» de la plante. |
| PTT : | Temps photo thermique : degrés jours DTT corrigé pour une longueur du jour avec PPF ($^{\circ}C.J$). |
| RADCLR : (en $Mj.m^{-3}.j^{-1}$) | Rayonnement atteignant la surface de la terre en ciel clair. |
| RADIVC : | Vecteur radian de la terre. |
| RADLW : (en $mm.j^{-1}$) | Rayonnement sortant des grandes longueurs d'onde. |
| RADMAX : | Rayonnement extra-terrestre entrant ($MJ. M^{-2}.j^{-1}$). |
| RADNET : | Rayonnement net ($mm.j^{-1}$). |
| RADSOL : | Rayonnement solaire mesuré ($MJ. M^{-2}.J^{-1}$). |
| RAIN : | Pluie journalière (mm). |
| RDV : | Facteur de développement relatif des racines. |

ANNEXE II: LEXIQUE DES NOMS DE VARIABLES UTILISEES

| | |
|--|---|
| RRAF(L) : | Facteur des activités relatives de la racine dans une couche L. |
| RRDF(L) : | Facteur de distribution relative de la racine dans la couche L. |
| RRLF(L) : | Facteur de longueur relative des racines dans la couche L du sol (mm). |
| RRSUM : | RRLF cumulatif de toutes les couches dans la zone des acines (mm). |
| RTDEP : | Profondeur de la zone des racines (mm). |
| RTDP(NY) : | Profondeur de la zone des racines pour une semaine particulière de l'année NY. |
| RTDPT(NY , NW) | Profondeur de la zone de racine à la fin de semaine NW de m'année NY. |
| RTEXRF : | Facteur de réduction d'extension des racines dans une couche de sol sec, soit 0 (pas d'extension). Soit 1. |
| RTEXT : | Taux de l'extension des racines (mm. °C ⁻¹ . J ¹). |
| RUNOFF : | Ruissellement journalier (mm). |
| SALB : | Albédo de la terre nue. |
| SDEPH : | Profondeur de semis (mm). |
| SENCUM : | Surface cumulative de la sénescence des feuilles (cm ²). |
| SENLA : | Surface des sénescences feuilles en un jour donné (cm ²). |
| SENLA1 : | Le taux maximal journalier de sénescence qui s'est produit une date donnée (cm ²). |
| SHOOTM : | Nombre minimal de pousses qui porteront les épis dans les conditions normales (pousse. m ²). |
| SHOOTS : | Nombre réel de pousses par mètre carré (pousse. m ²). |
| SRI (JDATE) : | Intensité de rayonnement solaire en un jour JDATE(T) (J.m ⁻⁴ . °C.hr ¹). |
| SRICUM : | SRI (JDATE) cumulative sur 30 Jours (TJ.M ⁻⁴ . °C.h ⁻¹) |
| SRINT : (Mj.m ⁻⁴ .°C ⁻¹ .h ⁻¹) | Moyenne mobile sur 30 jours de SRI (JDATE) |
| SRQP(JDATE) : | Rapport du rayonnement solaire à la photopériode au jour JDATE (MJ.m ⁻² .h.r ⁻¹) |
| SRQPA : | Rayonnement solaire quotidien sur la photopériode au jour JDATE moyenné sur 30 jours du (MJ.m ⁻² .h.r ⁻¹). |
| SRQT : (Mj .m ⁻³ .°C ⁻¹) | Rayonnement solaire quotidien et température. |
| STEMP : | Facteur contrainte de température affectant la croissance de la feuille. |
| STORAC : | Capacité réelle de stockage dans le profil du sol pour infiltration de précipitation par rapport à l'eau d'irrigation (mm). |
| STORE : | Capacité maximum dans le profil du sol basé sur l'eau contenu dans le sol (mm). |
| STOREMX : | Capacité maximale dans le profil du sol basé sur le nombre de couche (mm). |
| SUMES1 : | Evaporation cumulative du sol au premier stade (mm). |
| SUMES2 : | Evaporation cumulative du sol au deuxième stade (mm). |

ANNEXE II: LEXIQUE DES NOMS DE VARIABLES UTILISEES

| | |
|-----------------|--|
| SW(L) : | Eau du sol contenu dans une couche N (fraction de volume). |
| SWAD : | <<Air sec>> de l'eau du sol contenu dans une couche L (fraction de volume). |
| SAWSZ : | Contenu en eau du sol dans la seconde zone après la plantation (fraction de volume). |
| SWCON (L) : | Poids du contenu en eau disponible dans la couche L du sol pour l'évaporation (fraction de volume). |
| SWDF1 : | Premier facteur de déficit hydrique utilisé pour calculer la réduction de la matière sèche. |
| SWDF2 : | Deuxième facteur de déficit hydrique influant sur le taux de la feuille, de la sénescence des talles et le nombre de grains. |
| SWDFC1 : | Moyenne de SWDF2 dans la subroutine croissance (GROWTH) depuis le stade de feuillaison. |
| SWDFC2 : | Moyenne de SWDF2 dans la subroutine voûte de feuillage (CANOPY) depuis le stade fin de l'épiaison. |
| SWDPL : | Epuisement d'eau dans le profil du sol : différence entre la limite supérieure et le contenu réel en eau du sol. |
| SWEXT(L) : | Eau potentielle extraite dans la couche L (fraction de volume). |
| SWLL(L) : | Extraction de l'eau du sol dans la couche L de la plante (fraction de volume). |
| SWSAT(L) : | Contenu de l'eau du sol saturé de la couche L (fraction de volume). |
| SWURF(L) : | Facteur de réduction de l'eau utile de la couche L du sol |
| SWWF : | Facteur de repli de l'eau du sol, utilisé pour calculer la redistribution de l'humidité au-dessus du profil après évaporation de la surface. |
| TAVG : | Température moyenne journalière (°C) |
| TAVGEM :(en °C) | Température moyenne entre la germination et la levée (°C). |
| TBASE : | Le zéro de végétation (°C). |
| TEMFSO : | Facteur de température du sol affectant DTT. |
| TEMPCO : | Facteur de température du sol affectant la production journalière de matière sèche. |
| TEMPMN : | Température minimale (°C). |
| TEMPMX : | Température maximale (°C). |
| TILNO : | Nombre de talles qui suivent la tige principale. |
| TILNOX : | Nombre maximal de talles visibles par tige principale. |
| TIME : TILNOX | Temps après que le second stade d'évaporation du sol soit atteint (J). |
| TMFAC(J) : | Calcul de 3 températures horaires de la température maximale et minimale à l'aide des 8 facteurs distincts. |
| TSW : | Eau totale du sol contenue dans le profil (mm). |
| TSWO : | Eau totale contenue dans le profil du sol sur un jour IBEGIN (mm). |

ANNEXE II: LEXIQUE DES NOMS DE VARIABLES UTILISEES

| | |
|-------------|---|
| TSWA : | Eau totale disponible dans le profil pour la transpiration des plantes (mm). |
| TSWAD : | Eau totale du sol contenue dans l'air sec du profil (mm). |
| TSWAES : | Eau totale disponible dans le profil pour l'évaporation du sol (mm). |
| TSWAL : | Eau totale disponible dans une couche quelconque du sol (mm). |
| TSWASZ : | Eau totale disponible dans la zone de semence (mm). |
| TSWDPL : | Epuisement de l'eau total du sol au niveau 300 mm du profil (mm) |
| TSWEXT : | Eau totale du sol extraite par les plantes au milieu du profil (mm). |
| TSWNL : | Eau totale du sol dans le profil quand le contenu de toutes les couches est SWLL (mm). |
| TSWUL : | Eau totale du sol dans le profil quand le contenu de toutes les couches est SWUL (mm). |
| U : (en mm) | Limite supérieure du premier stade d'évaporation du sol. |
| TSWSAT : | Quantité totale d'eau saturée de toutes les couches (mm). |
| VARTY : | Nom des variétés existant dans le fichier GENETS. |
| VD : | Efficacité de la vernalisation (J). |
| VNDCUM : | Jours de vernalisation. |
| VNF : | Facteurs de vernalisation. |
| VNS : | Sensibilité V la vernalisation, paramètre génétique d'entrée. |
| VPACT : | Pression de vapeur réelle(Pa). |
| VPDEF : | Déficit de pression de vapeur(Pa). |
| VPSAT : | Pression de vapeur saturante (Pa). |
| WNIF : | Infiltration réelle d'eau dans le sol ; WINFP corrigé pour d'éventuel ruissellement (mm). |
| WINF1 : | Infiltration d'eau d'une couche à une autre (mm). |
| WINFP : | Infiltration d'eau dans le sol. Elle est égale à la quantité de précipitation et / ou celle de l'irrigation d'eau (mm). |

ANNEXE III: EXEMPLES DE SORTIES DU MOBELE

TIARET, ALGERIA
 LATITUDE = 35.4 DEG NORTH
 VARIETY NUMBER 1
 SOWING RATE = 250. PLANTS PER SQ METER
 GENETIC SPECIFIC CONSTANTS VNS = 0.003 SOWING DEPTH = 40. (MM)
 SOIL FACTORS SALB=0.20 U = 2.0 SWMF= 6.0 DRNF= 0.50 DPLA = 135. DP3 = 630. PHF = 1.13 GGF = 0.127
 REGIME SEC -DATE DE SEMIS 01/10/90

| NO. | DEPTH-MM | SAT SW | UP LIM | LOW LIM | AIR DRY | EXTR SW | INIT SW | AVAIL SW |
|-----|----------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|--|
| 1 | 0 | 0.320 | 0.100 | 0.070 | 0.070 | 0.070 | 0.070 | -1.5 |
| 2 | 50 | 0.310 | 0.310 | 0.120 | 0.100 | 0.100 | 0.100 | -2.0 |
| 3 | 150 | 0.310 | 0.300 | 0.170 | 0.140 | 0.130 | 0.140 | -3.0 |
| 4 | 250 | 0.310 | 0.290 | 0.190 | 0.180 | 0.100 | 0.180 | -1.0 |
| 5 | 350 | 0.310 | 0.290 | 0.210 | 0.210 | 0.080 | 0.210 | 0.0 |
| 6 | 500 | 0.310 | 0.290 | 0.240 | 0.240 | 0.050 | 0.250 | 2.0 |
| 7 | 700 | 0.310 | 0.290 | 0.245 | 0.245 | 0.045 | 0.260 | 3.0 |
| 8 | 900 | 0.310 | 0.290 | 0.245 | 0.245 | 0.045 | 0.260 | 4.5 |
| 9 | 1200 | 0.310 | 0.290 | 0.240 | 0.240 | 0.050 | 0.260 | 6.0 |
| Σ | 1500.0 | 465.5 | 439.5 | 327.0 | 319.5 | 112.5 | 335.0 | 8.0(MM) IN PROFILE, 7.% OF TOTAL EXTR SW |

PHASIC DEVELOPMENT

| JUL | CUM | CES | CEP | CET | PAW | GAI | DRYMAT | PHASIC DEVELOPMENT |
|----------|-----|------|-----|-----|-----|-----|--------|--------------------|
| 1/ 9/90 | 244 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | START OF SEASON |
| 1/10/90 | 274 | 0 | 21 | 0 | 21 | 0 | 0 | SOWING |
| 7/11/90 | 311 | 0 | 37 | 0 | 37 | 88 | 0 | GERMINATION |
| 14/11/90 | 318 | 70 | 41 | 0 | 41 | 39 | 0 | EMERGENCE, PHINT = |
| 10/ 1/91 | 10 | 298 | 89 | 1 | 90 | 78 | 0 | FLORAL INITIATION |
| 9/ 2/91 | 40 | 365 | 113 | 5 | 118 | 88 | 0 | DOUBLE RIDGE |
| 17/ 3/91 | 76 | 531 | 156 | 20 | 176 | 105 | 0 | TERMINAL SPIKELET |
| 9/ 5/91 | 129 | 882 | 190 | 113 | 303 | 18 | 3 | FLAG LEAF |
| 22/ 5/91 | 142 | 990 | 193 | 133 | 326 | 18 | 2 | SPIKE EMERGENCE |
| 23/ 5/91 | 143 | 999 | 193 | 134 | 327 | 17 | 2 | ANTHESIS |
| 23/ 5/91 | 143 | 999 | 193 | 134 | 327 | 17 | 2 | BEGIN GRAIN FILL |
| 31/ 5/91 | 151 | 1102 | 201 | 143 | 344 | 14 | 0 | MID GRAIN FILL |
| 16/ 6/91 | 167 | 1261 | 212 | 149 | 361 | 14 | 0 | MATURITY |
| 19/ 6/91 | 170 | 1295 | 212 | 149 | 361 | 14 | 0 | |

LENGTH OF GROWING PERIOD = 224, DAYS

ABOVE GROUND DRYMATTER = 959. (G/M2), GRAIN YIELD = 255. (G/M2), HARVEST INDEX = 26.6(%)
 TOTAL DRYMATTER = 1072. (G/M2), ROOT WEIGHT = 114. (G/M2), ROOT FRACTION = 10.6(%)
 KERNEL WEIGHT = 24.3(MG), KERNELS/SPIKE = 39.3, KERNELS/PLANT = 41.9, KERNELS PER SOM = 10485.
 NITROGEN REQUIRED FOR ABOVE GROUND DM = 9.4(G/M2), FOR GRAIN = 5.7(G/M2), N HARVEST INDEX = 61.1(%)
 SPIKES PER SOM = 266., TILLER NUMBER/PLANT = 0.07, MAXIMUM TILLER NUMBER/PLANT = 0.91, LEAF NUMBER = 10.3
 LEAF 16., STEM 52., SPIKE 33., PERCENT OF TOTAL ABOVE GROUND DRYMATTER, GRAIN/SPIKE FRACTION = 0.81
 FROST FACTOR IN STEM ELONGATION PHASE 40.7 AND IN POLLINATION PHASE 0.0

| 3/ 7/91 | 184 | 0 | 213 | 149 | 362 | 14 | 0 | 0 | 959 | HARVEST |
|----------|--------|--------|--------|--------|------|------|---|--|----------------------------|---------------|
| 31/ 8/91 | 243 | 0 | 233 | 149 | 382 | 14 | 0 <td>0 <td>959 <td>END OF SEASON</td> </td></td> | 0 <td>959 <td>END OF SEASON</td> </td> | 959 <td>END OF SEASON</td> | END OF SEASON |
| START SW | 330.53 | 232.65 | 149.06 | 381.72 | 0.00 | 5.16 | 382.40 | 0.00 | 330.53 | IRRIG BALANCE |
| 335.00 | 330.53 | 232.65 | 149.06 | 381.72 | 0.00 | 5.16 | 382.40 | 0.00 | 330.53 | |

END OF WEATHER DATA

TIARET, ALGERIA LATTITUDE = 35.4 DEG NORTH REGIME SEC -DATE DE SEMIS 01/10/93

VARIETY NAME MEXIPAK
 SOWING RATE = 250. PLANTS PER SQ METER SOWING DEPTH = 40. (MM)
 GENETIC SPECIFIC CONSTANTS VNS = 0.003 PPS = 0.20 PPC = 5.00 DPLA = 135. DP3 = 630. PHF = 1.13 GGF = 0.127
 SOIL FACTORS SALB=0.20 U= 2.0 SWWF= 6.0 DRNF= 0.50 CN2= 60.0
 UP LIM LOW LIM AIR DRY EXTR SW INIT SW AVAIL SW
 1 0. - 50. 0.320 0.100 0.070 0.220 0.070 -1.5
 2 50. - 150. 0.310 0.120 0.100 0.190 0.100 -2.0
 3 150. - 250. 0.310 0.170 0.140 0.130 0.140 -3.0
 4 250. - 350. 0.310 0.190 0.180 0.100 0.180 -1.0
 5 350. - 500. 0.310 0.210 0.210 0.080 0.210 0.0
 6 500. - 700. 0.310 0.240 0.240 0.050 0.250 2.0
 7 700. - 900. 0.310 0.245 0.245 0.045 0.260 3.0
 8 900. - 1200. 0.310 0.290 0.245 0.045 0.260 4.5
 9 1200. - 1500. 0.310 0.290 0.240 0.050 0.260 6.0
 CUM 465.5 327.0 319.5 112.5 335.0 8.0(MM) IN PROFILE, 7.% OF TOTAL EXTR SW

VARIETY NAME MEXIPAK
 SOWING RATE = 250. PLANTS PER SQ METER SOWING DEPTH = 40. (MM)
 GENETIC SPECIFIC CONSTANTS VNS = 0.003 PPS = 0.20 PPC = 5.00 DPLA = 135. DP3 = 630. PHF = 1.13 GGF = 0.127
 SOIL FACTORS SALB=0.20 U= 2.0 SWWF= 6.0 DRNF= 0.50 CN2= 60.0
 UP LIM LOW LIM AIR DRY EXTR SW INIT SW AVAIL SW
 1 0. - 50. 0.320 0.100 0.070 0.220 0.070 -1.5
 2 50. - 150. 0.310 0.120 0.100 0.190 0.100 -2.0
 3 150. - 250. 0.310 0.170 0.140 0.130 0.140 -3.0
 4 250. - 350. 0.310 0.190 0.180 0.100 0.180 -1.0
 5 350. - 500. 0.310 0.210 0.210 0.080 0.210 0.0
 6 500. - 700. 0.310 0.240 0.240 0.050 0.250 2.0
 7 700. - 900. 0.310 0.245 0.245 0.045 0.260 3.0
 8 900. - 1200. 0.310 0.290 0.245 0.045 0.260 4.5
 9 1200. - 1500. 0.310 0.290 0.240 0.050 0.260 6.0
 CUM 465.5 327.0 319.5 112.5 335.0 8.0(MM) IN PROFILE, 7.% OF TOTAL EXTR SW

DATE DAY DTT CES CEP CET PAW GAI DRYMAT PHASIC DEVELOPMENT
 1/ 9/93 244 0. 0. 0. 0. 0. 0. SOWING
 1/16/93 274 0. 13. 0. 13. 0. 0. 0. GERMINATION
 2/10/93 275 0. 14. 0. 14. 0. 0. 0. EMERGENCE, PHINT = 76.8 DAYLENGTH=11.49/12.34, DAYL FACT= 1.19
 11/10/93 284 123. 16. 0. 16. 41. 0. 0. FLORAL INITIATION
 30/10/93 303 337. 42. 1. 42. 4. 0. 2. 6. DOUBLE RIDGE
 5/11/93 309 408. 46. 1. 47. 23. 0. 3. 7. TERMINAL SPIKELET
 7/12/93 341 595. 70. 5. 75. 16. 0. 4. 22. FLAG LEAF
 26/ 2/94 57 934. 123. 37. 160. 9. 0. 8. 174. SPIKE EMERGENCE
 16/ 3/94 75 1039. 129. 38. 167. 0. 0. 3. 181. ANTHESIS
 21/ 5/94 80 1075. HEADING
 29/ 5/94 88 1148. 133. 38. 171. 0. 0. 1. 182. BEGIN GRAIN FILL
 14/ 4/94 104 1252. 142. 38. 180. 0. 0. 0. 183. MID GRAIN FILL
 14/ 5/94 134 1413. 161. 38. 199. 0. 0. 0. 183. MATURITY
 20/ 5/94 140 1452. 164. 38. 202. 0. 0. 0. 183.

LENGTH OF GROWING PERIOD = 230. DAYS
 ABOVE GROUND DRYMATTER = 183. (G/M2), GRAIN YIELD = 36. (G/M2), HARVEST INDEX = 19.6(%)
 TOTAL DRYMATTER = 215. (G/M2), ROOT WEIGHT = 33. (G/M2), ROOT FRACTION = 15.2(%), ROOT DEPTH = 155. (MM), WETTING= 150. (MM)
 KERNEL WEIGHT = 25.3(MG), KERNELS/SPIKE = 5.7, KERNELS/PLANT = 5.7, KERNELS PER SQM = 1413.
 NITROGEN REQUIRED FOR ABOVE GROUND DM = 3.7(G/M2), FOR GRAIN = 1.9(G/M2), N HARVEST INDEX = 51.9(%), GRAIN PROTEIN = 33.2(%)
 SPIKES PER SQM = 250., TILLER NUMBER/PLANT = 0.00, MAXIMUM TILLER NUMBER/PLANT = 0.88, LEAF NUMBER = 10.5
 LEAF 18., STEM 61., SPIKE 20., PERCENT OF TOTAL ABOVE GROUND DRYMATTER, GRAIN/SPIKE FRACTION = 0.96
 FROST FACTOR IN STEM ELONGATION PHASE 89.1 AND IN POLLINATION PHASE 11.2

3/ 6/94 154 0. 165. 38. 203. 0. 0. 0. 183. HARVEST
 31/ 8/ 0 -1 0. 172. 38. 210. END OF SEASON
 START SW END SW ES ET RUNOFF DRAIN PRECIP IRRIG BALANCE
 335.00 329.18 171.59 37.94 209.52 0.00 0.00 203.70 0.00 329.18

END OF WEATHER DATA

| ANNEXE IV: LISTE DES ABREVIATIONS

| | |
|--------------|--|
| AFSSA | Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments |
| AHS | African Horse Sickness ou peste équine |
| BTV | Blue Tongue Virus, agent pathogène de la fièvre catarrhale du mouton. |
| CIRAD | Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement en régions chaudes |
| DGAI | Direction Générale de l'Alimentation |
| EIR | Entomological Inoculation Rate |
| ESB | Encéphalopathie Spongiforme Bovine |
| FAO | Food and Agriculture Organization of the United Nations |
| FCM | Fièvre catarrhale du Mouton |
| IAH | Institute of Animal Health |
| INRA | Institut National de Recherche Agronomique |
| OIE | Office International des Épizooties |
| OMS | Organisation Mondiale de la Santé |
| OVI | Onderstepoort Veterinary Institute (Afrique du Sud) |
| SIG | Système d'Information Géographique |
| SMA | Système Multi-Agents |

ANNEXE V: LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

| | |
|--|-----|
| Tableau 1. Incidence de la Fièvre Catarrhale du Mouton en juillet 2000..... | 49 |
| Tableau 2. Incidence de la Fièvre Catarrhale du Mouton en août 2000. | 49 |
| Tableau 3. Incidence de la Fièvre Catarrhale du Mouton en septembre 2000..... | 50 |
| Tableau 4. Incidence de la Fièvre Catarrhale du Mouton en juillet 2006..... | 50 |
| Tableau 5. Incidence de la Fièvre Catarrhale du Mouton en août 2006. | 51 |
| Tableau 6. Stations et données météorologiques disponibles pour l'année 2000..... | 53 |
| Tableau 7. Stations et données météorologiques disponibles pour l'année 2006..... | 53 |
| Tableau 8. Stations et données météorologiques disponibles pour l'année 2006..... | 67 |
| Tableau 9. Résumé des modèles utilisés dans l'étude de l'impact du changement climatique. | 78 |
| Tableau 10. Caractéristiques génétiques des variétés de blé tendre considérées..... | 96 |
| Tableau 11. Liste des variables issues de la simulation. | 97 |
| Tableau 12. Valeurs des variables résultant de la simulation pour la saison 1990-1991..... | 102 |
| Tableau 13. Valeurs des variables résultant de la simulation pour l'année 1991-1992..... | 103 |
| Tableau 14. Valeurs des variables résultant de la simulation pour la saison 1993 – 1994..... | 104 |
| Tableau 15. Pourcentage de variance expliquée par les axes principaux. | 106 |
| Tableau 16. Matrice de corrélation entre les variables considérées. | 106 |
| Tableau 17 . Pourcentage de variance expliquée par les axes principaux. | 107 |
| Tableau 18 . Matrice de corrélation. | 108 |
| Tableau 19 . Pourcentage de variance expliquée par les axes principaux. | 109 |
| Tableau 20. Valeurs calculée et critique de la statistique t de Student..... | 111 |
| Tableau 21. Corrélations entre les variables considérées et le rendement annuel. | 118 |
| Tableau 22. Données de pluie quotidienne pour l'année 1994-1995. | 123 |
| Tableau 23. Correspondance entre numéro de jour et date calendaire. | 124 |
| Tableau 24. Date de début des pluies (1994/2004). | 126 |
| Tableau 25. Dates de début des pluies correspondant aux dates de semis choisies..... | 127 |
| Tableau 26. Valeurs calculées du test T de Student. | 128 |
| Tableau 27. Dates de semis et dates de floraison correspondantes. | 130 |
| Tableau 28. Durées des séquences sèches maximales à partir de la floraison..... | 131 |
| Tableau 29. Evènements climatiques à partir du 1er septembre. | 135 |

ANNEXE V: LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure 1. Evolution des températures moyennes annuelles de l'Algérie (1901-2000)..... | 9 |
| Figure 2. Evolution des totaux annuels de précipitations de l'Algérie (1901-2000)..... | 10 |
| Figure 3. Bilan pluviométrique des régions Ouest, Centre et Est. | 12 |
| Figure 4. Influence de la concentration en CO ₂ sur la photosynthèse de plantes en C3 et en C4 | 24 |
| Figure 5. Situation de la fièvre catarrhale du mouton (sérotypes 2 et 9) dans le bassin méditerranéen en 1998 et 1999..... | 31 |
| Figure 6. Situation de la fièvre catarrhale du mouton (sérotypes 2, 4 et 9) dans le bassin Méditerranéen de 1998 à 2000. | 32 |
| Figure 7. Situation de fièvre catarrhale du mouton (sérotypes 2, 4, 9, 16) dans le bassin méditerranéen en 2001..... | 32 |
| Figure 8. Situation de la fièvre catarrhale du mouton dans le bassin Méditerranéen en 2006..... | 33 |
| Figure 9. Répartition mondiale de la fièvre catarrhale du mouton en 2004. | 34 |
| Figure 10. Cyanose de la langue..... | 35 |
| Figure 11. Virus de la fièvre catarrhale ovine..... | 37 |
| Figure 12. Schéma de maintien de l'infection en zone tempérée. | 38 |
| Figure 13. Morphologie d'un insecte femelle : Culicoïde Imicola. | 43 |
| Figure 14. Cycle de transmission du BTV entre une population de vecteurs et les espèces hôtes (sensibles et réservoirs) et facteurs d'influence (en bleu : facteurs liés à l'insecte, en vert : les facteurs liés à l'environnement). | 45 |
| Figure 15. Emergence de la Fièvre Catarrhale du Mouton en juillet 2000..... | 46 |
| Figure 16. Emergence de la Fièvre Catarrhale du Mouton en août et septembre 2000. | 47 |
| Figure 17. Emergence de la Fièvre Catarrhale du Mouton en juillet 2006..... | 47 |
| Figure 18 . Emergence de la Fièvre Catarrhale du Mouton en Août 2006..... | 48 |
| Figure 19. Evolution saisonnière de la FCM (Période 1999 – 2006)..... | 52 |
| Figure 20. Nombre de cas de FCM en région Est durant l'année 2000. | 54 |
| Figure 21. Températures moyenne(TTm), minimale(TTN), maximale(TTx) et incidence de la FCM à El-Kala durant l'année 2000..... | 55 |
| Figure 22. Températures moyenne(TTm), minimale(TTn), maximale(TTx) et incidence de la FCM à Guelma durant l'année 2000. | 55 |
| Figure 23. Températures moyenne(TTm), minimale(TTn), maximale(TTx) et incidence de la FCM à Souk Ahras durant l'année 2000. | 56 |
| Figure 24. Humidité moyenne mensuelle de l'air et incidence de la FCM à El-Kala durant l'année 2000. | 56 |
| Figure 25. Humidité moyenne mensuelle et incidence de la FCM à Guelma durant l'année 2000. | 57 |
| Figure 26. Humidité moyenne mensuelle et incidence de la FCM à Souk-Ahras durant l'année 2000..... | 57 |
| Figure 27. Cumul annuel des précipitations et incidence annuelle de la FCM à El-Kala (période 1997-2004)..... | 58 |
| Figure 28. Cumul annuel des précipitations et incidence de la FCM à Guelma (Période 1997- 2005). | 59 |
| Figure 29. Cumul annuel des précipitations et incidence de la FCM à Souk-Ahras (Période 1997-2005)..... | 59 |
| Figure 30. Bilan hydrique mensuel et incidence de la FCM à El-Kala durant l'année 2000..... | 60 |
| Figure 31. Bilan hydrique mensuel et incidence de la FCM à Guelma durant l'année 2000. | 61 |
| Figure 32. Bilan hydrique mensuel et incidence la FCM à Souk-Ahras durant l'année 2000..... | 61 |
| Figure 33. Durée d'insolation et incidence de la FCM à Guelma durant l'année 2000..... | 62 |
| Figure 34. Durée d'insolation et incidence de la FCM à Souk-Ahras durant l'année 2000. | 63 |
| Figure 35. Courbe ombrothermique El-Kala (1999-2000)..... | 64 |

ANNEXE V: LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

| | |
|---|-----|
| Figure 36. Courbe ombrothermique Guelma, (1999-2000). | 64 |
| Figure 37. Courbe ombrothermique Guelma, (1999-2000). | 64 |
| Figure 38. Direction probable de l'insecte vecteur à Annaba (juin, juillet et août 2000). | 65 |
| Figure 39. Direction probable de l'insecte vecteur à Guelma (juin, juillet et août 2000). | 65 |
| Figure 40. Direction probable de l'insecte vecteur à Tébessa (juin, juillet et août 2000). | 65 |
| Figure 41. Direction probable de l'insecte..... | 65 |
| Figure 42 . Nombre de cas de la FCM par wilaya durant l'année 2006..... | 66 |
| Figure 43 . Températures moyenne(TTm), minimale(TTn), maximale(TTx) et incidence de la FCM à El-Bayadh (année 2006). | 67 |
| Figure 44 . Températures moyenne(TTm), minimale(TTn), maximale(TTx) et incidence de la FCM à Bouira (année 2006). | 68 |
| Figure 45 . Températures moyenne(TTm), minimale(TTn), maximale(TTx) et incidence de la FCM à Tizi-Ouzou (année 2006)..... | 68 |
| Figure 46 . Humidité moyenne mensuelle et incidence de la FCM à El-Bayadh (année 2006). | 69 |
| Figure 47 . Humidité moyenne mensuelle et incidence de la FCM à Bouira (année 2006). | 69 |
| Figure 48 . Humidité moyenne mensuelle et incidence la FCM à Tizi-Ouzou (année 2006)..... | 70 |
| Figure 49 . Courbe ombrothermique (El-Bayadh, année 2006). | 70 |
| Figure 50 . Courbe ombrothermique (Bouira ,année 2006). | 71 |
| Figure 51 . Courbe ombrothermique (Tizi-Ouzou, année 2006)..... | 71 |
| Figure 52 . Direction probable de l'insecte vecteur, El-Bayadh (juin, juillet et août 2006). | 72 |
| Figure 53 . Direction probable de l'insecte vecteur, Djelfa (juin, juillet et août 2006). | 72 |
| Figure 54 . Direction probable de l'insecte vecteur, Tizi-Ouzou (juin, juillet et août 2006)..... | 73 |
| Figure 55 . Direction probable de l'insecte vecteur, Saida (juin, juillet et août 2006). | 73 |
| Figure 56 . Direction probable de l'insecte vecteur, Tiaret (juin, juillet et août2006). | 73 |
| Figure 57. Corrélation entre le nombre de feuilles et le cumul de température de la germination à l'initiation florale (en °C.Jours). | 100 |
| Figure 58. Valeurs propres sur les axes principaux. | 105 |
| Figure 59 . Valeurs propres sur les axes principaux. | 107 |
| Figure 60 . Valeurs propres sur les axes principaux. | 108 |
| Figure 61. Evolution du nombre de feuilles à partir de la levée pour l'année 90-91..... | 112 |
| Figure 62. Evolution du nombre de feuilles à partir de la levée pour l'année 93-94..... | 112 |
| Figure 63. Evolution de l'indice de surface verte en fonction de temps. (année1993-1994)..... | 113 |
| Figure 64. Evolution de l'indice de surface verte en fonction de temps. | 114 |
| Figure 65. Evolution du poids de l'épi à partir de l'anthère pour l'année 1990-1991..... | 115 |
| Figure 66. Evolution du poids de l'épi à partir de l'anthère pour l'année 1993-1994..... | 115 |
| Figure 67. Evolution du poids total des feuilles, de la tige et de la plante durant la saison agricole 1990-1991. (Mexipak)..... | 116 |
| Figure 68. Evolution du poids total des feuilles, de la tige et de la plante durant la saison agricole 1993-1994. (Mexipak)..... | 117 |
| Figure 69. Histogramme des durées des saisons pluvieuses. | 122 |
| Figure 70. Variation de la pluie quotidienne de l'année agricole 1994-1995..... | 124 |
| Figure 71. Durées des séquences sèches à partir de la floraison (Date de semis : 1er octobre). | 132 |
| Figure 72. Durées des séquences sèches à partir de la floraison (Date de semis : 30 octobre)..... | 132 |
| Figure 73. Durées des séquences sèches à partir de la floraison (Date de semis : 15 novembre)..... | 133 |
| Figure 74. Durées des séquences sèches à partir de la floraison (Date de semis : 30 novembre)..... | 133 |

ANNEXE V: LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

| | |
|---|-----|
| Figure 75. Durées des séquences sèches à partir de la floraison (Date de semis : 15 Décembre). | 134 |
| Figure 76. Probabilité d'occurrence d'événements climatiques. | 136 |
| Figure 77. Ajustement de p_{rd} par le modèle markovien d'ordre 1..... | 137 |
| Figure 78. Ajustement de p_{rr} par le modèle de Markov. | 137 |
| Figure 79. Courbes résultantes f_{rr} et f_{rd} ajustées par le Modèle de Markov d'ordre 1. | 138 |
| Figure 80. Probabilités d'occurrence de séquences sèches de 7, 9 et 11 jours à compter du 4 janvier (date de semis : 1 octobre)..... | 139 |
| Figure 81. Probabilités d'occurrence de séquences sèches de 7, 9 et 11 jours à compter du 21 février (date de semis : 30 octobre)..... | 139 |
| Figure 82. Probabilités d'occurrence de séquences sèches de 7, 9 et 11 jours à compter du 13 mars (date de semis : 15 novembre)..... | 140 |
| Figure 83. Probabilités d'occurrence de séquences sèches de 7, 9 et 11 jours à compter du 27 février (date de semis : 30 novembre)..... | 140 |
| Figure 84. Probabilités d'occurrence de séquences sèches de 7, 9 et 11 jours à compter du 8 avril (date de semis : 15 décembre). | 141 |

B. Abderrahmani et al. - Analyse Et Modelisation Des Extremes De Temperature Au Niveau De Quelques



Geographia Technica, Numero Special 2009, p. 5-10

ANALYSE ET MODELISATION DES EXTREMES DE TEMPERATURE AU NIVEAU DE QUELQUES STATIONS TYPES DU NORD OUEST ALGERIEN

B. Abderrahmani, M. Haouari, A. Dobbi, M. Hadjel, N. Hassini

Abstract: Analysis and modelling of the extremes of the temperature at level of some station portrayed by the Algerian North West. The permanent character of the temperature confers it a determining role in bioclimatology. Its minimal and maximal values present a particular interest, due to the fact that they are often connected to a severe meteorological situation, which could generate often harmful and exceptional phenomena such as heat or cold waves. So, the scorching of the summer 2003 in France ended by an important number of deaths among the vulnerable persons such as the patients or the old persons. In December 2004, a cold spell, accompanied with severe frosts caused important damages in vegetable farmings in the Ain Defla region (Algeria). Hence, the interest to carry out in this article the analysis of the extreme temperatures in Algeria. This allows to appreciate the risk of occurrence of such extreme events and to limit the often severe impacts on sensitive sectors such as the agriculture, the water resources or the health.

Keywords: extreme temperatures, scorching, cold spell, agriculture

Résumé: Le caractère permanent de la température lui confère un rôle déterminant en bioclimatologie. Ses valeurs minimale et maximale revêtent un intérêt particulier du fait qu'elles soient quelques fois liées à une situation météorologique "à risque", pouvant générer des phénomènes exceptionnels souvent dommageables tels les vagues de chaleur ou de froid. Ainsi, la canicule de l'été 2003 en France s'est soldée par un nombre important de décès parmi les personnes vulnérables tels que les malades ou les personnes âgées. En décembre 2004, une vague de froid, accompagnée de fortes gelées a causé d'importants dommages aux cultures maraîchères dans la région de Ain Defla (Algérie). D'où l'intérêt porté dans cet article à l'analyse des extrêmes de température en Algérie. Ceci permet d'apprécier le risque d'occurrence de tels événements extrêmes et par suite d'en limiter les impacts souvent sévères sur des secteurs sensibles tels que l'agriculture, les ressources en eau ou la santé.

Mots clés : températures extrêmes, canicule, vague de froid, agriculture

[\[Back \]](#)

ANALYSE ET MODELISATION DES EXTREMES DE TEMPERATURE AU NIVEAU DE QUELQUES STATIONS TYPES DU NORD OUEST ALGERIEN

B. ABDERRAHMANI¹; M. HAOUARI²; A. DOBBI³; M. HADJEL⁴ et N. HASSINI⁵

¹Département de climatologie et traitement des données, I.H.F.R, Oran

²Office National de la météorologie

³Département de mécanique, Université de Ouargla

⁴Département de chimie, Faculté des Sciences, USTO Med Boudiaf Oran

⁵Département de biologie, Faculté des Sciences, Université d'Es-Sénia, BP 1524 Oran

Email : belaid1822@yahoo.fr, dobbi100@yahoo.fr, hadjel100@yahoo.fr, hassininour@yahoo.com

Résumé : Le caractère permanent de la température lui confère un rôle déterminant en bioclimatologie. Ses valeurs minimale et maximale revêtent un intérêt particulier du fait qu'elles soient quelques fois liées à une situation météorologique "à risque", pouvant générer des phénomènes exceptionnels souvent dommageables tels les vagues de chaleur ou de froid. Ainsi, la canicule de l'été 2003 en France s'est soldée par un nombre important de décès parmi les personnes vulnérables telles que les malades ou les personnes âgées. En décembre 2004, une vague de froid, accompagnée de fortes gelées a causé d'importants dommages aux cultures maraîchères dans la région de Ain Defla (Algérie). D'où l'intérêt porté dans cet article à l'analyse des extrêmes de température en Algérie. Ceci permet d'apprécier le risque d'occurrence de tels événements extrêmes et par suite d'en limiter les impacts souvent sévères sur des secteurs sensibles tels que l'agriculture, les ressources en eau ou la santé.

Mots clés : températures extrêmes, canicule, vague de froid, agriculture

Abstract: Analysis and modeling extremes of the temperature at level of dome station portrayed by the Algerian North West. The permanent character of the temperature confers it a determining role in bioclimatology. Its minimal and maximal values present a particular interest, due to the fact that they are often connected to a severe meteorological situation, which could generate often harmful and exceptional phenomena such as heat or cold waves. So, the scorching of the summer 2003 in France ended by an important number of deaths among the vulnerable persons such as the patients or the old persons. In December 2004, a cold spell, accompanied with severe frosts caused important damages in vegetable farmings in the Ain Defla region (Algeria). Hence, the interest to carry out in this article the analysis of the extreme temperatures in Algeria. This allows to appreciate the risk of occurrence of such extreme events and to limit the often severe impacts on sensitive sectors such as the agriculture, the water resources or the health.

Keywords: extreme temperatures, scorching, cold spell, agriculture

Introduction

L'occurrence des valeurs extrêmes de température nécessite le concours de situations météorologiques particulières pouvant s'accompagner d'événements exceptionnels tels les vagues de froid ou de chaleur. Celles-ci peuvent, de par leur intensité ou leur durée, générer un inconfort plus ou moins intense, à l'origine de dommages ou de graves incidents.

A défaut de parer à de tels événements et en absence d'un modèle de prévision adapté, nous tenterons d'en estimer les probabilités de leur première occurrence et de non dépassement de seuil. Une telle démarche s'inscrit en droite ligne de l'objectif principal visé par la prochaine conférence internationale sur le climat, consistant à « engager une action planétaire propre à réduire les risques climatiques qui menacent le bien-être des populations et compromettent l'instauration d'un développement socio-économique durable dans les pays en développement ».

Le concept d'atténuation des risques retenu dans notre étude consiste à défaire l'événement de son caractère soudain dès lors qu'il est possible d'envisager son occurrence et qu'une série de mesures appropriées puissent être prises en conséquence pour en limiter les effets.

L'analyse porte sur une zone caractérisée par un climat semi-aride. Certains facteurs topo climatiques ou anthropogéniques la prédisposent à de tels phénomènes ou favorisent leur occurrence.

1. Données et méthodes

La zone d'étude correspond au nord ouest algérien et englobe les localités d'Oran, Tiaret et Sidi -Bel- Abbès où sont implantées les stations d'observations météorologiques. Cette zone est limitée au Nord par la méditerranée, au Sud par la wilaya de Béchar, à l'Est par le centre du pays et à l'Ouest par le Maroc (Figure 1). L'analyse portera sur les températures minimales et maximales recueillies aux stations indiquées sur une période commune de 10 années consécutives, de 1997 à 2006. Elle consiste à évaluer les probabilités d'occurrence de phénomènes à risque, en rapport avec la température, tels que la gelée, les vagues de chaleur et de froid. L'analyse est conduite au moyen du logiciel Instat+, principalement conçu pour le traitement de données climatiques.

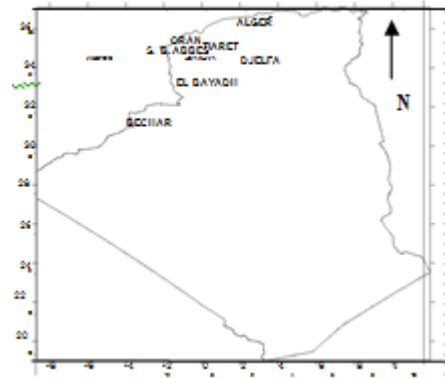


Figure 1. Carte de localisation des stations

Des macros y sont intégrées, chaque fois que nécessaire, pour compléter l'analyse. Un contrôle préliminaire de qualité a été également effectué à l'aide du même logiciel.

2. Résultats

Une analyse préliminaire des extrêmes de températures quotidiennes permet de repérer dans le temps les minima et maxima absolus pouvant être à l'origine d'événement climatiques particuliers tels que les vagues de chaleur ou de froid. (tableau 1)

Tableau 1 : Extrêmes absolus de température et leurs dates d'occurrence

| Oran | | | | Tiaret | | | | Sidi-Bel-Abbès | | | |
|------|--------------|------|----------------|--------|--------------|-------|---------------|----------------|--------------|-------|---------------|
| Tmin | Date | Tmax | Date | T min | Date | T max | Date | T min | Date | T max | Date |
| -1.9 | 9janv. 1997 | 39.9 | 07août. 1997 | -5 | 15janv. 1997 | 40.5 | 04 juil. 1997 | -2.4 | 07déc. 1997 | 42.8 | 23 juil. 1997 |
| -1.1 | 24déc. 1998 | 42.6 | 05 juil. 1998. | -5.5 | 22déc. 1998 | 40.5 | 05 juil. 1998 | -2 | 16déc. 1998 | 42 | 17 juil. 1998 |
| -1.3 | 15janv. 1999 | 38.3 | 16août. 1999 | -5.5 | 03fév. 1999 | 41.1 | 17août. 1999 | -1.7 | 03fév. 1999 | 44 | 23août. 1999 |
| 0.5 | 23fév. 2000 | 36.7 | 11 août. 2000 | -5.6 | 22janv. 2000 | 41.6 | 02 juil. 2000 | -2.6 | 02janv. 2000 | 43.1 | 20août. 2000 |
| 2.4 | 24déc. 2001 | 39.5 | 29août. 2001 | -3.9 | 09déc. 2001 | 41.4 | 31 juil. 2001 | -0.2 | 13fév. 2001 | 44.9 | 30 juil. 2001 |
| 0.6 | 21déc. 2002 | 39.6 | 30août. 2002 | -4.6 | 01fév. 2002 | 40.6 | 20 juil. 2002 | -2.5 | 02fév. 2002 | 42.4 | 25 juin. 2002 |
| 5 | 01fév. 2003 | 41.4 | 24août. 2003 | -7.1 | 01fév. 2003 | 41.5 | 21 juil. 2003 | -2.9 | 23déc. 2003 | 43.4 | 19 juil. 2003 |
| -0.5 | 01janv. 2004 | 40.4 | 19août. 2004 | -7.6 | 28déc. 2004 | 40.6 | 27 juin. 2004 | -4.8 | 28déc. 2004 | 43.3 | 23août. 2004 |
| -0.2 | 28déc. 2005 | 39.8 | 23août. 2005 | -11.4 | 27janv. 2005 | 41.4 | 16 juil. 2005 | -9.3 | 27janv. 2005 | 43.3 | 07août. 2005 |
| -0.1 | 13janv. 2006 | 39.2 | 25juin. 2006 | -5.6 | 15janv. 2006 | 39.7 | 22 juin. 2006 | -2.8 | 14janv. 2006 | 41.5 | 18 juil. 2006 |

Ainsi, les mois de décembre, janvier et février sont favorables à l'occurrence de gel en régions intérieures (Tiaret et Sidi-Bel-Abbès) ; tandis que la période juillet-août enregistre les grandes chaleurs de l'été où les températures maximales moyennes dépassent souvent 40 °C (figure 2). En zone côtière, les températures minimales absolues sont plus clémentes, un minimum absolu de l'ordre de -2°C est observé en janvier. Les moyennes mensuelles des températures minimale et maximale, calculées sur la période précitée présentent une distribution normale. Les bâtonnets indiquent, pour chaque mois de l'année, l'étendue de variation du paramètre considéré. La forte concentration des températures maximales autour d'une moyenne de 35°C en juillet laisse entrevoir de fortes probabilités d'avènement de vagues de chaleur durant ce mois.

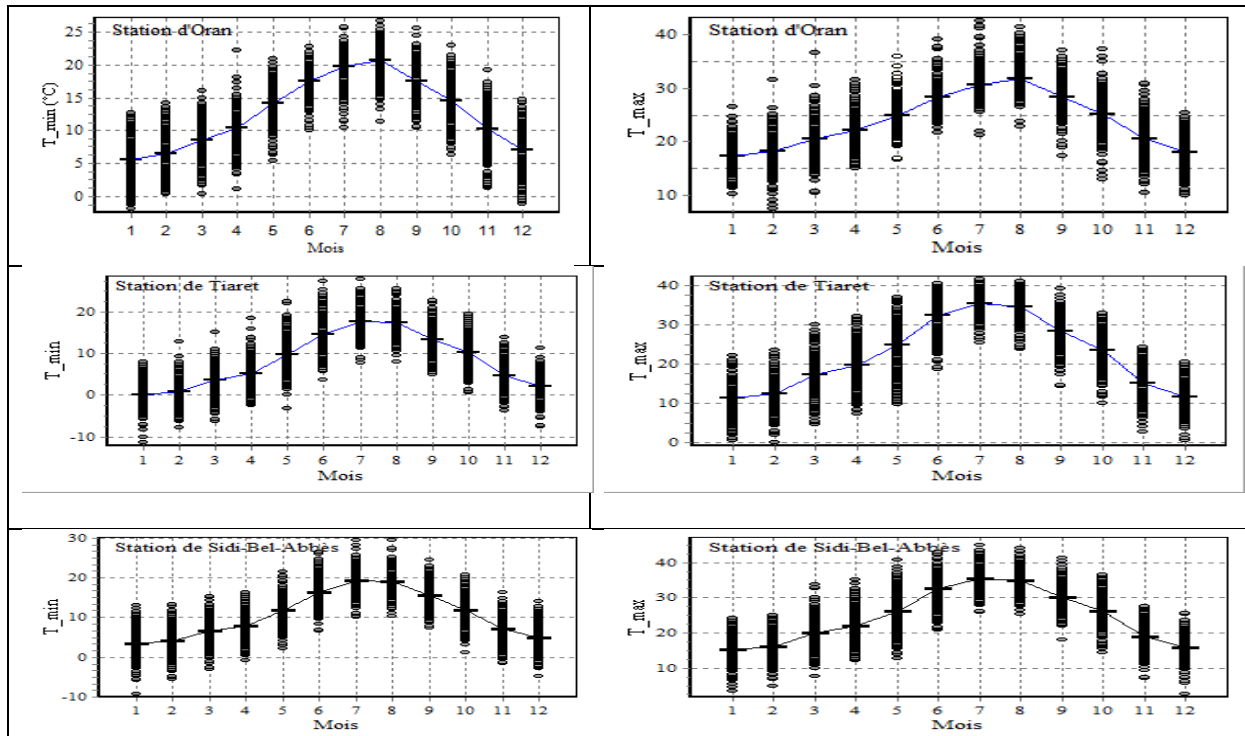


Figure 2 : Distribution des températures moyennes minimales et maximales au niveau des Stations d'Oran, de Tiaret et de Sidi Bel-Abbès. (Moyenne 1997-2006)

2.1. Occurrence de gel

Cet aléa climatique qui survient habituellement en automne et au printemps, correspond à une température minimale de l'air inférieure ou égale à zéro °C, prélevée sous abri météorologique conventionnel. Il peut causer d'importants dégâts aux cultures. En général, les premières gelées d'automne et les dernières gelées de printemps constituent des contraintes climatiques qui délimitent la période favorable à leur développement. Il est capital pour les agriculteurs de disposer de telles informations pour l'entame des campagnes agricoles et le choix de cultures à cycle adapté. Dans un premier temps, il importe d'apprécier l'importance d'un tel phénomène dans chacune des zones considérées. Le décompte annuel des jours de gelée du tableau 2 ci-dessous montre la prépondérance de ce phénomène en zones intérieures.

Tableau 2 : Nombre annuel de jours de gelée aux trois stations considérées

| Année | Oran | Tiaret | Sidi-Bel-Abbès |
|-------|------|--------|----------------|
| 1997 | 8 | 61 | 8 |
| 1998 | 2 | 56 | 21 |
| 1999 | 4 | 43 | 9 |
| 2000 | 0 | 38 | 26 |
| 2001 | 0 | 21 | 1 |
| 2002 | 0 | 44 | 16 |
| 2003 | 0 | 76 | 8 |
| 2004 | 4 | 36 | 10 |
| 2005 | 1 | 50 | 41 |
| 2006 | 2 | 43 | 12 |

2.2. Vagues de chaleur

Ce sont les extrêmes météorologiques qui affectent le plus le bien être et la santé. Ainsi le stress thermique résultant d'une hausse de température peut provoquer l'épuisement, voire une dégradation

de l'état de santé, aboutissant à la mort. Ces périodes à forte élévation de température constituent les vagues de chaleur. Elles se définissent comme des épisodes renfermant le plus grand nombre de jours consécutifs où la température maximale atteint ou dépasse 35°C. (André J.C et al.2004). Cette définition intègre de la sorte la persistance du phénomène dont l'effet accroît celui de la chaleur dans la sensation d'inconfort. Cependant, d'autres seuils de température peuvent être adoptés, compte tenu de la perception relative de la chaleur selon l'espace et le temps. Il est toutefois admis que dans la plupart des pays, l'être humain peut s'accommoder d'une gamme de températures allant de 17°C à 31°C. (OMM N°892, 1999). Au-delà de ce seuil, c'est la durée d'action de la température qui détermine la dangerosité du phénomène. C'est pourquoi nous avons estimé les durées maximales continues des vagues de chaleur (figure 3). On note une variabilité qui va de pair avec le degré de continentalité des localités considérées. Le littoral oranais semble, quant à lui, s'être prémuni d'une telle calamité ; malgré la canicule particulièrement remarquable de l'été 2003.

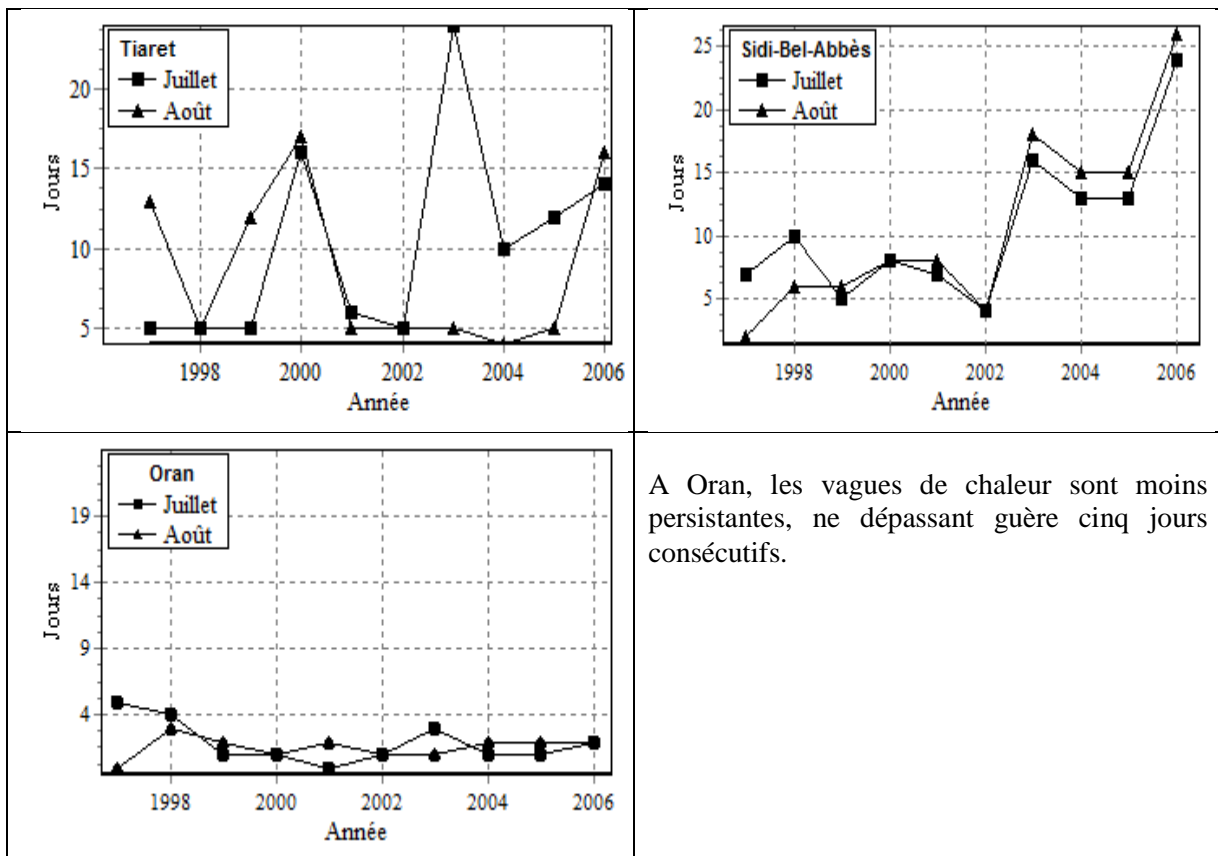


Figure 3 : Durées maximales des vagues de chaleur en juillet et août de la période 1997-2006.

Pour caractériser l'occurrence du phénomène durant la période estivale à la station de Tiaret, nous avons procédé, pour le mois de juillet, à un ajustement des durées maximales des vagues de chaleur par la loi de probabilités empirique. Le tableau 3 ci-dessous donne les probabilités de non dépassement d'une vague de chaleur de durée déterminée.

Tableau 3 : Probabilités empiriques de non dépassement de seuil à Tiaret

| Seuil (Jours) | 5 | 6 | 10 | 12 | 14 | 16 | 24 |
|--------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Probabilité de non dépassement | 0.09 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 |

Notons que la loi empirique a permis un meilleur ajustement des données, comparativement aux autres lois d'ajustement disponibles dans Instat+ (Figure4). Ainsi, en juillet, la probabilité qu'une vague de chaleur dépasse 16 jours consécutifs est de 20% à la station de Tiaret.

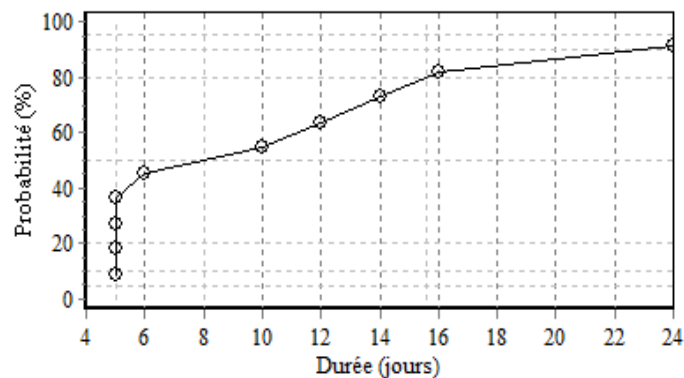


Figure 4 : Ajustement des vagues maximales de chaleur par une loi empirique en juillet

2.3. Vagues de froid

Une vague de froid est un refroidissement important de l'air ou une invasion d'air très froid sur une vaste région de quelques jours à quelques semaines (OMM,2000). En plus de leurs effets sur la santé, les vagues de froid affectent de nombreux secteurs de l'économie, en particulier les transports, l'énergie et l'agriculture. Ainsi, au centre du pays, la vague de froid de décembre 2004, accompagnée de fortes gelées a endommagé 6.000 serres agricoles, soit un manque à gagner de près de 180.000 tonnes de tomates. Nous définissons un jour froid comme étant un jour où la température minimale sous abri est égale ou inférieure à 0°C. De même, une vague de froid est d'autant plus intense que les températures sont plus faibles et qu'elles perdurent dans le temps. Ceci étant, les durées maximales des vagues de froid en période hivernale sont représentées en figure 4 ci-après, pour chacune des trois stations.

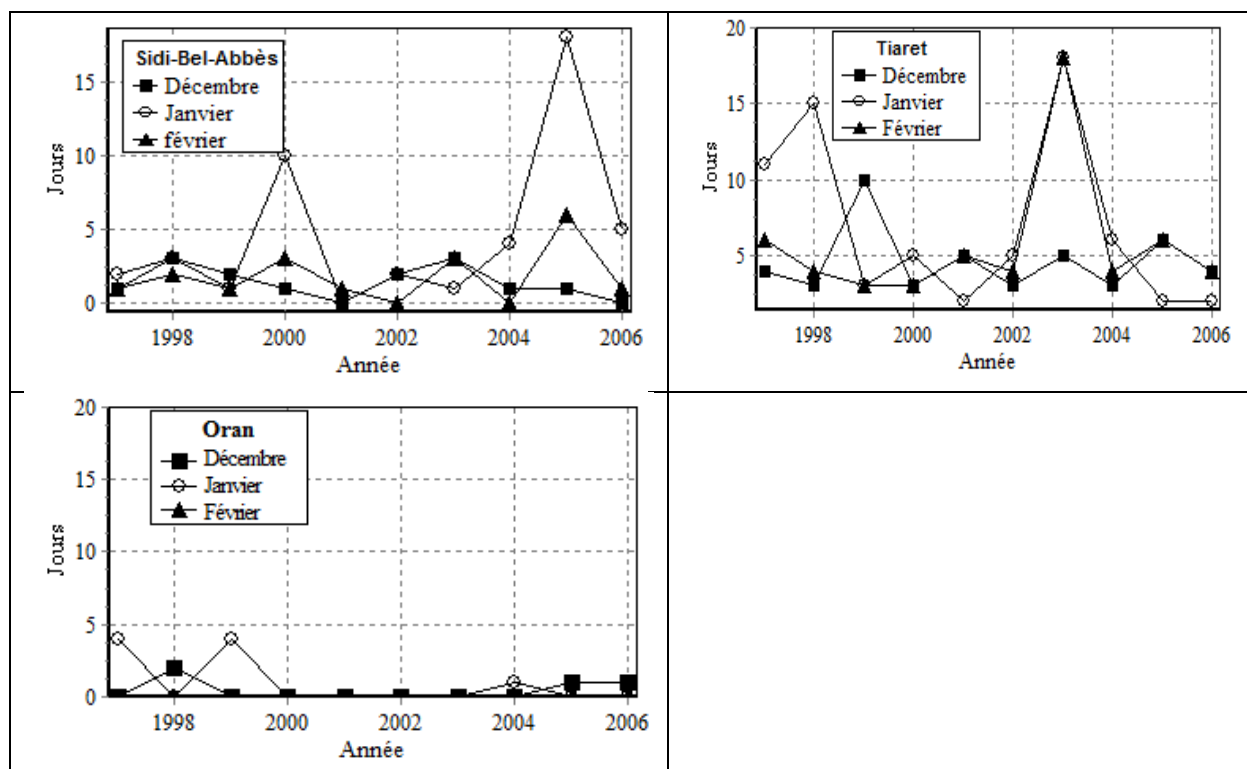


Figure 4 : Durées maximales des vagues de froid en décembre, janvier et février.

De rares vagues de froid ne dépassant pas cinq jours consécutifs sont observées dans le littoral oranais. Le phénomène est plus fréquent et plus intense dans les deux autres localités, avec une prépondérance durant le mois de janvier et un caractère plus accusé dans la région de Tiaret.

Conclusion

Les phénomènes engendrés par les extrêmes de température ont souvent des conséquences aussi fâcheuses les unes que les autres. Alors que sous d'autres latitudes, les vagues de froid affectent aussi bien la santé que l'agriculture et d'autres domaines; sous nos climats, c'est apparemment le secteur primaire qui demeure plus exposé, voire plus vulnérable à un tel phénomène climatique. Les vagues de chaleur, quant à elles, constituent une source d'inquiétude pour les personnes en charge de la veille sanitaire. Toutefois, leur persistance et leur intensité dépendent largement des facteurs géographiques locaux, en particulier l'effet modérateur de la mer dans les régions littorales. Enfin, même si ces aléas surviennent à des périodes préférentielles bien connues des climatologues, leur prévision reste malheureusement difficile à établir.

Bibliographie

Ambrosi, P., Houcarde J.C., 2002 : Evaluer les risques climatiques : ambiguïté de l'information et effets de croyance, *Risques*, n°50, pp. 61-73.

André J.C., Déqué M., Rogel P. et Planton S., 2004, Lavague de chaleur de l'été 2003 et sa prévision saisonnière, *C.R. Geoscience*, **336**, 491-503

Brown, S.J., J. Caesar, and C.A.T. Ferro, 2008: Global changes in extreme daily temperature since 1950. *Journal of Geophysical Research*, **113**, 13 March.

Hundecha, Y., A. St-Hilaire, T.B.M.J. Ouarda, S. El Adlouni, and P. Gachon, 2008: A nonstationary extreme value analysis for the assessment of changes in extreme annual wind speed over the Gulf of St. Lawrence, Canada. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **47**, 2745-2759.

Leroux M., 2000 : *la dynamique du temps et du climat*, éditions Dunod (Paris), 366p

Nogaj, M., P. Yiou, S. Parey, F. Malek, and P. Naveau, 2006: Amplitude and frequency of temperature extremes over the North Atlantic region. *Geophysical Research Letters*, **33**, No 10, 17 May.

OMM, 1999. *Le temps le climat et la santé*, n° 892

Stuart Coles, 2001: *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values* Springer, 227p