

République Algérienne Démocratique et Populaire
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université Hassiba Benbouali Chlef

جامعة حسيبة بن بوعلي الشلف

Faculté des Sciences agronomiques et Sciences biologiques
كلية العلوم الزراعية والعلوم البيولوجية



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Magister en Biologie
Option : Science de l'eau et bioclimatologie

**Etude d'impact du changement climatique sur la
productivité du blé dur en zone semi-aride
Cas du bassin chélif**

Présenté par
Mostefaoui Hassiba

Soutenu le 21/02/2011 , devant la Commission d'examen :

| | | | |
|---------------------|----------------------|------------|---------------|
| SAIDI Djamel | Université de Chlef | M.C.A | Président |
| BESSEDIK Mostefa | Université de Chlef | Professeur | Rapporteur |
| BENAICHATA Lazreg | Université de Tiaret | M.A.A | Co-rapporteur |
| BOUTHIBA Abdelkader | Université de Chlef | M.C.A | Examineur |
| ADDA Ahmed | Université de Tiaret | M.C.A | Examineur |
| REZZOUG Wafa | Université de Tiaret | M.C.B | Examinatrice |

2011

Dédicaces

A :

Mes parents

Mes frères et sœurs ainsi qu'à Ali

Fatiha qui m'a aidé tout au long de ce travail

A Fouzia et à tous ceux qui me sont chers

Remerciements

Au terme de cette étude je remercie Dieu tout puissant de m'avoir permis la réalisation de ce travail.

Je tiens à exprimer mon plus vif remerciement à M^f le professeur BESSEDIK Mostafa recteur de l'Université Hassiba Benbouali de Chlef, d'avoir accepté de diriger ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de mon profond respect, tout en le remerciant pour ses conseils, ses suggestions ayant permis d'améliorer ce manuscrit.

Mes remerciements les plus profonds à M^f BENAICHATA Lazreg, maître assistant à l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret, je le remercie de m'avoir aidé, conseillé, orienté et suivi tout au long de ce travail, je le remercie également pour ses qualités scientifiques et sa grande modestie.

Je tiens à remercier les membres du jury qui ont bien voulu d'examiner ce travail :

- M^f. SAIDI Djamel, Maître de conférences (A) à l'Université Hassiba Benbouali de Chlef, de m'avoir honoré en acceptant de présider ce jury.

- M^f. BOUTHIBA Abdelkader, Maître de conférences (A) à l'Université Hassiba Benbouali de Chlef, d'avoir accepté d'examiner ce travail

- M^f. ADDA Ahmed, Maître de conférences (A) à l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret pour avoir bien voulu d'évaluer ce travail.

- M^{elle} REZZOUG Wafa, Maître de conférences (B) à l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret d'avoir accepté de juger ce travail.

Mes sincères remerciements s'adressent à M^{me} Medjahed Fatiha et à tous mes enseignants de post-graduation en particulier M^f. Zemouri.

Mes remerciements vont aussi aux personnels de l'Office National de Météorologie (ONM), la Direction du Service Agricole (D.S.A) et aux personnels de la Chambre d'Agriculture de Chlef.

Et en fin, je dois attribuer une mention spéciale à Ahmed belouazni qui m'a aidé tout au long de ce travail et à tous mes amis Fouzia, Amina, Djahida, Rachid, Bacha, Mohamed, Djamel, ainsi qu'à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.

Résumé

Les scénarios du changement climatique à l'échelle globale annoncent une augmentation de la température moyenne, une diminution des pluies estivales en basses et moyennes latitudes et une augmentation de la demande en eau autour des tropiques. Dans de telles conditions, quels seront les impacts potentiels de ces changements sur la culture du blé dur, et notamment dans la région de Chlef ? Région connue pour son climat aride.

Pour cela, nous avons utilisé les sorties d'un modèle GCM comme données d'entrées dans le modèle de simulation de développement des cultures STICS. Ce modèle exige des données journalières du climat tels que les températures minimales, les températures maximales, les précipitations et le rayonnement global. Grâce au générateur stochastique des données du climat LARS-WG, nous avons pu générer les sorties à la bonne résolution. On a intégré ces nouvelles séries dans le modèle STICS dont le but principal était d'évaluer l'impact des changements climatiques sur le rendement du blé dur. Des simulations avec le modèle STICS ont été réalisées, elles estiment une augmentation du rendement de l'ordre de 44 % en moyenne pour le scénario A2, alors que celui du scénario B2 serait autour de 37.5 % en moyenne. Cette augmentation serait liée à la concentration élevée du taux du CO₂ dans l'atmosphère, ce qui se traduirait par une augmentation de la photosynthèse, ce la garantirait une nette amélioration de l'efficacité de conversion du rayonnement intercepté en biomasse.

Mots clés: changement climatique, simulation, scénario, STICS, rendement, blé dur.

Liste des abréviations

| | |
|------------------|--|
| ANDI | : Agence National de Développement de l'Investissement |
| A2 (25/26) | : Scénario A2 pour la saison agricole 2025/2026 |
| A2 (45/46) | : Scénario A2 pour la saison agricole 2045/2046 |
| A2 (65/66) | : Scénario A2 pour la saison agricole 2065/2066 |
| A2 (85/86) | : Scénario A2 pour la saison agricole 2085/2086 |
| A2 et B2 | : Scénarios de prévisions d'élévation de GES dans l'atmosphère selon différentes hypothèses de croissances démographique, économique et technologique. |
| ABH | : Agence du Bassin Hydrographique Cheliff Zahrez |
| AGCM | : Atmospheric Global Circulation Model |
| AGPM | : Association Générale des Production de Mais |
| AMF | : Acceleration Maximum Foliaire |
| AOGCM | : Atmospheric Oceanic Global Circulation Model |
| B2 (25/26) | : Scénario B2 pour la saison 2025/2026 |
| B2 (45/46) | : Scénario B2 pour la saison 2045/2046 |
| B2 (65/66) | : Scénario B2 pour la saison 2065/2066 |
| B2 (85/86) | : Scénario B2 pour la saison 2085/2086 |
| BHA2 | : Bilan Hydrique du scénario A2 |
| BHB2 | : Bilan Hydrique du scénario B2 |
| CCLS | : Coopérative des Céréales et des Légumes Secs. |
| C/N | : Rapport Carbone / Nitrogène |
| CCNUCC | : Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques |
| CFC _s | : Les ChloroFluoroCarbures |
| CE (ds/m) | : Conductivité Electrique (deciSiemens par mètre) |
| CH ₄ | : Gaz de Méthane |
| CIC | : Centre International des Cultures. |
| CNCC | : Centre National de Contrôle et de Certification des semences et plantes |
| CNIS | : Centre National de l'Informatique et des Statistiques. |
| CO ₂ | : Gaz de dioxyde de carbone |
| Cpluie | : Cumule des Pluies sur la période de simulation |
| DSA | : Direction de Service Agricole. |
| DA | : Densité Apparente |

| | |
|---------|---|
| DRG | : Début de Remplissage des Grains |
| EOP | : Evaporation Optimum by the Plant |
| EP | : Evapotranspiration by the Plant |
| ETM | : EvapoTranspiration Maximale |
| ETP | : EvapoTranspiration Potentielle |
| FAO | : Food and Agriculture Organization |
| FLO | : Stade Floraison |
| Flurac | : FLux d'absorption d'eau et d'azote limité par la capacité d'absorption par la plante |
| Flusol | : FLux d'absorption d'eau et d'azote limité par la capacité d'absorption par le transfert sol- racine |
| GCMs | : Les Models de Circulation Générale |
| GES | : Gaz à Effet de Serre. |
| GIEC | : Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat |
| HR (1) | : Humidité Relative de l'horizon 1 du sol |
| ITGC | : Institut Technologique des Grandes Cultures. |
| INNS | : Index of Nitrogen Nutrition Stress (Indice de stress azoté) |
| INRA | : Institut National de la Recherche Agronomique |
| IR | : Indice Foliaire |
| ITCF | : Institut Technique des Céréales et des Fourrages |
| LAI | : Leaf Area Index |
| LAN | : Leaf Area Null |
| LARS-WG | : Long Ashton Research Station Weather Generator |
| LAX | : Leaf Area Maximum |
| LEV | : Stade Levee |
| MAGICC | : Model for the Assessment of Greenhouse gas Induced Climate Change |
| MAT | : Stade Maturité |
| MA | : Ministère de l'Agriculture |
| MATE | : Ministère de l'Aménagement de Territoire et de l'Environnement |
| MCR | : Les Modèles Climatiques Régionaux |
| MCR | : Modèle Climatique Régionaux |
| NO2 | : Nitrogen dioxide |
| NS | : Nouvelle Structure |

| | |
|--------------------|---|
| Obs | : Observé |
| OGCM | : Oceanic Global Circulation Model |
| ONM | : Office National Météorologique |
| PLT/m ² | : Plante par mètre carré |
| PMG | : Poids de Mille Grains |
| PNDR | : Plan Notionnel du Développement Rural |
| Ppm | : Partie Par Million |
| Precip | : Apport journalier d'eau |
| RdA2 | : Rendement du scénario A2 |
| RdB2 | : Rendement du scénario B2 |
| SAT | : Surface Agricole Totale |
| SAU | : Surface Agricole Utile. |
| SB | : Structure de Base |
| SEN | : Stade Sénescence |
| SRES | : Special Report on Emission Scenarios |
| STICS | : Model multidisciplinaire des Cultures Standard |
| STP | : Surface Totale du Pays |
| STW | : Surface Totale de la Wilaya |
| Swfac | : Index of Stomatic Water Stress (indice de stress stomatique) |
| T E | : Tonne Equivalent. |
| Tmax | : Température maximale journalière de l'air |
| Tmin | : Température minimale journalière de l'air |
| Tmoy | : Température moyenne de l'air |
| TS (1) | : Température moyenne du sol dans l'horizon 1 |
| Turfac | : Index of Water Stress Turgescence (indice de stress de turgescence) |
| UPOV | : Union International pour la Production des Obtentions Végétales |
| USM | : Unité de Simulation. |

Listes des annexes

Annexes I- Présentation de la variété utilisée

I-1- Les caractères de la variété Chen's

I-2- D'autres caractères morphologiques

I-3- Présentation des dates observées des différents stades phénologiques du blé dur

I-4- Les stades de développement de la plante selon STICS (source INRA, 2002)

Annexes II- Propriétés physiques et chimiques du sol

Annexes III- Les principales fonctions de la simulation

Annexe IV- Variation de quelques paramètres climatiques du scénario A2

Figure. 01 -Variation de l'apport journalier d'eau "precip" et de la température moyenne de l'air "tmoy(n)" durant la saison agricole 2025/ 2026 du scénario A2

Figure. 02 -Variation de l'apport journalier d'eau "precip" et de la température moyenne de l'air "tmoy(n)" durant la saison agricole 2045/ 2046 du scénario A2

Figure. 03 -Variation de l'apport journalier d'eau "precip" et de la température moyenne de l'air "tmoy(n)" durant la saison agricole 2065/ 2066 du scénario A2

Figure. 04 -Variation de l'apport journalier d'eau "precip" et de la température moyenne de l'air "tmoy(n)" durant la saison agricole 2085/ 2086 du scénario A2

Figure. 05- Variation journalière de la Tmin et Tmax de l'air durant la saison agricole 2025/ 2026 du scénario A2.

Figure. 06- Variation journalière de la Tmin et Tmax de l'air durant la saison agricole 2085/ 2086 du scénario A2.

Figure. 07- Variation de la teneur en eau HR (1) et de la température moyenne du sol TS (1) de l'horizon 1 durant la saison agricole 2025/ 2026 du scénario A2

Figure. 08-Variation de la teneur en eau HR (1) et de la température moyenne du sol TS (1) de l'horizon 1 durant la saison agricole 2085/ 2086 du scénario A2

Annexe V- Variation de quelques paramètres climatiques du scénario B2

Figure. 01 -Variation de l'apport journalier d'eau "precip" et de la température moyenne de l'air "tmoy(n)" durant la saison agricole 2025/ 2026 du scénario B2.

Figure. 02 -Variation de l'apport journalier d'eau "precip" et de la température moyenne de l'air "tmoy(n)" durant la saison agricole 2045/ 2046 du scénario B2

Figure. 03 -Variation de l'apport journalier d'eau "precip" et de la température moyenne de l'air "tmoy(n)" durant la saison agricole 2065/ 2066 du scénario B2

Figure. 04 -Variation de l'apport journalier d'eau "precip" et de la température moyenne de l'air "tmoy(n)" durant la saison agricole 2085/ 2086 du scénario B2

Figure. 05- Variation journalière de la Tmin et Tmax de l'air durant la saison agricole 2025/ 2026 du scénario B2.

Figure. 06-Variation journalière de la Tmin et Tmax de l'air durant la saison agricole 2085/ 2086 du scénario B2.

Figure. 07- Variation de la teneur en eau HR (1) et de la température moyenne du sol TS (1) de l'horizon 1 durant la saison agricole 2025/ 2026 du scénario B2

Figure. 08- Variation de la teneur en eau HR (1) et de la température moyenne du sol TS (1) de l'horizon 1 durant la saison agricole 2085/ 2086 du scénario B2

Annexes VI- Variation du cumule de pluie sur la période de simulation " cpluie"pour les scénarios A2 et B2

Figure. 01-Variation du cumule de pluie sur la période de simulation " cpluie" durant la saison agricole 2085/2086 du scénario A2

Figure. 02-Variation du cumule de pluie sur la période de simulation " cpluie"durant la saison agricole 2025/2026 du scénario A2

Figure 03-Variation du cumule de pluie sur la période de simulation " cpluie"durant la saison agricole 2025/2026 du scénario B2

Figure 04-Variation du cumule de pluie sur la période de simulation " cpluie"durant la saison agricole 2085/2086 du scénario B2

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure. 01 - Impact des forçages radiatifs sur la température de surface (GIEC, 2001) | 4 |
| Figure. 02 - Evolution chronologique de certains gaz à effet de serre (GIEC, 2001) | 5 |
| Figure. 03- Schéma représentatif des différentes familles des scénarios SRES (GIEC, 2001) | 11 |
| Figure. 04 - Prévisions de concentrations du CO ₂ au XXI siècle selon les différents modèles climatiques utilisés (GIEC, 2001). | 12 |
| Figure. 05 - Simulation de l'augmentation de la température moyenne de surface entre 1990 et 2100 selon les différents scénarios (GIEC, 2001). | 12 |
| Figure. 06 - Schéma général de fonctionnement des modèles des cultures, (Brisson, 2002) | 17 |
| Figure. 07 - Schéma d'organisation des différents modules du modèle de culture. | 21 |
| Source (INRA, 2002)..... | 21 |
| Figure. 08 - Les phases de développement de la plante dans le modèle STICS (Brisson <i>et</i> <i>al.</i> , 1998)..... | 23 |
| Figure. 09 - Courbes de dilution de l'azote (adaptée par Lemaire <i>et al.</i> , 1997)..... | 25 |
| Figure. 10 - Répartition des terres agricoles de la Wilaya de Chlef (DSA, 2008) | 28 |
| Figure. 11 - Evolution de rendement du blé dur dans la wilaya de Chlef | 29 |
| Figure. 12 - Les différents stades de développement du blé dur. In (Zaaboubi, 2007)..... | 31 |
| Figure. 13 - Localisation de la région d'étude (ANDI, 2008) | 33 |
| Figure. 14 - Relief de la wilaya de Chlef (ABH. Cheliff Zahrez, 2003) | 34 |
| Figure. 15 - Répartition des précipitations moyennes annuelles (1978-2007) | 37 |
| Figure. 16 - Répartition mensuelle des précipitations (1978-2007). | 38 |
| Figure. 17 - Répartition saisonnière des précipitations (1978-2007) | 39 |
| Figure. 18 - Climagramme d'Emberger de la région de Chlef..... | 40 |
| Figure. 19 - Histogramme de variations des températures moyennes mensuelles (1978- 2007)..... | 41 |
| Figure.20 - Diagramme Ombrothermique de Gaussen (1978-2007)..... | 42 |
| Figure.21 - Variation de la vitesse moyenne du vent en m/s (1981-2000)..... | 43 |
| Figure. 22 - Durée moyenne d'insolation (en heures), période 1981-2001..... | 44 |
| Figure. 23 - Schéma résumant la méthodologie utilisée pour étudier les impacts du changement climatique | 47 |

| | |
|---|----|
| Figure. 24- Schéma décrivant la méthode des anomalies appliquées dans un générateur climatique LARS-WG. Tn est la température minimale ; Tx est la température maximale ; RR est la pluviométrie; et RG est le rayonnement global. | 49 |
| Figure. 25 -Schéma entrées/sorties de STICS (Source : INRA, 2002) | 51 |
| Figure. 26 - Variation des rendements simulés suivant les différentes périodes des scénarios A2 et B2..... | 59 |
| Figure. 27 - Comparaison entre le rendement simulé et observé dans les différentes périodes des scénarios A2 et B2. | 59 |
| Figure. 28 - Variation de la durée des stades phénologiques pour le scénario A2..... | 60 |
| Figure. 29 - Variation de la durée des stades phénologiques pour le scénario B2..... | 60 |
| Figure. 31 -Variation du rendement et du bilan hydrique pour le scénario A2..... | 64 |
| Figure. 32 -Variation du rendement et du bilan hydrique pour le scénario B2 | 64 |
| Figure. 33- Variation de l'apport journalier d'eau "précip" et de l'évapotranspiration journalière "et" durant l'ensemble de la simulation de la période 2025/ 2026 du scénario A2. | 65 |
| Figure. 34 -Variation de l'apport journalier d'eau "précip"et de l'évapotranspiration journalière "et" durant l'ensemble de la simulation de la période 2085/ 2086 du scénario A2. | 65 |
| Figure. 35 - L'évolution du flux d'absorption d'eau et d'azote limité par la capacité d'absorption par le transfert sol- racine « flusol » et par la plante « flurac » durant la saison agricole 2085/ 2086 du scénario A2. | 66 |
| Figure. 36 - L'évolution du flux d'absorption d'eau et d'azote limité par la capacité d'absorption par le transfert sol- racine « flusol » et par la plante « flurac » durant la saison agricole 2025/ 2026 du scénario A2. | 66 |
| Figure. 37 - Variation du bilan azoté selon les scénarios A2 et B2..... | 67 |
| Figure. 38 - Variation du bilan carboné selon les scénarios A2, B2 | 68 |
| Figure. 39 - Variation du rapport C/N selon les scénarios A2 et B2..... | 69 |
| Figure. 40 - Variation du rendement selon les dates de semis pour le scénario A2..... | 70 |
| Figure. 41 - Variation du rendement selon les dates de semis pour le scénario B2. | 71 |
| Figure. 42 - Variation du rendement selon les densités de semis du scénario A2..... | 72 |
| Figure. 43 - Variation du rendement selon les densités de semis du scénario B2..... | 72 |
| Figure. 44 - Effet des techniques culturales sur le rendement du scénario A2..... | 73 |
| Figure. 45 - Effet des techniques culturales sur le rendement du scénario B2..... | 74 |

Figure. 46 - Comparaison entre le rendement de structure de base et celui de la nouvelle structure 75

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau. 01 - Emissions sectorielles en équivalent CO ₂ par secteur (MATE, 2001)..... | 7 |
| Tableau. 02 - Résumé des six principaux scénarios du SRES (GIEC, 2000)..... | 11 |
| Tableau. 03 - Stades de développement considérés par STICS (Brisson <i>et al</i> , 1997)..... | 22 |
| Tableau. 04 - Propriétés physiques du sol (Bouthiba, 2003)..... | 35 |
| Tableau. 05- Propriétés chimiques du sol (Bouthiba, 2003) | 36 |
| Tableau. 06 - Variation des températures moyennes mensuelles (1978-2007)..... | 41 |
| Tableau. 07 - Les principales variables de forçage | 54 |
| Tableau. 08 – Variation des dates des différents stades phénologiques par rapport à l’observé concernant les périodes du scénario A2 et B2 | 61 |
| Tableau. 09- Variation de la durée des différents stades phénologiques concernant les périodes du scénario A2 par rapport à l’observé. | 61 |
| Tableau. 10 -Variation de la durée des différents stades phénologiques concernant les périodes du scénario B2 par rapport à l’observé..... | 61 |

Table des matières

| | |
|--|------------------|
| Remerciement..... | i |
| Résumé..... | ii |
| Liste des abréviations..... | v |
| Liste des annexes..... | vi |
| Liste des figures..... | vii |
| Liste des tableaux..... | viii |
| Table des matières..... | viii |
| <i>Introduction.....</i> | <i>1</i> |
| <i>Chapitre I - Changement climatique et l'agriculture.....</i> | <i>3</i> |
| <i>1- Problématique du changement climatique.....</i> | <i>4</i> |
| 1-1- Définition du changement climatique..... | 4 |
| 1-2- Les gaz à effet de serre..... | 5 |
| 1-3- L'ampleur des changements climatiques..... | 6 |
| 1-4- Méthodes de détection du changement climatique..... | 6 |
| 1-4-1- Détection du changement climatique dans la région d'étude..... | 6 |
| 1-5- Changements climatiques et agriculture en Algérie..... | 7 |
| 1-5-1- Agriculture et effet de serre en Algérie..... | 7 |
| 1-5-2- Changements climatiques et céréaliculture en Algérie..... | 8 |
| <i>2- Les Modèles de circulation générale GCM_s.....</i> | <i>8</i> |
| 2-1- Les modèles type GCMs ou AOGCM..... | 8 |
| 2-1-1- Les différents types de GCM..... | 8 |
| 2-2- Les scénarios d'émission..... | 9 |
| 2-2-1- Les scénarios IS92..... | 9 |
| 2-2-2- Les scénarios SRES..... | 9 |
| 2-3- Les modèles climatiques régionaux MCR..... | 12 |
| 2-3-1- Techniques de réduction d'échelle..... | 12 |
| <i>Chapitre II : STICS : Un outil de modélisation des systèmes agronomiques .</i> | <i>14</i> |
| <i>1- Aperçu sur les modèles de simulation de culture.....</i> | <i>15</i> |
| 1-1- Définition du système modélisé..... | 15 |
| 1-2- Structure générale des modèles de culture..... | 15 |

| | |
|---|-----------|
| 1-2-1- Les différents types de modèles..... | 15 |
| 1-3- Le fonctionnement carboné des plantes..... | 16 |
| 1-4- Concepts et formalismes..... | 17 |
| 1-4-1- Le développement..... | 17 |
| 1-4-2- La croissance..... | 17 |
| 3-4-3- L'élaboration dynamique du rendement et de la qualité..... | 18 |
| 1-4-3-1- Elaboration du rendement..... | 18 |
| 1-4-3-2- Élaboration de la qualité..... | 18 |
| 1-4-4- Effets des contraintes environnementales sur la culture..... | 19 |
| 2- Présentation du modèle STICS..... | 19 |
| 2-1- Généralités sur STICS..... | 19 |
| 2-1-1- Description du modèle..... | 20 |
| 2-1-2- Organisation en modules et optionalité..... | 20 |
| 2-1-3- Intérêts et limites..... | 21 |
| 2-1-3-1- Intérêts..... | 21 |
| 2-1-3-2- Limites..... | 21 |
| 2-2- Modules et formalismes du STICS..... | 22 |
| 2-2-1- Développement..... | 22 |
| 2-2-2- Croissance aérienne..... | 22 |
| 2-2-3- Elaboration du rendement..... | 23 |
| 2-2-4- Croissance racinaire..... | 24 |
| 2-2-5- Fonctionnement hydrique..... | 24 |
| 2-2-6- Fonctionnement azoté..... | 25 |
| Chapitre III -Aperçu général sur le blé dur..... | 26 |
| 1- Présentation de la culture du blé..... | 27 |
| 1-1- Aperçu général sur les céréales..... | 27 |
| 1-1-1- Dans le monde..... | 27 |
| 1-1-2- En Algérie..... | 27 |
| 1-1-3- A Chlef..... | 28 |
| 1-1-3-1- L'état de la production du blé dans la région d'étude..... | 29 |
| 1-2- Les contraintes de la céréaliculture en Algérie..... | 29 |
| 2- Généralité sur le blé dur..... | 30 |
| 2-1 Origine du blé dur..... | 30 |

| | |
|---|-----------|
| 2-2- Croissance et développement du blé dur | 30 |
| 2-2-1- Période végétative..... | 30 |
| 2-2-2- Période reproductrice..... | 31 |
| 2-2-3- Période de maturation des grains..... | 31 |
| Chapitre IV - Présentation de la zone d'étude | 32 |
| 1- Présentation générale de la zone d'étude..... | 33 |
| 1-1- Situation géographique | 33 |
| 1-2- Le relief..... | 33 |
| 1-3- Le sol..... | 35 |
| 1-3-1- l'analyse physique du sol..... | 35 |
| 1-3-2- L'analyse chimique du sol..... | 35 |
| 1-4- Végétation | 36 |
| 2- Climat..... | 36 |
| 2-1- Précipitations | 37 |
| 2-1-1- Répartition annuelle des précipitations..... | 37 |
| 2-1-2- Répartition mensuelle des précipitations..... | 37 |
| 2-1-3- Répartition saisonnière des précipitations | 38 |
| 2-1-4- Quotient pluviométrique d'Emberger..... | 39 |
| 2-2- La température | 40 |
| 2-3- Diagramme Ombrothermique de Gaussen (1957)..... | 42 |
| 2-4- Le vent | 43 |
| 2-5- L'insolation | 43 |
| Chapitre V- Méthodologie et formalismes | 45 |
| 1- Méthodologie d'analyses d'impacts du changement climatique..... | 46 |
| 1-1- Utilisation des scénarios du changement climatique dans le STICS. | 47 |
| 1-2- Génération stochastique des scénarios climatiques | 48 |
| 1-2-1- Généralité sur LARS-WG | 48 |
| 1-2-2- Méthode d'application des données de GCM dans l'étude d'impact | 48 |
| 1-2-3- Séries de données appliquées dans cette étude..... | 49 |
| 1-3- Choix de techniques culturales pour la simulation | 49 |
| 2- Paramétrage et validation du modèle de culture STICS..... | 50 |
| 2-1- Les options et les formalismes choisis..... | 50 |
| 2-2- L'environnement du STICS | 51 |

| | |
|--|-----------|
| 2-2-1- Notion d'USM | 52 |
| 2-2-2- Les variables de forçage | 52 |
| 2-2-2-1- Forçages climatiques | 52 |
| 2-2-2-2- Paramètres liés au sol | 53 |
| 2-2-2-3- Paramètres liés à la plante | 53 |
| 2-2-2-4- Itinéraires techniques..... | 53 |
| 2-2-3- Les fichiers de sorties | 55 |
| 2-2-3-1- Les fichiers de bilan de simulation..... | 55 |
| 2-2-3-2- Les fichiers dynamiques..... | 56 |
| 2-2-3-3- Le fichier profil. <i>sti</i> | 56 |
| 2-2-3-4- Le fichier history. <i>sti</i> | 56 |
| 2-3- Le matériel végétal..... | 56 |
| Chapitre VI - Etude d'impact du changement climatique..... | 57 |
| 1- Impact du changement climatique | 58 |
| 1-1- Impact du changement climatique sur le rendement..... | 58 |
| 1-2- Impact du changement climatique sur la phénologie..... | 60 |
| 1-3- Impact du changement climatique sur le bilan hydrique, azoté et carboné | 63 |
| 1-3-1- Le bilan hydrique..... | 63 |
| 1-3-2- Le bilan azoté..... | 67 |
| 1-3-3- Le bilan carboné | 68 |
| 2- Etude de stratégies d'adaptation au changement climatique | 70 |
| 2-1- Effet des dates de semis sur le rendement | 70 |
| 2-2- Effet des densités de semis sur le rendement..... | 71 |
| Conclusion et perspectives | 76 |
| Références bibliographiques..... | 81 |
| Annexes..... | 92 |

Introduction

Introduction

Les perspectives d'évolution du climat, à cause des émissions de gaz à effet de serre, ont des conséquences majeures sur la production agricole (GIEC, 2001 ; Perarnaud *et al.*, 2005). Le modèle « M.A.G.I.C.C » (Model for the Assessment of Greenhouse gas Induced Climate Change, Hulme *et al.*, 2000), centré sur la région du Maghreb, en l'occurrence l'Algérie, estime en effet un réchauffement de l'ordre de 1°C entre 2000 et 2020 et une perturbation des régimes pluviométriques avec une tendance à la baisse, de l'ordre de 5 à 10%. A plus long terme, la température pourrait augmenter de 3°C d'ici 2050 voire dépasser les 5°C en 2100, alors que les précipitations diminueraient de 10 à 30% d'ici 2050 voire 20 à 50 % en 2100 (Rousset et Arrus, 2006). Des changements dans les moyennes, mêmes faibles, impliqueraient une augmentation de la fréquence des extrêmes climatiques (Katz et Brown, 1992). En effet, les changements climatiques apparaîtraient comme une question essentielle pour le secteur agricole, ce qui permet de conduire des études d'impact (Garcia, 2006), en particulier dans la zone aride (Kara, 2008).

Afin d'assurer une certaine crédibilité aux études d'impact, il importe de pouvoir prendre en compte l'ensemble des réactions biophysiques des éléments du système sol-climat-techniques culturales à la modification des facteurs du climat et à l'élévation du CO₂, il semble pertinent d'utiliser un modèle de culture mécaniste, pouvant être forcé par des variables d'entrée provenant des scénarios climatiques qui sont produits par des modèles globaux (Garcia *et al.*, 2004).

Les modèles de cultures, qui sont développés depuis une trentaine d'années, offrent un cadre conceptuel pour étudier les interactions dynamiques entre la plante, le sol, le climat et les techniques culturales à l'échelle parcellaire (Brisson *et al.*, 1998). Ainsi le modèle STICS (Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard), développé à l'I.N.R.A depuis 1996, décrit un grand nombre de processus écophysologiques et agronomiques, représentatifs du fonctionnement de la plupart des espèces annuels cultivés (Garcia *et al.*, 2004).

L'élaboration d'un tel outil permettrait non seulement d'approfondir notre compréhension du fonctionnement de ces systèmes complexes mais également d'étudier ce fonctionnement dans le cadre d'un changement global. Sachant que les perspectives d'évolution du climat, en relation avec l'émission de gaz à effet de serre d'origine anthropique, auront des conséquences probables sur la production agricole (GIEC, 2001).

En Algérie, les cultures céréalières sont les plus importantes du point de vue agronomique, socio-économique et culturel (CIC, 2000). En effet, les céréales occupent la plus grande superficie agricole cultivée et représentent le premier aliment de base de la population algérienne (Rachdi, 2003). Les grandes cultures sont conduites essentiellement sous régime pluvial, notamment les céréales qui occupent principalement la zone semi- aride, avec des emblavures annuelles comprises entre 2 900 000 et 3 500 000 hectares (Feliachi, 2000) dont le blé dur y occupe une superficie importante : un million d'hectares environ (Adamou *et al.*, 2005) mais les rendements restent faibles et irréguliers (Bernardi et Gommès, 2004). La principale cause de cette fluctuation est la variabilité climatique et atmosphérique telles que l'éclairement, la température et les précipitations qui entrent en jeu dans le processus de développement et de croissance des cultures (Bouazza *et al.*, 2002).

Les objectifs tracés dans la présente étude visent à fournir assez d'éléments pour définir la notion de changement climatique et son amplitude dans la région d'étude d'une part, et d'autre part, l'utilisation du modèle STICS pour analyser les impacts du changement climatique sur le rendement du blé dur à l'échelle de la région de Chlef. Ceci offre aux décideurs un outil d'alerte pour la prise des décisions en cas de variation de la production du blé dur, liée aux changements climatiques.

Ce travail est composé de six chapitres. Le premier porte sur le bilan des connaissances sur le changement climatique et ses implications sur l'agriculture suivie par une présentation des différents modèles de circulation générale (GCM) et les scénarios d'émission. Le deuxième chapitre décrit le modèle de culture STICS et ces différents modules, sa capacité et ses limites. Le troisième chapitre présente un aperçu général sur le blé dur, son origine et ses différentes phases phénologiques ainsi que l'état de production de cette denrée dans la région d'étude. Le quatrième chapitre est consacré à l'étude de la région de Chlef qui inclut une présentation générale de la zone d'étude, suivi par une étude climatique pour déterminer les saisons sèches et humides ainsi que l'étage bioclimatique de la région. Le cinquième chapitre présente la méthodologie adoptée et les formalismes utilisés dans le modèle STICS. Le sixième chapitre est consacré à l'étude d'impact du changement climatique sur le rendement, la phénologie, les bilans hydrique, azoté et carboné. Succède une intégration des différentes techniques culturales servant à améliorer le rendement dans l'avenir. Cette étude a été réalisée sous les différentes périodes des scénarios du changement climatique A2 et B2. Une conclusion générale résume l'ensemble des résultats obtenus où des perspectives de recherche sont proposées.

Chapitre I- Changement climatique et l'agriculture

1- Problématique du changement climatique

1-1- Définition du changement climatique

Selon la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), le changement climatique est un changement du climat attribué directement ou indirectement à toute activité humaine qui modifie la composition de l'atmosphère globale et qui s'ajoute à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes de temps comparables (fig. 01).

Selon le GIEC (Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat), le terme "changement climatique" se réfère à tout changement du climat, qu'il soit d'origine naturelle ou dû aux activités humaines (GIEC, 2001).

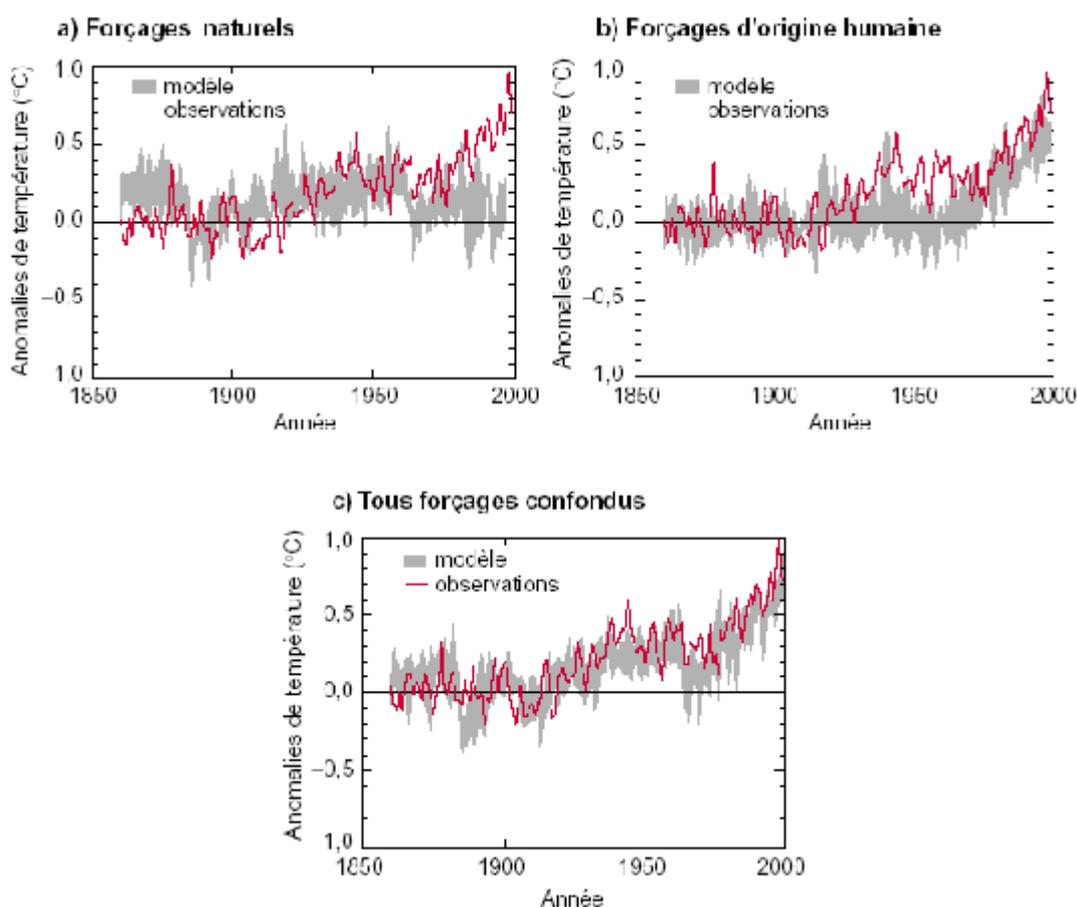


Figure. 01 - Impact des forçages radiatifs sur la température de surface (GIEC, 2001)

1-2- Les gaz à effet de serre

L'effet de serre est un phénomène naturel produit par certains gaz atmosphériques (vapeur d'eau, dioxyde de carbone, ozone, méthane, oxydes nitreux, ainsi que les ChloroFluoroCarbures), qui absorbent du rayonnement infrarouge émis par la terre, partiellement réémis vers le sol (Kara, 2008). Ces gaz, lorsqu'ils sont en quantité modérée, participent au maintien d'une température moyenne au sol à 15 C° au lieu de -18 C° (Raunet, 2005). Ce phénomène prend de l'ampleur du fait des activités humaines, en particulier de la combustion des produits carbonés fossiles, les transports, les industries manufacturières et énergétiques, l'agriculture, le secteur résidentiel et tertiaire (Baubion, 2004). Il semble y avoir aujourd'hui un consensus sur le fait que l'on assiste à une augmentation continue en teneur de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère (fig. 02), en particulier du dioxyde de carbone (CO_2) et du méthane (CH_4), dont l'accroissement annuel moyen fluctuerait entre 0,5% et 1% par an (Levet, 2006).

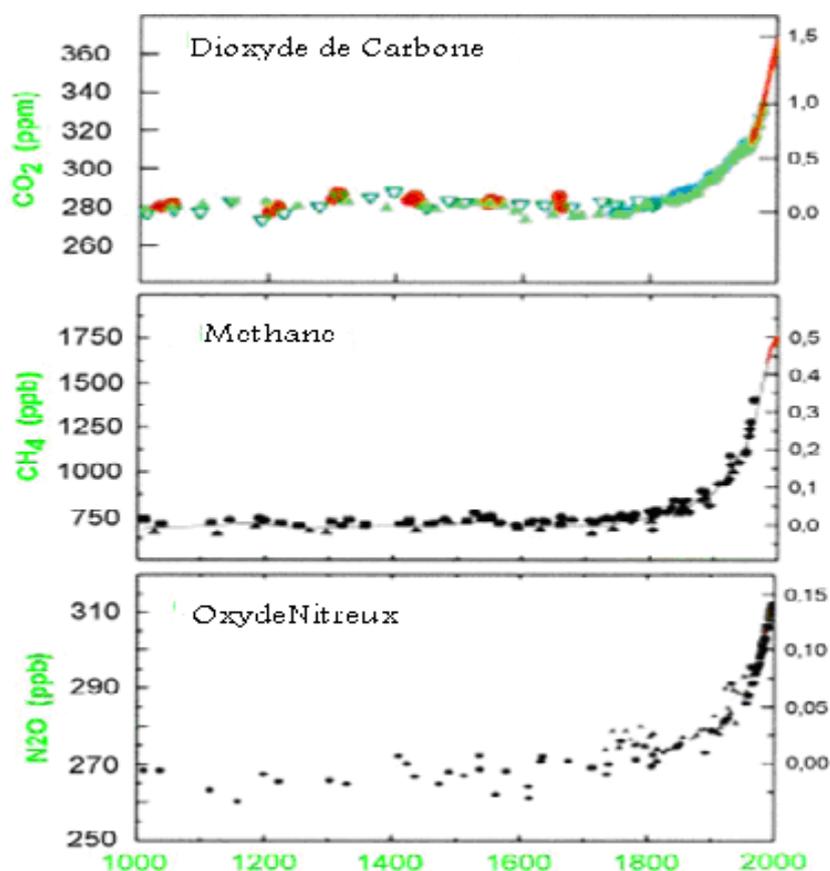


Figure. 02 - Evolution chronologique de certains gaz à effet de serre (GIEC, 2001)

1-3- L'ampleur des changements climatiques

L'homme est responsable du changement climatique à la surface de la terre (GIEC, 2007), dont l'accroissement de la concentration en GES risque de doubler à la fin du 21^e siècle (passage de 380 ppm de CO₂ en 2000 à 600 ppm en 2100, augmentation de 31 % depuis 1750), entraînant un sensible réchauffement climatique qui, selon la plupart des experts, a déjà commencé (Raunet, 2005).

La température moyenne actuelle de la surface de la terre est de 15°C (Levet, 2006). Elle a augmenté au 20^e siècle, d'environ 0,6°C. Les modèles prévoient une augmentation de cette moyenne générale de 1,4°C à 5,8°C d'ici à 2100. Si la tendance au réchauffement fait maintenant l'objet d'un consensus, l'ampleur de ce phénomène est en grande partie imprévisible (Baubion, 2004).

1-4- Méthodes de détection du changement climatique

Des indices de plus en plus nombreux montrent que le réchauffement climatique a déjà commencé en accord avec les prédictions des modèles climatiques globaux (Planton, 2003). Ces indicateurs de changements climatiques sont développés dans plusieurs centres de recherche et par beaucoup de chercheurs, le but de l'élaboration de ces indices vise la détection des changements climatiques. Le calcul de ces indices se base souvent sur les maxima, les minima des températures journalières ainsi que les précipitations quotidiennes (Benaichata *et al.*, 2008).

Le GIEC (1995), a émis la certitude que les effets d'origine anthropique ont influencé considérablement les changements globaux. L'un des effets le plus ressenti étant l'élévation de la température moyenne du globe d'environ 0,7°C depuis la deuxième moitié du siècle (Nicholls *et al.*, 1996 ; Parker *et al.*, 2000).

1-4-1- Détection du changement climatique dans la région d'étude

Une étude de détection du changement climatique faite par Benaichata *et al.* (2008) sur la région du sud de la méditerranée en l'occurrence l'Algérie durant les deux dernières décennies montre que la fréquence des jours chauds a augmenté significativement et la fréquence des jours froids a baissé significativement, ainsi que les extrêmes des températures et leurs amplitudes sont tous à la hausse, ce qui se traduit souvent par des canicules dangereuses fréquentes en été. Ceci exprime le réchauffement

de la région d'étude. Cependant les précipitations sont généralement en baisse, excepté certains points de mesure où l'on note une hausse des précipitations (Benaichata *et al.* 2008).

1-5- Changements climatiques et agriculture en Algérie

L'Algérie présente une grande sensibilité au climat à cause de la grande variabilité des pluies saisonnières et annuelles (Bouthiba et Merabet, 2005). Au vu du caractère aride et semi aride de son climat, l'Algérie ressentira davantage les effets des changements climatiques (Kara, 2008). Selon le même auteur il y a environ 10% de baisse des précipitations et une augmentation des températures, ces 20 dernières années, de 2C° environ.

Dans le secteur de l'agriculture, on note une modification du calendrier agricole traditionnel et le raccourcissement du cycle végétal ainsi qu'une diminution de la production agricole moyenne, en particulier dans les cultures sèches et certaines cultures consommatrices d'eau (Antipolis, 2007).

1-5-1- Agriculture et effet de serre en Algérie

Tous les secteurs d'activités émettent des gaz à effet de serre (GES) et l'agriculture ne fait pas l'exception (Seguin, 2004).

D'après le Ministère algérien de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement ou MATE, (2001), le secteur de l'agriculture en Algérie est la 3^{ème} source d'émissions de gaz à effet de serre avec 12,038 millions de tonnes de CO₂, soit 11,5 % du total des émissions brutes (tab. 01). La plus grande partie des émissions provient de N₂O qui représente près de 2/3 des émissions agrégées du secteur agricole (87,45 %). Ceci s'explique par l'utilisation des engrais azotés pour l'enrichissement des sols. Le CH₄ contribue pour 1/3 des émissions de ce secteur, provenant de la fermentation entérique et des déchets d'animaux domestiques.

Tableau. 01 - Emissions sectorielles en équivalent CO₂ par secteur (MATE, 2001)

| Paramètres | 1000*TE-CO ₂ | Pourcentage |
|-----------------------------|-------------------------|-------------|
| Energie | 70 165.71 | 66.96 |
| Sols/Forêts | 13 039.56 | 12.44 |
| Agriculture | 12 038.34 | 11.49 |
| Procédés industriels | 4 735.64 | 4.52 |
| Déchets | 4 815.11 | 4.59 |
| Totaux | 104 794,36 | 100.00 |

1-5-2- Changements climatiques et céréaliculture en Algérie

Les impacts des changements climatiques sur la production agricole auront des effets directs et/ou indirects selon le type de culture et les lieux de production (Soussana, 2001).

Le changement climatique entraînerait des effets négatifs sur les potentiels agricoles (Rousset et René, 2004). L'agriculture de type pluviale, à dominance céréalière, est implicitement très vulnérable à tout changement de climat (Bouazza *et al.*, 2002). Les services du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement estiment une réduction moyenne du rendement céréalier de l'ordre de 5,5 à 6,8% suite aux incidences dues principalement aux changements climatiques. Cette situation s'est traduite probablement par l'augmentation des températures, la diminution des précipitations et l'augmentation de leur variabilité, ce qui implique un décalage et un raccourcissement des cycles de végétation, affectant la production (Rousset, 2008).

2- Les Modèles de circulation générale GCMs

2-1- Les modèles type GCMs ou AOGCM

La prévision des changements climatiques est un enjeu majeur de ce siècle. Cependant, les climats sont des phénomènes complexes, déterminés par un très grand nombre de facteurs (Denoux *et al.*, 2003). Cette complexité rend nécessaire l'exploitation de nombreux modèles numériques appelés « Modèles de Circulation Générale » ou GCMs qui stimulent de façon mathématique les interactions Terre-Atmosphère, comme ils déterminent l'ensemble du climat terrestre (Enright, 2001).

2-1-1- Les différents types de GCM

Selon Mearns (2003), il existe de nombreux GCM plus ou moins perfectionnés, complexes, et qui modélisent des compartiments spécifiques. Les quatre types majeurs sont les suivants :

– Un AGCM (modèle de circulation globale atmosphérique) ne prend en compte que l'atmosphère et ses interactions avec la surface terrestre ;

– Un AGCM Slab est équivalent à un AGCM auquel on ajoute des océans idéalisés à une couche homogène d'une cinquantaine de mètres d'épaisseur environ ;

– Un OGCM (modèle de circulation globale océanique) ne prend en compte que les océans ;

– Un AOGCM (modèle de circulation globale couplée atmosphère-océans) est le GCM couplé par excellence le plus complet et le plus complexe, car il prend en compte les interactions atmosphère-océans dans la prévision des climats.

À ces groupes de GCM s'ajoutent des modèles supplémentaires, comme un modèle de cryosphère (modélisation des glaces) pour un OGCM.

2-2- Les scénarios d'émission

Les scénarios ont pour objectif de représenter de manière simple le monde futur sous différents aspects. Ils se fondent sur des hypothèses d'évolution pour aboutir à des projections dans différents domaines (Deniaux, 2000).

2-2-1- Les scénarios IS92

Pour construire des scénarios des émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols sulfatés pour les 100 prochaines années et au de là, le GIEC a présenté en 1992 un ensemble de scénarios d'émissions qui lui ont servi à établir les projections climatiques figurant dans son deuxième rapport d'évaluation (GIEC, 1996). Ces scénarios d'émissions ont été appelés «scénarios IS92» (GIEC, 2001).

Ces scénarios se composaient de six scénarios d'émissions, IS92a-f, dont IS92e et IS92c donnaient respectivement les concentrations les plus fortes et les plus faibles de gaz à effet de serre (Enright, 2001). Le scénario IS92a, est basé sur la croissance démographique et le développement économique dont essentiellement la croissance de la consommation énergétique (Sottile, 2006).

2-2-2- Les scénarios SRES

Pour son troisième rapport d'évaluation, le GIEC (2001), a écrit un rapport spécial sur les scénarios d'émissions (*Special Report on Emission Scenarios*, ou SRES), où ils ont décrit quatre canevas narratifs principaux et pourtant différents, représentant divers stades de développement démographique, social, économique, technologique et environnemental (Jancovici, 2004). À partir de ces canevas, ils ont dégagé quatre familles de scénarios et mis au point au total 40 scénarios d'émissions. Ils ont par la suite été convertis en projections de la composition future de l'atmosphère (Polcher, 2005). Les six groupes de scénarios tels que les

trois familles (fig. 03 et tab. 02) de scénarios A2, B1 et B2 plus trois groupes dans la famille A1 : A1B, A1FI et A1T sont présentées ci-dessous.

A1 : Un monde futur à croissance économique très rapide, à faible croissance démographique et à introduction rapide de technologies nouvelles et plus efficaces. Les grands thèmes sous-jacents sont la convergence économique et culturelle et le renforcement des capacités, avec une réduction substantielle des différences régionales du revenu par habitant. Dans ce monde, les gens recherchent la richesse personnelle, plutôt que la qualité de l'environnement.

La famille de scénarios A1 se divise en trois groupes liés à différentes hypothèses concernant l'évolution technologique du système énergétique :

A1FI, basé sur un usage intensif de combustibles fossiles ;

A1T, lié à des sources d'énergie autres que fossiles ;

A1B, établi sur un équilibre entre toutes les sources d'énergie.

A2 : Un monde très hétérogène. Le thème sous-jacent est celui du raffermissement des identités culturelles régionales, avec l'accent sur les valeurs familiales et les traditions locales, une forte croissance de la population et moins de préoccupations pour le développement économique rapide.

B1 : Un monde convergent avec changement rapide des structures économiques, dématérialisation et introduction de technologies « propres ». L'accent est mis sur des solutions mondiales orientées vers la durabilité sociale et environnementale, y compris des efforts concertés de développement technologique rapide, de dématérialisation de l'économie et de meilleure équité.

B2 : Un monde où l'accent est mis sur des solutions locales dans le sens de la durabilité économique, sociale et environnementale. C'est un monde hétérogène où les changements technologiques sont moins rapides et plus diversifiés, mais où l'on met beaucoup d'accent sur l'initiative communautaire et l'innovation sociale pour trouver des solutions locales, plutôt que globales.

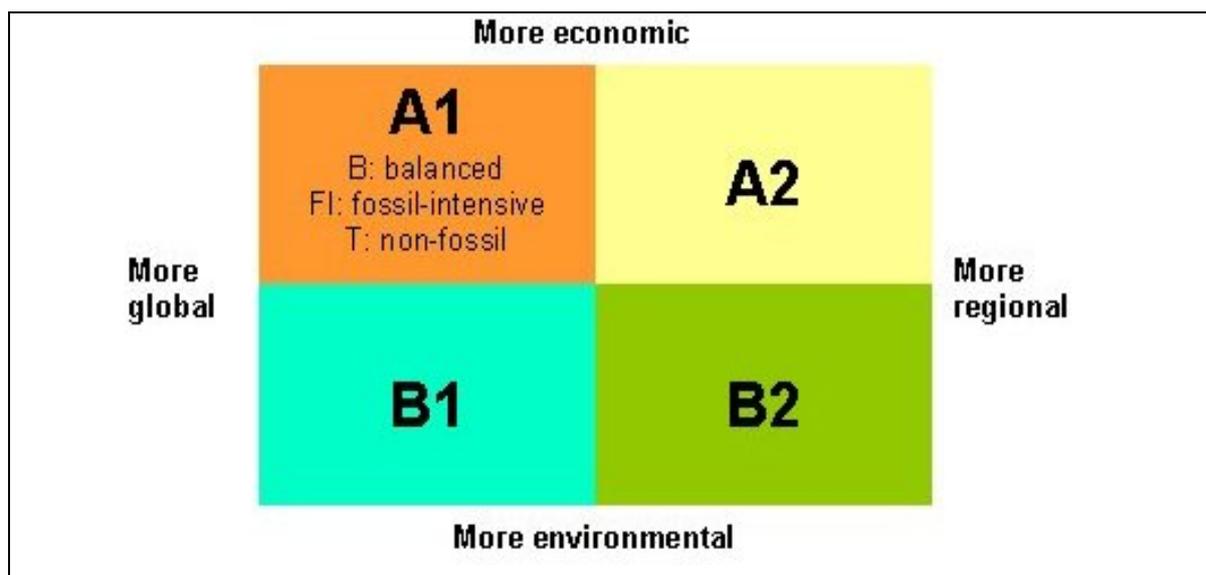


Figure. 03- Schéma représentatif des différentes familles des scénarios SRES (GIEC, 2001)

Tableau. 02 - Résumé des six principaux scénarios du SRES (GIEC, 2000)

| Scénario Group | A1FI | A1B | A1T | A2 | B1 | B2 |
|---|-------------------------|------------|---------------------------|---------------|---------------------------------|---------------------|
| Croissance de la population | Faible | Faible | Faible | Forte | Faible | Moyenne |
| Croissance du PNB | Très forte | Très forte | Très forte | Moyenne | Forte | Moyenne |
| Consommation d'énergie | Très forte | Très forte | Forte | Forte | Faible | Moyenne |
| Changement d'affectation des terres | Faible moyenne | Faible | Faible | Moyenne forte | Forte | Moyenne |
| Disponibilité des ressources pétrolières/gazières | Forte | Moyenne | Moyenne | Faible | Faible | Moyenne |
| Progrès technologiques | Rapides | Rapides | Rapides | Lents | Moyens | Moyens |
| Promotion du changement | Charbon, pétrole et gaz | Équilibrée | Combustibles non fossiles | Régionale | Efficacité et dématérialisation | "dynamics as usual" |

Les figures 04 et 05 montrent bien les prévisions de concentrations du CO₂ et l'écart entre les extrêmes de températures moyennes au XXI siècle selon les différents modèles climatiques.

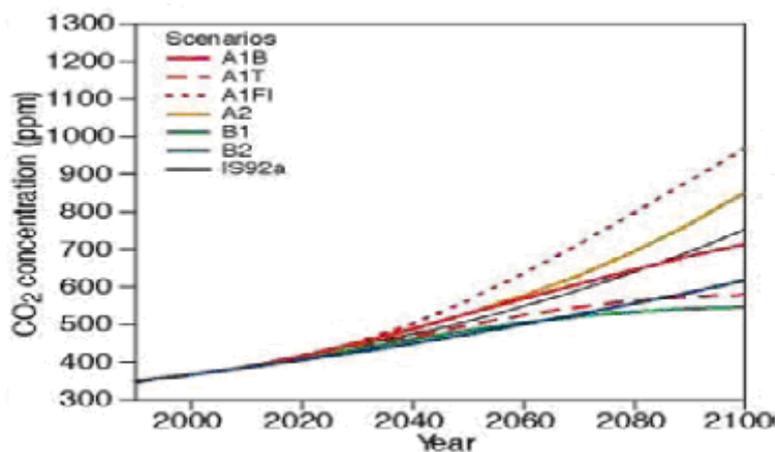


Figure. 04 - Prévisions de concentrations du CO₂ au XXI siècle selon les différents scénarios (GIEC, 2001).

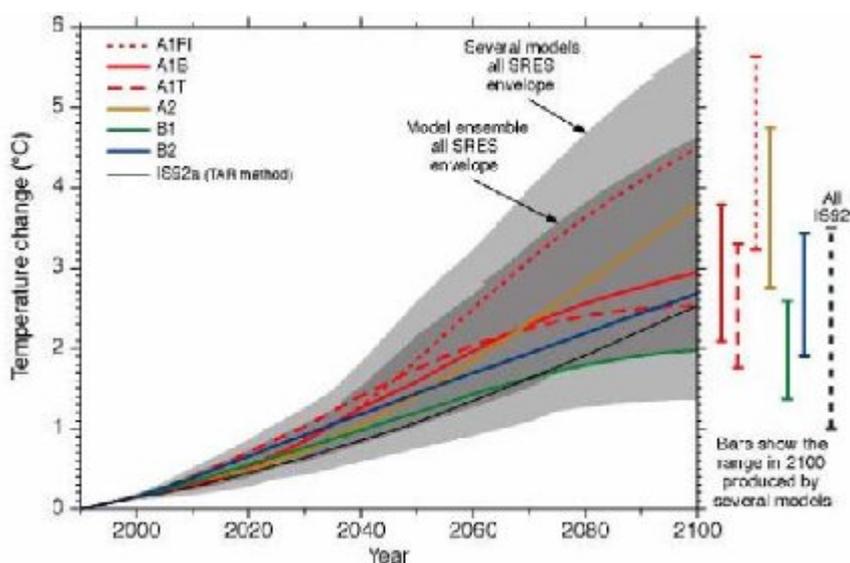


Figure. 05 - Simulation de l'augmentation de la température moyenne de surface entre 1990 et 2100 selon les différents scénarios (GIEC, 2001).

2-3- Les modèles climatiques régionaux MCR

Les modèles climatiques régionaux ont pour but de prévoir les variations climatiques à des résolutions spatiales sensiblement plus grandes que celles obtenues à partir de modèles de circulation globaux (Diarra, 2001). Ainsi ils doivent être capable de donner des résultats plus proches de la réalité que les GCMs (Machenhauer *et al.*, 1998).

2-3-1- Techniques de réduction d'échelle

Il existe, cependant, des techniques pour réduire l'échelle des résultats des GCMs. Ces techniques dites de « downscaling », se divisent en deux groupes : statistiques et dynamiques. Les techniques statistiques sont fondées sur l'établissement d'une relation

empirique entre les variables climatiques de grande échelle et les variables climatiques locales. Les techniques dynamiques sont basées sur l'usage de modèles numériques de climat, en particulier les Modèles Climatiques dits « Régionaux » ou M.C.R (Diarra, 2001).

Chapitre II - STICS : Un outil de modélisation des systèmes agronomiques

1- Aperçu sur les modèles de simulation de culture

Le développement de l'informatique a permis l'essor des "modèles de cultures", reproduisant le comportement d'une culture et sa réponse à diverses contraintes du milieu modulées par des actes techniques (Affholder, 2001).

Les modèles des cultures, nés il y a 25 ans, sont très utilisés en agronomie (Brisson, 2002). Ils simulent le fonctionnement dynamique du système sol-couvert végétal, dont le pas de temps est le plus souvent journalier, c'est-à-dire qu'ils décrivent l'état du système chaque jour (Barbottin, 2004). Les premiers travaux dans ce domaine ont porté sur la simulation des flux hydriques dans le système sol-plante-atmosphère, dans le but d'optimiser la gestion de l'irrigation (Hanks *et al.*, 1969)

1-1- Définition du système modélisé

L'ensemble sol-couvert végétal constitue le système modélisé (Garcia, 2006). L'atmosphère au voisinage du système est en général appréhendée comme la condition limite supérieure et représentée par un ensemble de variables climatiques issues de mesures standards (stations météorologiques) ayant une fonction de forçage (Brisson *et al.*, 2005). Les éléments constitutifs des deux sous-systèmes sol et couvert végétal varient entre les modèles selon leur genèse et leurs objectifs (Brisson et Delecote, 1991).

En interaction avec le système, les modèles prennent en compte les actions techniques de l'agriculteur ; leur résolution spatiale correspond au plus petit élément pour lequel on peut définir de façon déterministe un milieu physique et un itinéraire technique (Barbottin, 2004).

1-2- Structure générale des modèles de culture

Les modèles de culture comprennent un ensemble de variables d'entrée (climat journalier, techniques culturales, état initial du système au démarrage de la simulation,..), et de variables de sortie (à la fin de la simulation) comme le rendement à la récolte, l'efficacité d'utilisation de l'eau ou de l'azote au cours du cycle de culture, entre autres (Affholder, 2001).

1-2-1- Les différents types de modèles

Selon la nature des variables d'état décrites dans le modèle (température, indice de nutrition azotée, réserve en eau du sol) et les équations mathématiques simulant leurs

évolution, on distingue les modèles de type « mécaniste » et les modèles de type « empirique » (Monteith, 1996 ; Whisler *et al.*, 1986).

Les modèles de type « **mécaniste** » décrivent et quantifient chaque processus, sur des bases physiques ou physiologiques, c'est-à-dire que les équations décrivent finement les processus tels que la respiration, la croissance et le développement de chaque organe (Monteith, 1996 ; Passioura, 1996 ; Whisler *et al.*, 1986).

Dans les modèles de type « **empirique** », les relations décrivant ces processus constituent une simplification des relations complexes existant au sein du système. Il s'agit par exemple de simples régressions linéaires entre deux variables d'état (Monteith, 1996 ; Passioura, 1996 ; Whisler *et al.*, 1986).

1-3- Le fonctionnement carboné des plantes

La croissance du couvert végétal repose sur le fonctionnement carboné des plantes (Brisson *et al.*, 2002). Le rayonnement intercepté par l'appareil végétatif chlorophyllien est transformé en biomasse puis répartie dans les différents organes du végétal (Brisson et Delecote, 1991).

Selon Barbottin (2004), les modèles de culture sont des modèles à compartiments, reliés entre eux par des flux de matière dépendant d'un pilotage énergétique et des flux d'information. Ils se déclinent généralement en quatre modules, ou quatre unités (Garcia, 2006).

Trois de ces modules se consacrent à la description du fonctionnement de la culture en termes de croissance et de développement, le quatrième se consacre à la description du sol (fig. 06).

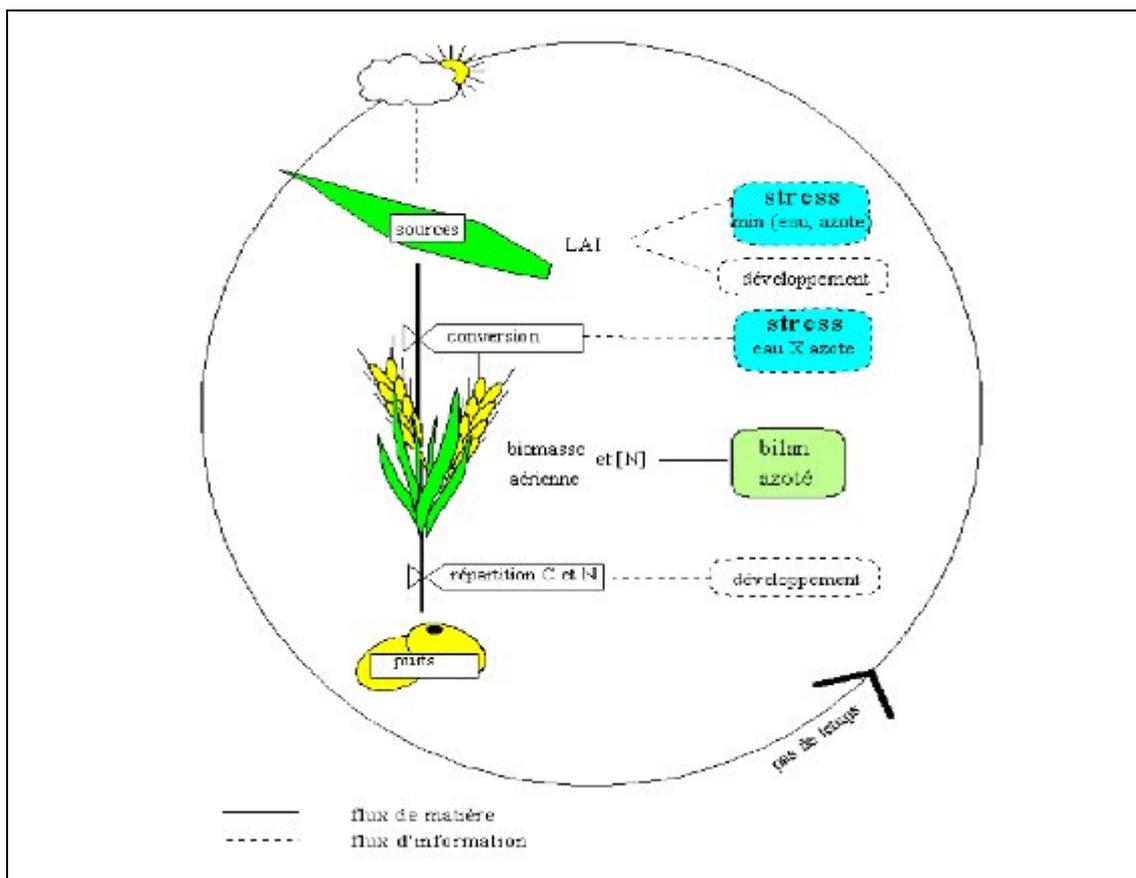


Figure. 06 - Schéma général de fonctionnement des modèles des cultures, (Brisson, 2002)

1-4- Concepts et formalismes

L'ensemble des concepts intégrés dans les modèles de culture correspond à une représentation particulière du système Sol-Plante (Pindard, 2000).

1-4-1- Le développement

Le module de développement fournit l'information la plus stratégique pour les plantes cultivées qui nous intéressent : il pilote la croissance en organisant, tout au long du cycle, l'ouverture et la fermeture des puits ainsi que leur force. Il peut également agir sur les sources, en contrôlant la mise en place de l'appareil photosynthétique et en actionnant les remobilisations vers les organes de stockage (Hadria, 2006). De plus, le module de développement est le premier concerné par la spécificité génétique, ce qui renforce son caractère stratégique (Brisson et Delecolle, 1991).

1-4-2- La croissance

Le module de croissance décrit la production et l'accumulation de biomasse dans les parties aériennes seules ou dans la plante entière (parties aériennes et racines) (Brisson *et*

al., 1997). Quels que soient les formalismes utilisés, la biomasse produite est issue de l'interception de l'énergie lumineuse au niveau des organes photosynthétiques et de la conversion de cette énergie en assimilés carbonés (Pindard, 2000).

3-4-3- L'élaboration dynamique du rendement et de la qualité

Les formalismes utilisés pour simuler le rendement et la teneur en protéines des grains, de plus en plus souvent identifiés comme une variable de sortie, sont très différents selon les modèles (Barbottin, 2004).

1-4-3-1- Elaboration du rendement

Peu de modèles simulent le rendement à partir des composantes « Nombre des grains par m² » et « Poids d'un grain ». Beaucoup proposent un formalisme permettant de simuler directement le rendement (Poids des grains récoltés) (Barbottin, 2004). Dans ce cas, l'élaboration dynamique du rendement est simulée par une évolution linéaire de l'indice de récolte en fonction du temps, soit par jour (Amir et Sinclair., 1991), soit en fonction du temps thermique (Brisson *et al.* 1998 ; Stöckle *et al.*, 2003 ; Williams *et al.*, 1989).

Suivant le degré de description des différents organes dans le modèle, le nombre des grains est estimé : soit à partir de la biomasse des épis à la floraison (Jamieson *et al.*, 1998 ; Porter, 1993 ; Weir *et al.*, 1984), soit en fonction de la vitesse de croissance de la culture dans les trente jours précédant la floraison (Asseng *et al.*, 2002 ; Brisson *et al.*, 1998 ; Ritchie et Otter, 1984), soit en fonction d'un nombre potentiel variétal et d'une fonction de l'état azoté de la culture (Jeuffroy et Bouchard, 1999 ; Jeuffroy et Recous, 1999).

1-4-3-2- Élaboration de la qualité

Dans tous les modèles, la teneur en protéines est le résultat du ratio entre la quantité d'azote et la biomasse des grains, multiplié par un coefficient constant (5,7 pour le blé destiné à l'alimentation humaine).

Dans les modèles qui sont basés sur la notion de « source-puits », la disponibilité en azote au niveau de la culture pour le remplissage des grains est calculée suivant la somme de la quantité d'azote accumulée par la plante entière après floraison et de la quantité d'azote stockée avant floraison dans les organes végétatifs et potentiellement remobilisable (Jeuffroy *et al.*, 2000).

Les formalismes simulent explicitement le départ d'azote des organes végétatifs vers les grains permettent de rendre compte de l'interaction étroite qui existe, pendant cette

partie du cycle, entre le métabolisme carboné et le métabolisme azoté de la culture. En effet, la perte en azote des organes végétatifs contribue à réduire d'une part l'indice foliaire vert, c'est-à-dire les sources d'interception du rayonnement par la culture après floraison, et d'autre part l'efficacité de conversion du rayonnement en biomasse (Jeuffroy *et al.*, 2000). Le remplissage des grains en biomasse et en azote est alors directement lié aux relations puits-sources à l'intérieur de la plante, pour les assimilés carbonés et azotés.

1-4-4- Effets des contraintes environnementales sur la culture

Les informations de type « stress » sont considérées dans le modèle comme des contraintes au fonctionnement potentiel du couvert végétal. En particulier tout ce qui concerne le fonctionnement hydrique et azoté est appréhendé dans les modèles de culture sous la forme d'indices de stress variant entre 0 et 1 qui ralentissent les divers processus de croissance (Brisson *et al.*, 1997), le calcul de la variable d'état de stress fait appel à des modules annexes, à la base de ces modules, il y a simplement une loi d'offre et de demande : si l'offre est supérieure à la demande, il n'y a pas de contrainte et l'absorption d'eau ou d'azote est pilotée par la demande ; à l'inverse, si l'offre ne peut satisfaire la demande c'est l'offre qui définit l'état de stress du couvert (Brisson *et al.*, 1998). Pour l'azote, c'est l'indice de nutrition azoté qui joue ce rôle (Lemaire *et al.*, 1997) de même, l'effet d'une contrainte hydrique est généralement pris en compte via son indice de stress (Brisson, 2002).

2- Présentation du modèle STICS

2-1- Généralités sur STICS

STICS (Simulateur mulTidisciplinaire pour les Cultures Standards) est un modèle de culture conçu par l'I.N.R.A d'Avignon, en collaboration avec des instituts techniques (AGPM, ITCF), comme un outil de simulation opérationnel en conditions agricoles (Pindard, 2000).

STICS est un modèle de fonctionnement des cultures à pas de temps journalier. Ses variables d'entrées tiennent compte du climat, du sol et du système de culture. Ses variables de sorties sont relatives à la production (quantité et qualité), à l'environnement et à l'évolution des caractéristiques du sol sous l'effet de la culture. Son principal objectif est de simuler les conséquences des variations du milieu et du système de culture sur la production d'une parcelle agricole. Il a aussi été conçu comme un outil de travail, de collaboration et de transfert des connaissances vers des domaines scientifiques connexes (Brisson *et al.*, 1998).

Les grands processus simulés sont la croissance et le développement de la culture, ainsi que les bilans hydrique et azoté. Les formalisations choisies reposent le plus souvent sur des analogies connues ou sur la simplification de formalisations plus complexes. Les fonctions utilisées ont aussi été choisies pour leur qualité générique, ce qui nous a permis de les appliquer à diverses cultures (Brisson, 2002).

2-1-1- Description du modèle

STICS simule le comportement du système sol - culture, la limite supérieure du ce système est l'atmosphère caractérisée par les variables climatiques standard (rayonnement, températures minimale et maximale, pluie, évapotranspiration de référence ou éventuellement vent et humidité) et la limite inférieure correspondant à l'interface sol/sous-sol (Garcia, 2006).

La culture est appréhendée globalement par sa biomasse aérienne et sa teneur en azote, son indice foliaire ainsi que par le nombre et la biomasse (et leur teneur en azote) des organes récoltés (Pindard, 2000).

La croissance de la culture est pilotée de façon tout à fait classique par le bilan de carbone : interception du rayonnement solaire par le feuillage puis transformation en biomasse aérienne qui est orientée vers les organes de récolte pendant la phase finale du cycle. Le bilan azoté de la culture est simulé parallèlement au bilan de carbone dont il dépend en partie. Selon le type de plante, le développement de la culture est piloté soit par un indice thermique (degrés-jours), soit par un indice photo-thermique ou vernalo-photo-thermique. Le module de développement est utilisé pour faire évoluer l'indice foliaire et définir la phase de remplissage des organes récoltés (Hadria, 2006).

2-1-2- Organisation en modules et optionalité

Le modèle STICS est organisé en modules (fig. 07), chaque module faisant appel à un certain nombre de sous-programmes (ou sous-modules) traitant de mécanismes spécifiques. Un premier ensemble de trois modules traite l'écophysiologie des parties aériennes des plantes (développement, croissance aérienne, élaboration du rendement), un second ensemble de quatre modules traite le fonctionnement du sol en interaction avec les parties souterraines des plantes (croissance racinaire, bilan hydrique, bilan azoté, transferts). A l'interface se trouve un module de gestion des interactions entre les techniques culturales et le système sol- culture, il s'agit des apports d'eau, d'engrais ou du microclimat (Brisson et *al.*, 2003).

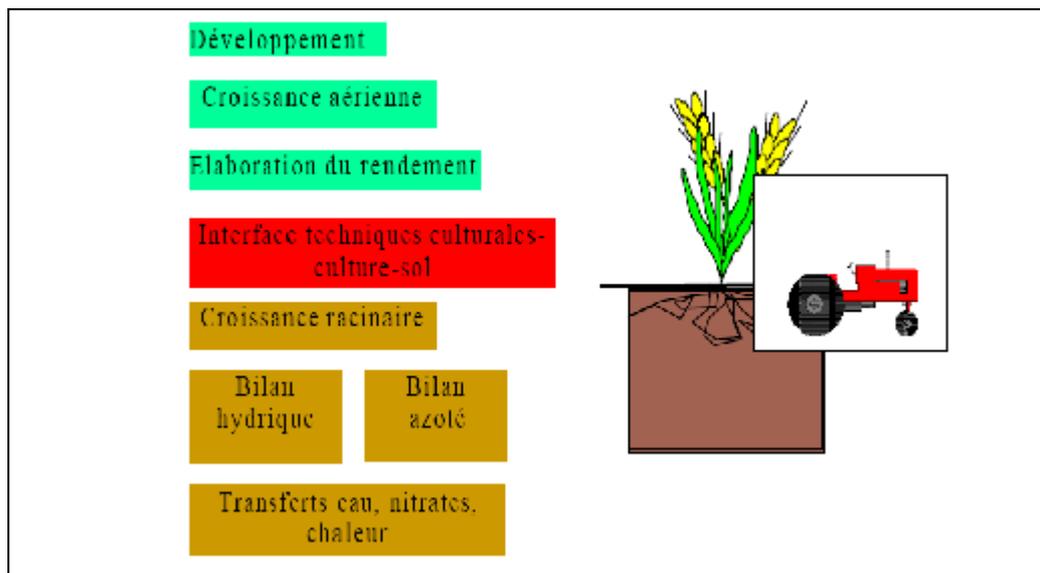


Figure. 07 - Schéma d'organisation des différents modules du modèle de culture.

Source (INRA, 2002)

2-1-3- Intérêts et limites

2-1-3-1- Intérêts

STICS est présenté comme un modèle ayant des qualités de robustesse, une facilité d'accès aux données d'entrée, une souplesse d'évolution et de facilité d'adaptation à différentes plantes (Brisson, 2002).

Originalité par rapport aux autres modèles :

- Utilisation de données d'entrée facilement disponibles (peu gourmand en données d'entrée) ;
- Travail en condition agricole (plus facilement opérationnel) ;
- Généricité : adaptable pour différentes cultures même s'il a été conçu au départ pour le blé et le maïs STICS a déjà été utilisé sur les tomates, bananiers, soja, ... sans modification de sa structure.

2-1-3-2- Limites

Absence de prise en compte de certains phénomènes :

- Volatilisation de l'ammoniac

- Effet possible de l'alimentation azotée sur le début de la sénescence de la canopée.
- Résistance à la sécheresse
- Sol asphyxiant
- Combinaison stress hydrique – stress azoté
- Prise en compte des pathologies.

2-2- Modules et formalismes du STICS

2-2-1- Développement

Différents stades de développement sont simulés principalement en fonction du temps thermique (température base 6°C : Pindard, 2000) ponctués par la levée, la montaison, la floraison, le remplissage du grain et le début de la sénescence (tab. 03).

Tableau. 03 - Stades de développement considérés par STICS (Brisson *et al*, 1997)

| Stades végétatifs | Stades reproducteurs |
|--|--|
| PLT : semis (plantes annuelles) | |
| LEV : levée | |
| AMF : accélération maximale de croissance foliaire, fin de phase juvénile | FLO : floraison |
| LAX : indice foliaire maximal, fin de croissance foliaire | DRG : début du remplissage des organes récoltés |
| SEN : début de la sénescence nette | MAT : maturité physiologique |
| LAN : indice foliaire nul | REC : récolte |

2-2-2- Croissance aérienne

L'indice foliaire suit une évolution en quatre phases dans le modèle : deux phases de croissance, une de stabilité et une de sénescence (fig. 08). Compte tenu de son importance pour le calcul du rayonnement intercepté, le modèle SITCS simule le plus finement que possible l'indice foliaire en particulier au début et fin de cycle (Hadria, 2006). Une unité de développement foliaire est définie (de 1 à la levée à 3 au maximum de l'I.F). L'effet d'une

trop forte densité est pris en compte dans le modèle par une diminution de la surface foliaire. L'interception du rayonnement global suit la loi de Béer:

$$\text{Rayonnement intercepté (MJ/m}^2\text{)} = 0,95 \times 0,5 \times \text{Rayonnement global} [1 - \exp(-\text{coef.d'extinction} \times \text{indice foliaire})].$$

L'accumulation de biomasse aérienne est en fonction du rayonnement intercepté

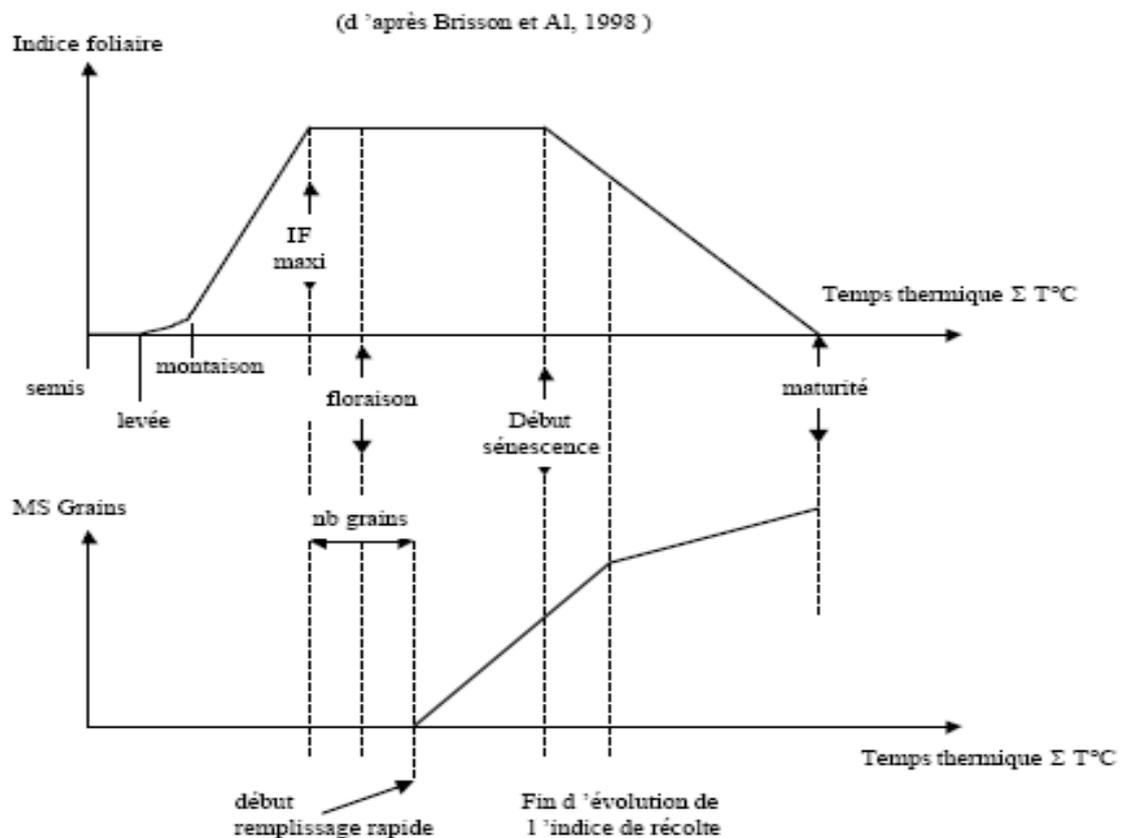


Figure. 08 - Les phases de développement de la plante dans le modèle STICS (Brisson *et al.*, 1998)

2-2-3- Elaboration du rendement

Dans le cas des plantes à croissance déterminée, on fait l'hypothèse que le nombre et le remplissage des organes de récolte n'influence pas la croissance végétative (Brisson, 2002).

Dans le STICS, le nombre d'organes récoltés est fixé pendant une phase qui précède le début du remplissage (phase de latence) et dépend de la vitesse de croissance moyenne de la culture durant cette phase. Le poids de grains croît linéairement avec la vitesse de croissance et dépend d'un paramètre génétique qui est le nombre de grains maximal (Brisson *et al.*, 2003).

La matière sèche accumulée dans les grains est calculée en appliquant un indice de récolte, qui est une fonction linéaire du temps entre les stades DRG et MAT. La masse de chaque grain est ensuite calculée comme le rapport entre le rendement et le nombre de grains (Pindard, 2000).

2-2-4- Croissance racinaire

Dans STICS, la croissance des racines n'est pas exprimée en termes de biomasse mais en longueur, indépendamment de la partie aérienne. Le rôle des racines se limite à l'alimentation hydrique et azotée (Brisson, 2002).

2-2-5- Fonctionnement hydrique

Le calcul du bilan hydrique dans le modèle STICS est relativement complet. Il est décomposé en évaporation du sol (potentielle et réelle) puis sa répartition dans le profil du sol, et en besoins en eau de la culture (Garcia *et al.*, 2004).

Le bilan hydrique est simulé par une analogie à un réservoir par couche de 1 cm d'épaisseur à partir des données hydrologiques du sol (RU, Hcc, Hpfp, Da). Il prend en compte l'évaporation du sol, l'absorption racinaire (à l'échelle de la journée elle équivaut à la transpiration foliaire) et l'infiltration d'une couche à une autre (Pindard, 2000).

Le modèle calcule les besoins en eau des cultures par un coefficient cultural maximal pour un indice foliaire de l'ordre de 5, qui permet de connaître la transpiration maximale de la culture (équivalent à l'ETM) compte tenu de l'énergie disponible au niveau des plantes et l'état de l'atmosphère dans la végétation. Quand il y a apport d'eau (pluie ou irrigation), STICS calcule les quantités d'eau arrivant au sol, après interception d'une partie de l'eau par le feuillage (Brisson *et al.*, 2005)

L'eau qui persiste sur le feuillage est soumise à la demande évaporative de l'atmosphère et s'évapore dans le modèle comme une nappe d'eau libre (Brisson, 2002). A la surface du sol, l'eau apportée résulte de la pluie et de l'irrigation affectée d'un paramètre d'efficacité (prise en compte des pertes d'eau à l'irrigation). Quand l'offre en eau est inférieure à la demande, le rapport permet de calculer des indices de stress qui jouent sur la croissance de la plante :

*indices de stress de turgescence « TURFAC » ; représentant la diminution de pression hydrique des cellules qui limitent la croissance foliaire.

*indices de stress stomatique « SWFAC » (EP/EOP ; transpiration réelle / transpiration maximale) : il simule la fermeture des stomates et donc ralentit l'accumulation de la matière sèche (Garcia, 2006).

2-2-6- Fonctionnement azoté

Sur le même principe que le module de fonctionnement hydrique, le module de fonctionnement azoté utilise le concept de facteur limitant et compare chaque jour l'offre du sol et la demande de la culture (Brisson et Delecolle, 1991).

L'absorption journalière est égale au plus petit de ces deux termes. La demande de la plante obéit au concept de courbe maximale de dilution de l'azote tandis que l'offre du sol est déterminée par le transfert du nitrate du sol vers la racine puis l'absorption active par la racine (Hadria, 2006). Les différents indices de stress azoté sont calculés à partir de la courbe critique de dilution (fig. 09) et jouent sur la croissance foliaire et la croissance en biomasse

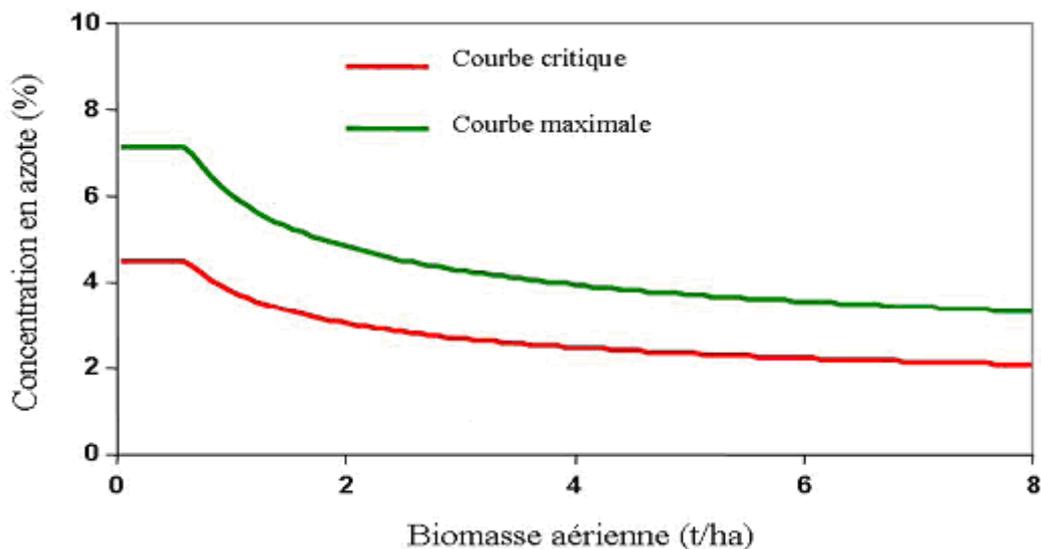


Figure. 09 - Courbes de dilution de l'azote (adaptée par Lemaire *et al.*, 1997)

Chapitre III- Aperçu général sur le blé dur

1- Présentation de la culture du blé

Les céréales jouent un rôle non négligeable dans l'histoire de l'humanité (CIC, 2000) ; de ce fait, la céréaliculture constitue l'une des premières activités agricoles (Mazoyer, 2002) qui a revêtu et revêt encore aujourd'hui une grande importance économique (Durutin, 1990). Le blé est l'une des premières espèces céréalières cueillies et cultivées par l'homme (Lev-Yadun *et al.*, 2000) entre 7.000 et 10.000 ans, dans le croissant fertile, zones couvrant la Palestine, Syrie, l'Irak et une grande partie de l'Iran (Bonjean, 2001).

Le blé dur est cultivé exclusivement pour sa semoule (Mazoyer, 2002) et pour la fabrication de pâtes alimentaires (Morancho, 2000). Son importance économique est considérable, tant pour les pays exportateurs que pour les pays importateurs qui cherchent l'autosuffisance alimentaire (Lebonvallet, 2002).

1-1- Aperçu général sur les céréales

1-1-1- Dans le monde

Les céréales sont produites pour la consommation humaine (41 %), l'alimentation du bétail (45 %) et pour d'autres utilisations, notamment dans l'industrie (FAO, 2004). Selon la CIC (2007), la production et la consommation de céréales ont explosé depuis les trois dernières décennies, parallèlement à l'augmentation de la population mondiale.

Dans le monde, les blés et le riz sont, sans doute les plus importants en termes de superficies consacrées à leur production avec 51 % de la superficie annuelle allouée aux céréales principales (FAO, 1997). Le blé dur occupe, mondialement, la cinquième place après le blé tendre, le riz, le maïs et l'orge avec une production de plus de 554 millions de tonnes en 2004 (CIC, 200).

1-1-2- En Algérie

La surface agricole totale (SAT) est de 40,6 millions d'hectares, représentant 17 % de la surface totale du pays (STP). La surface agricole utile (SAU) est de 8,458 millions d'hectares, représentant 20,8 % de la SAT et à peine 3,54 % de STP (ANDI, 2008).

Selon le Ministère de l'Agriculture (au dernier recensement de 2008), l'utilisation de la SAU est répartie en :

- Grandes cultures: 50,45 % de la SAU.
- Jachère: 39 %.

- Arboriculture: 6,39 %.
- Cultures maraîchères et industrielles: 3,24 %.
- Prairies naturelles: 0,31 %.

La consommation des produits céréaliers se situe à un niveau d'environ 205 kg /hab/an (Chehat, 2007). En relations avec le marché mondial, les produits céréaliers représentent plus de 40 % de la valeur des importations des produits alimentaires, où elles occupent le premier rang (39,22 %), devant les produits laitiers (20,6 %), le sucre et sucreries (10 %) et les huiles et corps gras (10 %). Selon Hamadeche et Kouider (2004), le blé dur est la première céréale importée, soit 34 millions de quintaux (moyenne annuelle 1999-2004) suivi par le blé tendre avec 16 millions de quintaux.

1-1-3- A Chlef

La région de Chlef occupe une superficie globale de 4 791 km². Elle est caractérisée par une vocation agricole du fait qu'elle est située sur la plaine du moyen Cheliff. La surface agricole totale est de 65,43 % de la superficie totale de la wilaya (STW) dont la surface agricole utile (SAU) est de l'ordre de 203.230 ha chaque année soit de 77 % de la superficie des terres agricoles (ANDI, 2008). Par ailleurs celle réservée aux céréales est de l'ordre de 85.947,50 ha (soit 42.29 % de SAU) répartie comme suit : blé dur : 46126.5 ha, orge : 19900 ha, blé tendre : 18561 ha, et avoine : 1360 ha (fig.10). Ces données sont collectées auprès des services agricoles de la wilaya de Chlef (DSA, 2008).

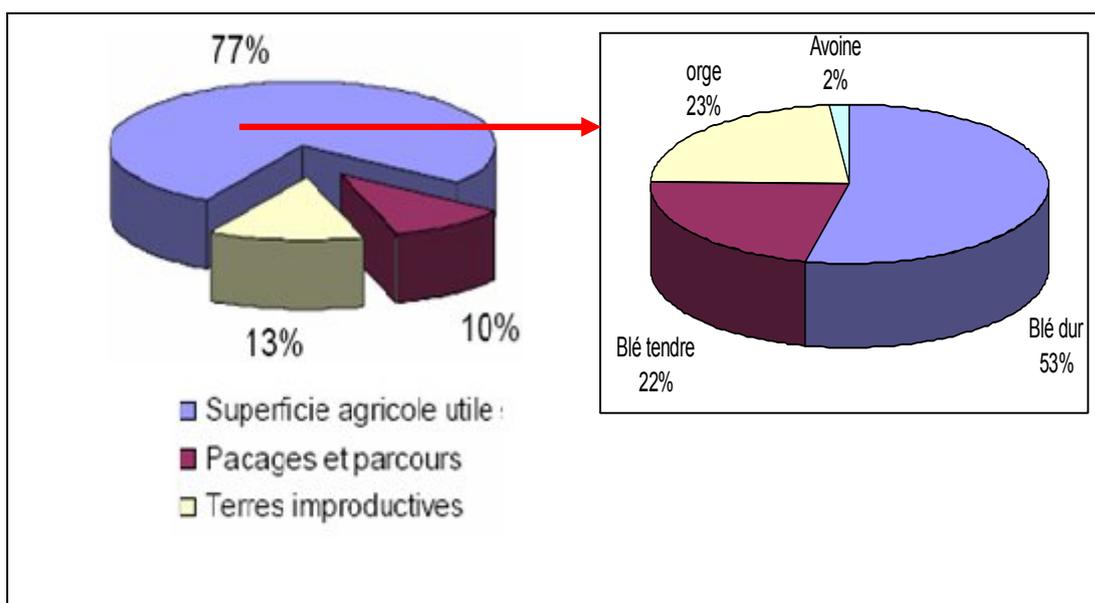


Figure. 10 - Répartition des terres agricoles de la Wilaya de Chlef (DSA, 2008)

1-1-3-1- L'état de la production du blé dans la région d'étude

La production du blé dur dans la Wilaya de Chlef a connu une diminution notable durant la première décennie (1985 à 1994), ce qui est principalement dû à la sécheresse qui a atteint le nord de la Wilaya dont le rendement moyen a atteint 2.9 quintaux/ha en 1994. En revanche, on remarque durant la dernière décennie une amélioration progressive du rendement qui atteint un pic de 16 quintaux/ha en 1996 et de 18 quintaux/ha en 2002 (fig. 11). D'après la direction d'agriculture de la wilaya de Chlef, cette évolution est due aux Programmes Nationaux du Développement Rural (PNDR) mis en place pour le développement et l'amélioration de la production agricole en vue d'améliorer le niveau de la sécurité alimentaire du pays.

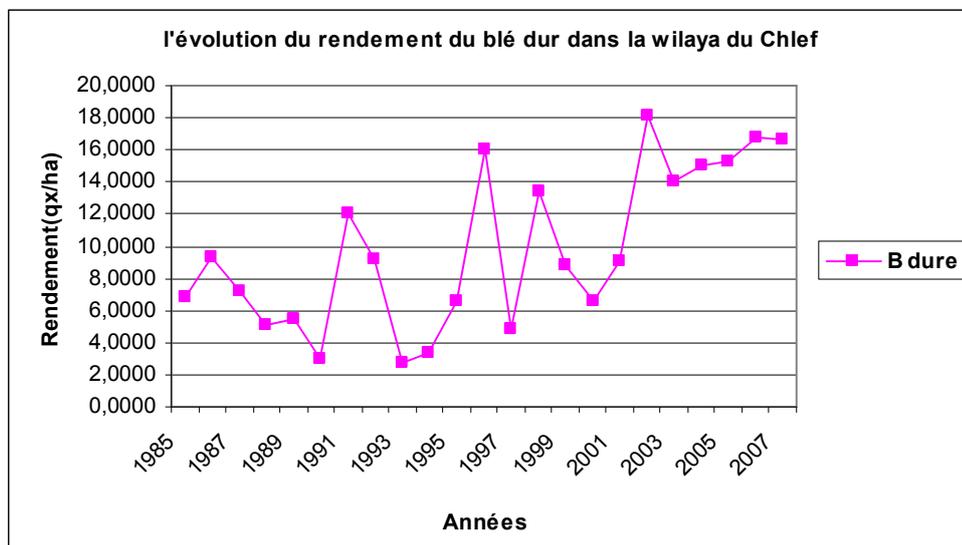


Figure. 11 - Evolution de rendement du blé dur dans la wilaya de Chlef

1-2- Les contraintes de la céréaliculture en Algérie

Les grandes cultures sont essentiellement conduites sous régime pluvial, notamment les céréales occupant principalement la zone semi-aride (Feliachi, 2000). En fait, le climat de l'Algérie se caractérise par l'insuffisance des précipitations et leur irrégularité dans l'espace et dans le temps et aussi par des pluies torrentielles ou des averses de forte intensité qui sont très fréquentes en automne au moment où la couverture végétale est faible (Zaghouane *et al.*, 2006).

Selon Rachedi (2003), les principales contraintes au développement des céréales sont :

- Contraintes du milieu : Adversité climatique fréquente (pluviométrie irrégulière, gelées, grêles, sirocco,...) ;

- Contraintes techniques : Travail du sol sommaire, faible utilisation de la semence de qualité, faible taux d'utilisation des engrais et mauvaise application des techniques culturales ;

- Contraintes de structures : Avec 60 % des superficies situées sur des terres peu productives et le morcellement d'une partie des terres (moins de 10 ha), les efforts d'intensification et de mécanisation deviennent très difficiles.

2- Généralité sur le blé dur

2-1 Origine du blé dur

Selon Belaid (1996), le blé est issu d'une plante sauvage du genre *Triticum* dont la cellule (chromosomes) est diploïde, tétraploïde et hexaploïde.

Les variétés diploïdes sont les plus répandues sous le nom de *Triticum monococum* et le blé dur est le résultat d'un croisement spontané entre le *Triticum monococum* sauvage et *Aegilops speltaoides* (Gallais et Bannerot ,1992).

2-2- Croissance et développement du blé dur

Plusieurs auteurs ont décrit le cycle de développement du blé, en le décomposant en trois périodes; végétatif, reproductrice et maturation :

2-2-1- Période végétative

Caractérisée par une germination (fig.12-1) qui se traduit par la sortie des racines séminales, puis la levée (fig.12-2), notée lorsque 50% des plantes sont sorties de la terre, jusqu'à la fin du tallage (fig.12-4) marqué par l'apparition de l'extrémité de la première feuille de la talle latérale première puis d'autres talles naissant successivement à l'assailles des 2^{ème} et 3^{ème} feuilles de la tige centrale (Bouzarzour et Oudina, 1989) ; l'ensemble formant un plateau de tallage situé juste au niveau du sol ; ces talles primaires peuvent émettre des talles secondaires qui, à leur tour, émettent des talles tertiaires (Zeghida *et al.*, 2006).

2-2-2- Période reproductrice

Caractérisée par la montaison qui se manifeste, à partir du stade épi à 1 cm, par l'élongation du premier entre-nœud. Selon Baldy (1984), cette phase s'achève une fois l'épi prend sa forme définitive à l'intérieur de la gaine (stade de gonflement).

L'épiaison se détermine par l'apparition de l'épi hors de la gaine de la dernière feuille. Les épis dégainés fleurissent (fig. 12-9) généralement à partir du 4^{ème} et jusqu'au 8 jours après l'épiaison, c'est la floraison (Bahlouli *et al.*, 2005).

2-2-3- Période de maturation des grains

C'est la dernière phase dans le cycle végétatif ; elle exige la chaleur et un temps sec ; elle se fera sitôt en plusieurs étapes, (1) la maturité laiteuse (le grain contient encore 50% d'humidité et le stockage des protéines touche à sa fin), (2) la maturité jaune (le grain a perdu en humidité et l'amidon a été constitué) et (3) la maturité complète (la teneur en humidité atteint environ 20 %) ; le grain est alors mûr et prêt à être récolté (fig. 12-12), c'est la période des moissons. (Boufenar *et al.*, 2006).

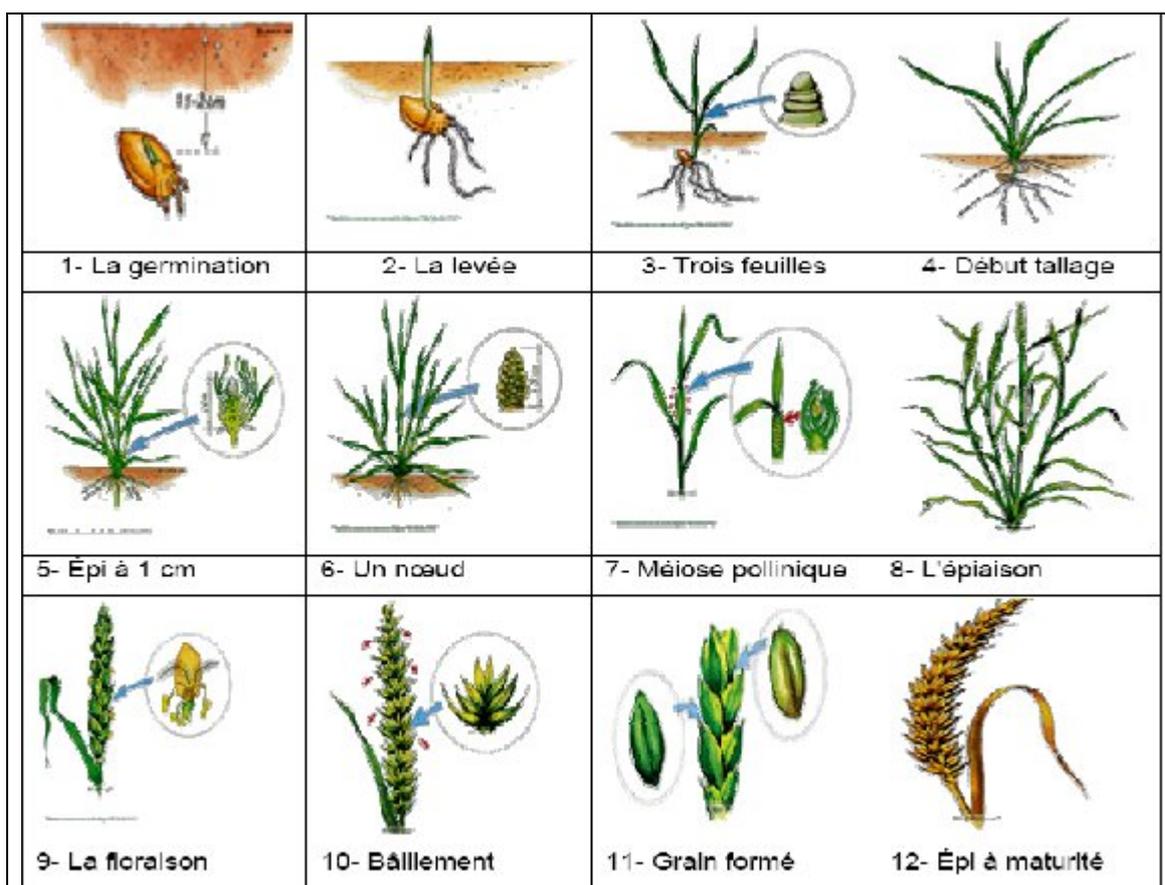


Figure. 12 - Les différents stades de développement du blé dur : In (Zaaboubi, 2007)

Chapitre IV- Présentation de la zone d'étude

1- Présentation générale de la zone d'étude

1-1- Situation géographique

La wilaya de Chlef est située au Nord-Ouest de l'Algérie. Elle est située à 200 km à l'Ouest d'Alger, au cœur de la vallée du Chélif où elle occupe une place stratégique par sa situation géographique. La Méditerranée baigne sa frange septentrionale sur une distance de plus de 120 kilomètres. Au Sud, les piémonts qui constituent les premiers contreforts de l'Ouarsenis, la séparent de la wilaya de Tissemsilt. A l'Est, elle jouxte la wilaya de Tipaza au Nord et la wilaya d'Ain Defla au Sud. A l'Ouest, elle est limitée par le territoire de la wilaya de Mostaganem au Nord et par celui de la wilaya de Relizane au Sud (fig. 13).



Figure. 13 - Localisation de la région d'étude (ANDI, 2008)

Les coordonnées Lambert de la région sont : Latitude : 36.21° ; Longitude : 1.33° ; Altitude : 143m

1-2- Le relief

On y trouve deux types de régions : les régions montagneuses au Nord et au Sud et les plaines de la vallée du Cheliff au centre.

Le Dahra, se pâtre de montagnes qui couvre la partie Nord de la wilaya (fig. 14), en lui donnant des caractères majeurs : pays rude et difficile d'accès et cela, malgré des altitudes relativement faibles. En effet, le Dahra, morceau septentrional de la chaîne de l'Atlas Tellien, déploie entre la mer et le Cheliff, des bombements dépassant rarement 500 mètres et dominés très exceptionnellement par des croupes dénudées de 1 000 mètres. Excepté Djebel Bissa, aucun point n'atteint les 1 100 mètres dans la wilaya de chlef (ABH. Cheliff Zahrez, 2003).

Au Sud de la wilaya, se dressent, en rangs dispersés, les collines qui constituent les piémonts de l'imposant massif de l'Ouarsenis. Ces convexités qui ferment le Sud de la wilaya ne sont pas très étendues (5 à 10 kilomètres de large). Les monts du Dahra et ceux de l'Ouarsenis isolent la dépression de l'Oued Cheliff, partie centrale de la wilaya. Cette plaine intérieure, aux reliefs accidentés, est drainée par l'Oued Cheliff et ses affluents. Les collines représentent une altitude moyenne de 500 à 700 m ; les plaines sont en moyenne de 200 m d'altitude (ABH. Cheliff Zahrez, 2003).

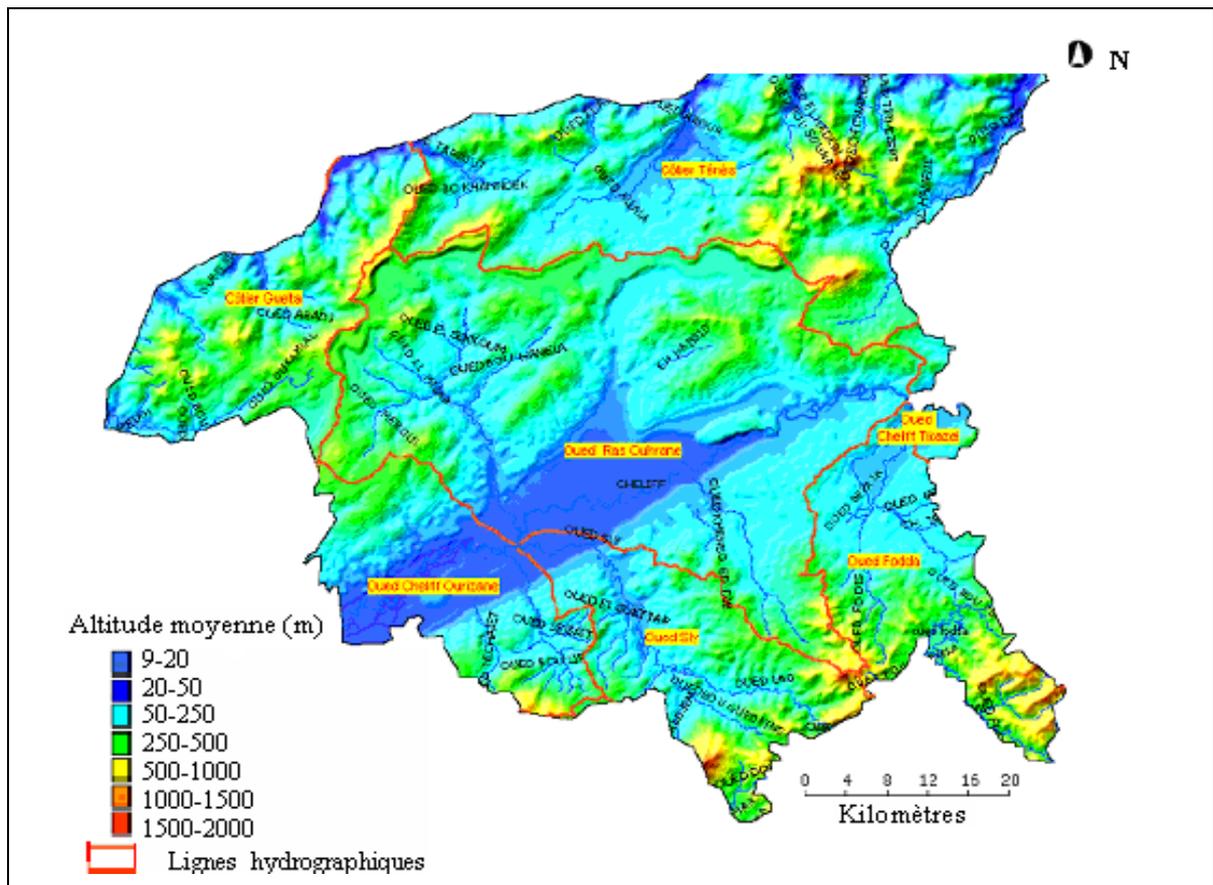


Figure. 14 - Relief de la wilaya de Chlef (ABH. Cheliff Zahrez, 2003)

1-3- Le sol

La région de Chlef se caractérise par une assez grande homogénéité topographique à aptitude culturale importante : les sols sont formés par des alluvions récentes profondes, calcaires à prédominance argileuse (ABH. Cheliff Zahrez, 2003). Le type du sol pris dans ce travail est argilo- limoneux caractérisant la région de Ouled fares.

1-3-1- L'analyse physique du sol

L'analyse physique consiste principalement à la détermination de la granulométrie et la densité apparente. Ces données sont regroupées dans le tableau 04.

On se referant au triangle texturale, nous pouvons dire que le sol est de texture argilo- limoneuse (Bouthiba, 2003), avec une densité apparente de 1.34 g/cm³.

Tableau. 04 - Propriétés physiques du sol (Bouthiba, 2003)

| Granulométrie du sol | Teneur |
|-----------------------------|------------------------|
| Argile | 33.79 % |
| Limon fin | 12.94 % |
| Limon grossier | 26.43 % |
| Sable | 15.57 % |
| Sable grossier | 9.25 % |
| Densité apparente | 1.34 g/cm ³ |

1-3-2- L'analyse chimique du sol

L'analyse chimique consiste à mesurer certains paramètres qui nous renseignent sur l'état chimique du sol.

L'analyse montre que le PH du sol est alcalin (tab. 05), ce qui est expliqué par la présence d'une forte teneur en calcaire, 28,56 % en moyenne.

La couche superficielle du sol est riche en matière organique qui accuse une nette diminution en profondeur ; elle passe de 4.36 % en surface à 1.69 % en profondeur (Bouthiba, 2003).

Le rapport C/N est de l'ordre de 12.23 % en moyenne, avec une valeur de 16.89 % en couche superficielle qui diminue rapidement en profondeur jusqu'à atteindre la valeur de 8.75 %. Cette diminution explique la bonne décomposition de la matière organique qui se

traduit par la présence d'un taux de calcaire important ainsi qu'une assez rapide minéralisation de la matière organique (Bouthiba, 2003).

Tableau. 05- Propriétés chimiques du sol (Bouthiba, 2003)

| Paramètres chimiques | Teneur |
|-----------------------------|---------------|
| PH | 8.09 |
| Azote total | 0.124 |
| Calcaire total | 28.56 |
| Carbone | 1.58 |
| Matière organique | 3.01 |
| Le rapport C/N | 12.23 |
| CE ds/Cm | 2.9 |

1-4- Végétation

La plaine du moyen Cheliff est constituée essentiellement de zones cultivées, en cultures maraîchères, les agrumes étant la principale culture, on y retrouve quelques jachères.

Les bassins, rive droite à couverture herbacée très importante, présentent des zones cultivées n'excédant pas 30 %, marqués par des pentes non négligeables et une pluviométrie relativement importante. Les bassins de la rive gauche présentent une couverture forestière plus ou moins dégradée de l'ordre de 40 à 45 % notamment au niveau des bassins de Oued Sly et de Oued Fodda (ABH. Cheliff Zahrez, 2003).

Le Nord de la wilaya, dont la partie côtière est caractérisée par la prédominance de la vigne de table. Toutefois, de nos jours, ce type de culture s'est rétréci et a laissé place aux cultures maraîchères avec l'avènement des serres. Les maquis sont d'une importance relative dans cette zone. Quant au Sud de la wilaya, il est dominé essentiellement par les forêts qui font partie du massif de Ouarsenis (ABH. Cheliff Zahrez, 2003).

2- Climat

La précipitation, la température, la vitesse du vent, la durée d'insolation,... sont des facteurs climatiques qui jouent un rôle déterminant dans le développement des cultures et l'estimation du potentiel de leur rendement (Bouazza *et al.*, 2002). Ces paramètres sont facilement mesurables par les stations météorologiques équipées de l'ensemble des instruments de mesures.

L'analyse climatique est basée sur les données de la station météorologique de l'ONM de Chlef pour la période qui s'étale de 1978 à 2007 pour les précipitations et la température ; la période s'étalant de 1981 à 2000 est considérée pour la durée d'insolation et la vitesse du vent.

2-1- Précipitations

La région de Chlef est caractérisée par un régime pluviométrique très irrégulier dans l'espace et dans le temps (ANDI, 2008)

2-1-1- Répartition annuelle des précipitations

D'après l'histogramme ci-dessous ; on remarque que la pluviosité est marquée par une grande variabilité, les années les plus pluvieuses sont celles de 1978 ,1979 et 1996 avec un cumul annuel de 559.5 mm ,559.2 mm et de 491.8 mm respectivement. L'année la plus sèche est 1994 avec un cumul annuel de 165 mm, tandis que le module pluviométrique interannuel est égal à 334.55 mm (fig.15).

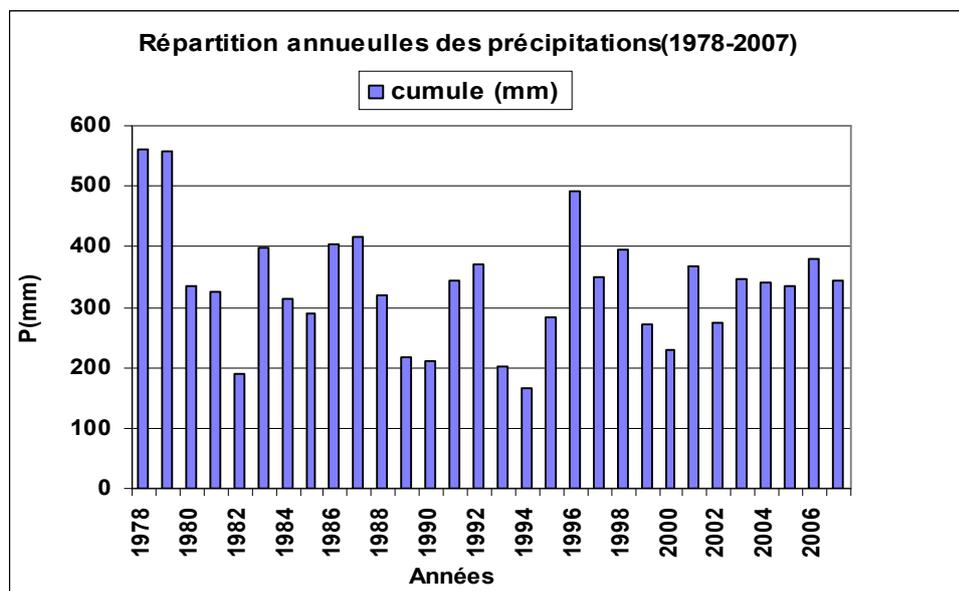


Figure. 15 - Répartition des précipitations moyennes annuelles (1978-2007)

2-1-2- Répartition mensuelle des précipitations

La pluviosité mensuelle est nettement variable, la distribution des précipitations mensuelles est irrégulière sur toute l'année (fig.16).

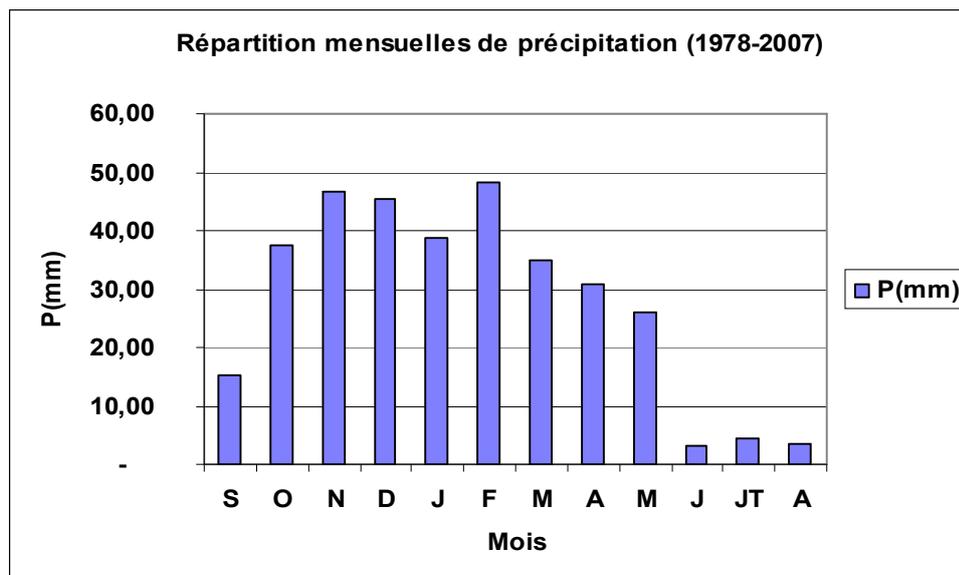


Figure. 16 - Répartition mensuelle des précipitations (1978-2007).

2-1-3- Répartition saisonnière des précipitations

La pluviométrie dans la zone d'étude est caractérisée par un déséquilibre saisonnier en effet :

- La période d'automne : représente 29.37 % des précipitations annuelles avec un maximum au mois de novembre qui atteint les 46,54 mm
- La période d'hiver : a une grande différence inter -saisonnière (fig.17). La majorité des pluies qui tombent sont sous forme d'averses et représente environ 40 % du total annuel, le mois de février apparaît le plus pluvieux dont la moyenne mensuelle atteint les 48.25 mm.
- La période de printemps : les pluies représentent 27.87 % du total annuel avec une grande moyenne mensuelle de 34.8 mm au mois de mars.
- Et enfin la période d'été : les pluies reçues ne dépassent guère les 3.21 % de la pluviométrie annuelle avec un minimum enregistré au mois de juillet (3.20 mm) : figure ci dessous.

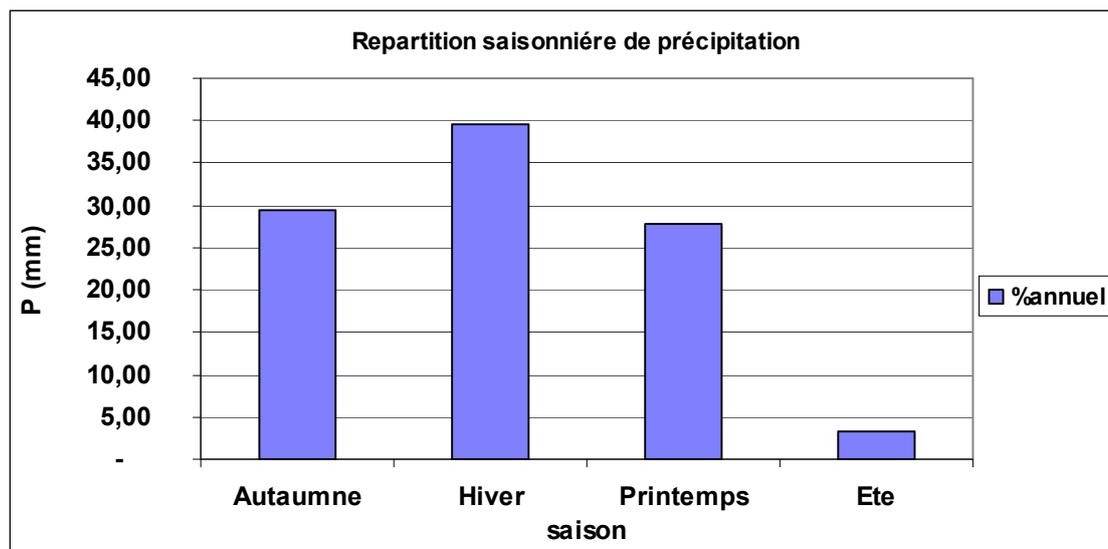


Figure. 17 - Répartition saisonnière des précipitations (1978-2007)

2-1-4- Quotient pluviométrique d'Emberger

Il permet de connaître l'étage bioclimatique d'une région. En abscisse la moyenne des minima du mois le plus froid, et en ordonnées le quotient pluviométrique (Q_2) d'Emberger

$$Q_2 = 1000 P / (M + m) / 2 (M - m)$$

Où :

P : Moyenne des précipitations annuelles en mm ($P = 334.35$ mm.)

M : Moyenne des maxima du mois le plus chaud en °K ($M = 38$ °C = 311.2 °K.)

m : Moyenne des minima du mois le plus froid en ° K ($t^{\circ}k = t^{\circ}c + 273.2$) ($m = 5.5$ °C = 278.7°K)

Soit un Quotient pluviométrique d'Emberger égal à 34.8, où la région de Chlef se situe dans l'étage bioclimatique aride à hiver doux avec un $Q_2 = 34.8$ (fig.18).

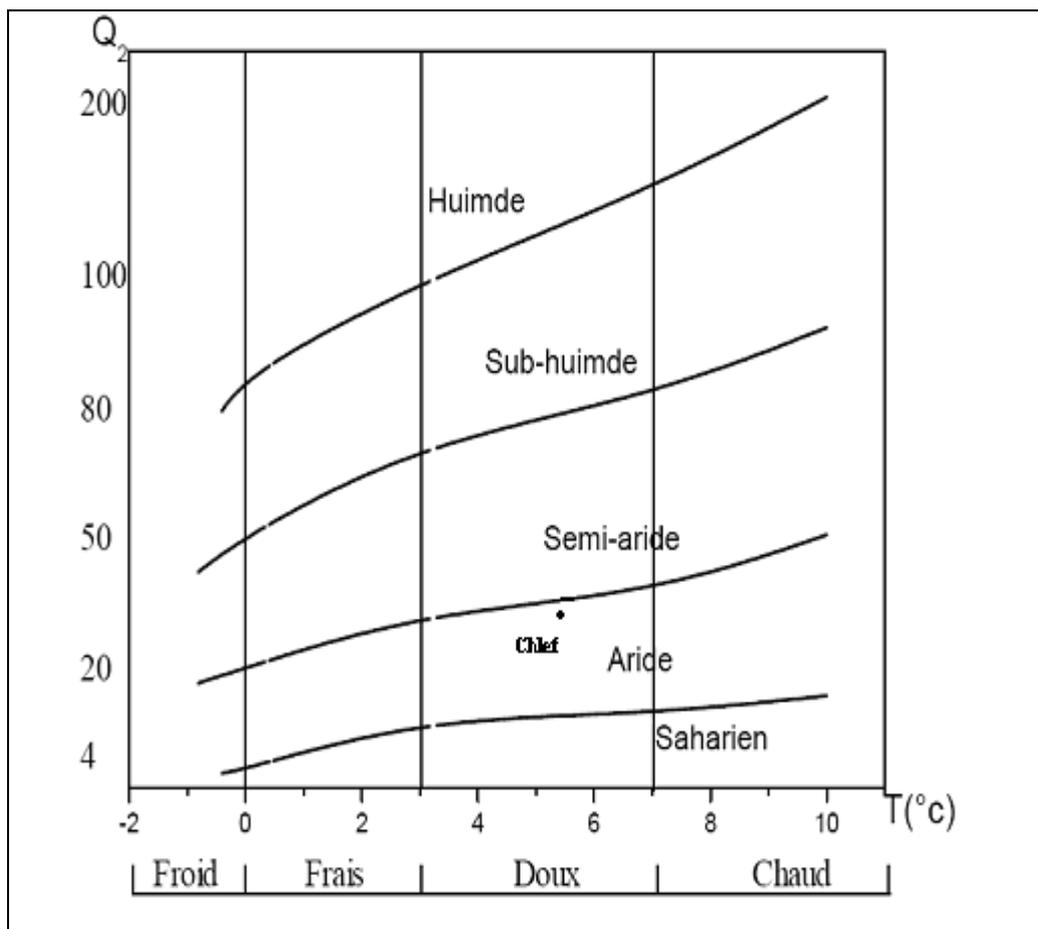


Figure. 18 - Climagramme d'Emberger de la région de Chlef

2-2- La température

La température est un facteur très important en interaction avec les autres facteurs météorologiques tels que la précipitation, l'humidité et l'évapotranspiration, qui interviennent dans tous les stades de développement de la culture du blé. L'augmentation de la température entraîne une augmentation des besoins en eau d'une culture, et elle gêne souvent les capacités photosynthétiques des cultures qui affectent les rendements.

Les températures moyennes mensuelles, entre novembre et avril, sont inférieures à la moyenne annuelle qui est de 19,7°C par contre supérieur à celle-ci en mois de mai à octobre. (tab. 06).

Le tableau ci dessous, résume les moyennes mensuelles des températures minimales, moyennes et maximales pour la période (1978 – 2007)

Tableau. 06 - Variation des températures moyennes mensuelles (1978-2007)

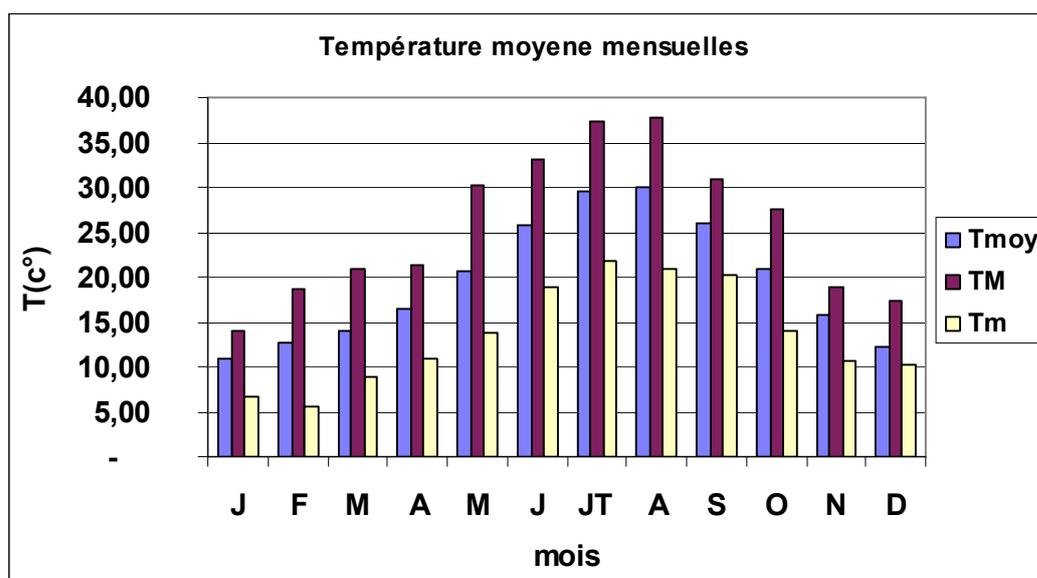
| mois | J | F | M | A | M | J | JT | A | S | O | N | D |
|-----------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| M + m / 2 | 10.8 | 12.63 | 14.1 | 16.34 | 20.65 | 25.81 | 29.51 | 29.99 | 25.9 | 22.4 | 16.9 | 12.32 |
| M | 14 | 18.67 | 21 | 21.33 | 30.25 | 33.2 | 37.24 | 38 | 31 | 27.6 | 19 | 17.29 |
| m | 6.6 | 5.5 | 9 | 11 | 13.83 | 19 | 21.77 | 21 | 20.25 | 14 | 10.63 | 10.2 |
| A | 7.4 | 13.17 | 12 | 10.33 | 16.42 | 14.2 | 15.47 | 17 | 10.75 | 13.6 | 8.37 | 7.09 |

M : Température moyenne maximale (°C)

m : Température moyenne minimale (°C).

M + m / 2 : Température moyenne (°C).

A : Amplitude thermique $A = M - m$

**Figure. 19** - Histogramme de variations des températures moyennes mensuelles (1978-2007).

La figure 19, montre que les maxima d'été atteignent les 38°C au mois d'août. Par ailleurs, les minima d'hiver sont de l'ordre de 5.5 au mois de février. Il en résulte, que l'amplitude thermique est grande et non constante au cours de l'année, elle varie entre 7,09°C en décembre et 17°C en août, divisant ainsi l'année en deux saisons : une froide et une autre chaude.

2-3- Diagramme Ombrothermique de Gausсен (1957)

Le diagramme ombrothermique de Gausсен permet de calculer la durée de la saison sèche. Il tient compte de la pluviosité moyenne mensuelle et la température moyenne mensuelle qui sont portées sur des axes où l'échelle de la pluviosité est double de la température.

Les variations annuelles des moyennes mensuelles des températures et des précipitations permettent de distinguer deux périodes : une période humide et froide, et une autre sèche et chaude (fig.20). On prend en considération qu'un mois est sec si les précipitations (mm) sont inférieures au double de la température moyenne exprimée en degré centigrade ($P \leq 2 T$).

- **Période pluvieuse (humide)** : Elle s'étend sur une période de cinq mois et vingt jours d'environ, elle commence de la mi- d'octobre jusqu'à la fin d'avril ; elle représente 63.7% des précipitations annuelles, avec une température minimale durant le mois de janvier (10.8°C) et un maximum pendant le mois de novembre (16.9 °C) (fig. 20).

- **Période sèche** : Elle s'étend sur une période de six mois et dix jours, du mois d'avril jusqu'au début de mois d'octobre, cette période représente 36.17 % des précipitations annuelles. La température varie entre un maximum au mois d'août (30°C) et un minimum de 16.34 °C au mois d'avril (fig. 20).

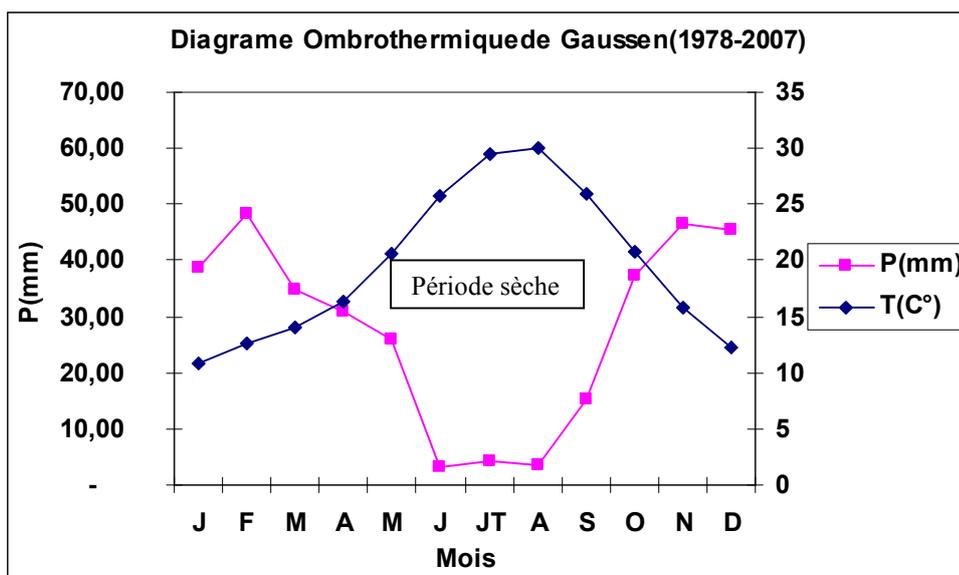


Figure.20 - Diagramme Ombrothermique de Gausсен (1978-2007)

2-4- Le vent

Le vent a un rôle important à l'échelle microclimatique car il influe sur d'autres paramètres telles que la température, l'humidité de l'air et l'évapotranspiration.

Dans notre région d'étude, les vents dominants sont des vents ouest. Durant la période estivale, la région reçoit des vents sud à caractères secs et chauds, c'est le sirocco qui souffle en été et accélère l'évapotranspiration.

La figure ci-dessous expose les valeurs moyennes mensuelles de la vitesse du vent sur une période de 20 ans. L'analyse de ces valeurs montre que la vitesse moyenne du vent enregistrée au cours de ces deux décennies est de 2.4 m/s, soit 3 m/s en mois de juillet et 1,9 m/s en mois de janvier. Ces valeurs montrent que notre région d'étude présente des vents faibles ou modérés n'ayant aucune incidence sur le développement de la culture.

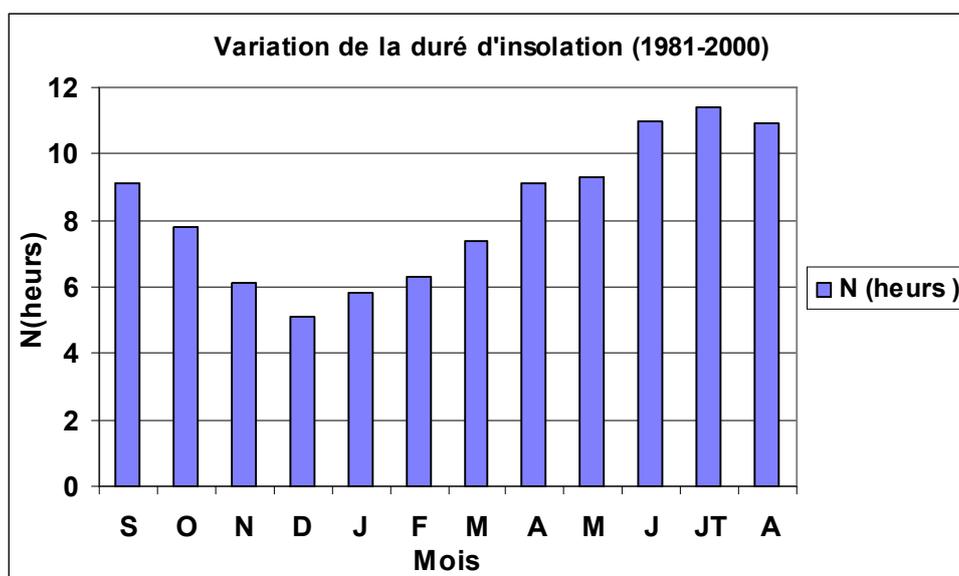


Figure.21 - Variation de la vitesse moyenne du vent en m/s (1981-2000).

2-5- L'insolation

C'est la durée pendant laquelle le rayonnement solaire a réellement touché le sol; elle dépend de l'état de l'atmosphère, de la couverture nuageuse du lieu et des obstacles physiques existants au tour du site de mesure (Baldy, 1981).

La région de Chlef est une région très ensoleillée; l'insolation atteint son maximum en période estivale.

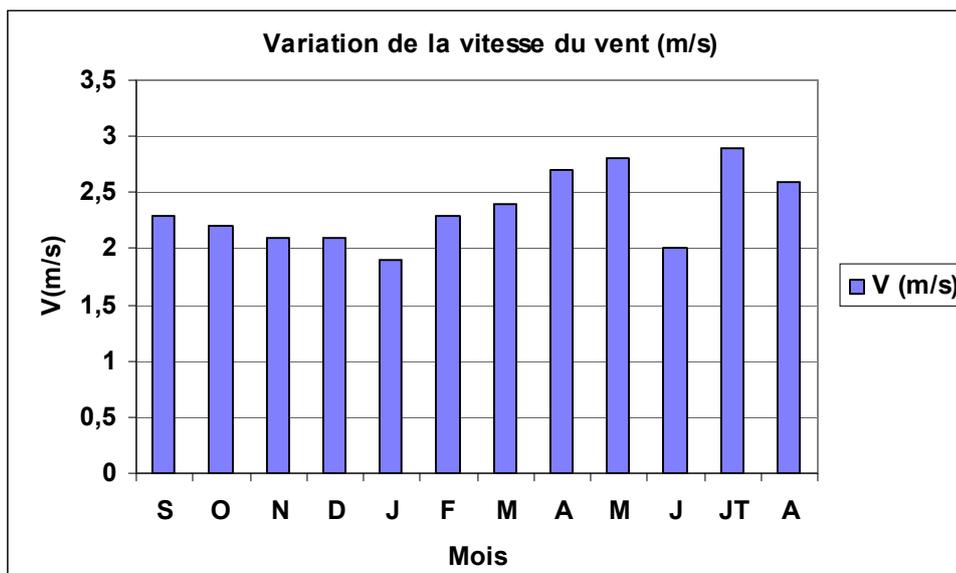


Figure. 22 - Durée moyenne d'insolation (en heures), période 1981-2001

La figure 22, montre que la durée moyenne maximale d'insolation enregistrée est de 11,4 heures en mois de juillet, la durée minimale étant observée en décembre (5.1 heures).

En conclusion, la wilaya de Chlef est une zone au climat méditerranéen, climat relativement froid en hiver et chaud en été. L'analyse des différents diagrammes permet de visualiser une période pluvieuse qui s'étend généralement de la mi d'octobre à la fin d'avril et une période sèche pour le reste de l'année. Toutefois les mois de juin, juillet et août demeurent les mois les plus secs pour la région de Chlef. Par conséquent, notre région ne reçoit qu'une faible quantité de précipitation avec un module annuel de l'ordre de 334 mm en moyenne, ce qui permet de la classer dans l'étage climatique aride avec un $Q_2 = 34.8$ selon le diagramme d'Emberger (1955).

Chapitre V- Méthodologie et formalismes

1- Méthodologie d'analyses d'impacts du changement climatique

Il s'agit d'une estimation de la variabilité du rendement à long terme, à partir des séries des sorties du modèle atmosphérique de circulation générale GCM couplée avec un modèle de générateur du climat à l'échelle locale LARS-WG et au modèle de simulation des cultures STICS.

Dans un premier temps nous avons décrit la méthode d'application des sorties du modèle GCM après la réduction de leur échelle à partir d'un générateur stochastique du climat LARS-WG.

Dans un second temps, et après la préparation des entrées du modèle STICS sous un format spécifique, nous avons mis en place le protocole de simulation. Une «structure de base » a été décrite relatant la situation correspondante aux techniques culturales du blé dur couramment utilisées par les agriculteurs de la région et ce afin de discerner la variabilité du rendement dans le futur. Cette analyse nous a permis d'observer et comparer le rendement simulé à ce lui observé sans modification des techniques actuelles (fig. 23).

Ensuite, nous avons cherché les pratiques culturales qui pourraient donner de meilleurs résultats dans le futur "nouvelle structure". En effet, nous avons intégré toutes les possibilités des techniques permettant d'explorer les stratégies d'adaptation qui devront être envisagées dans la région en réponse au changement climatique.

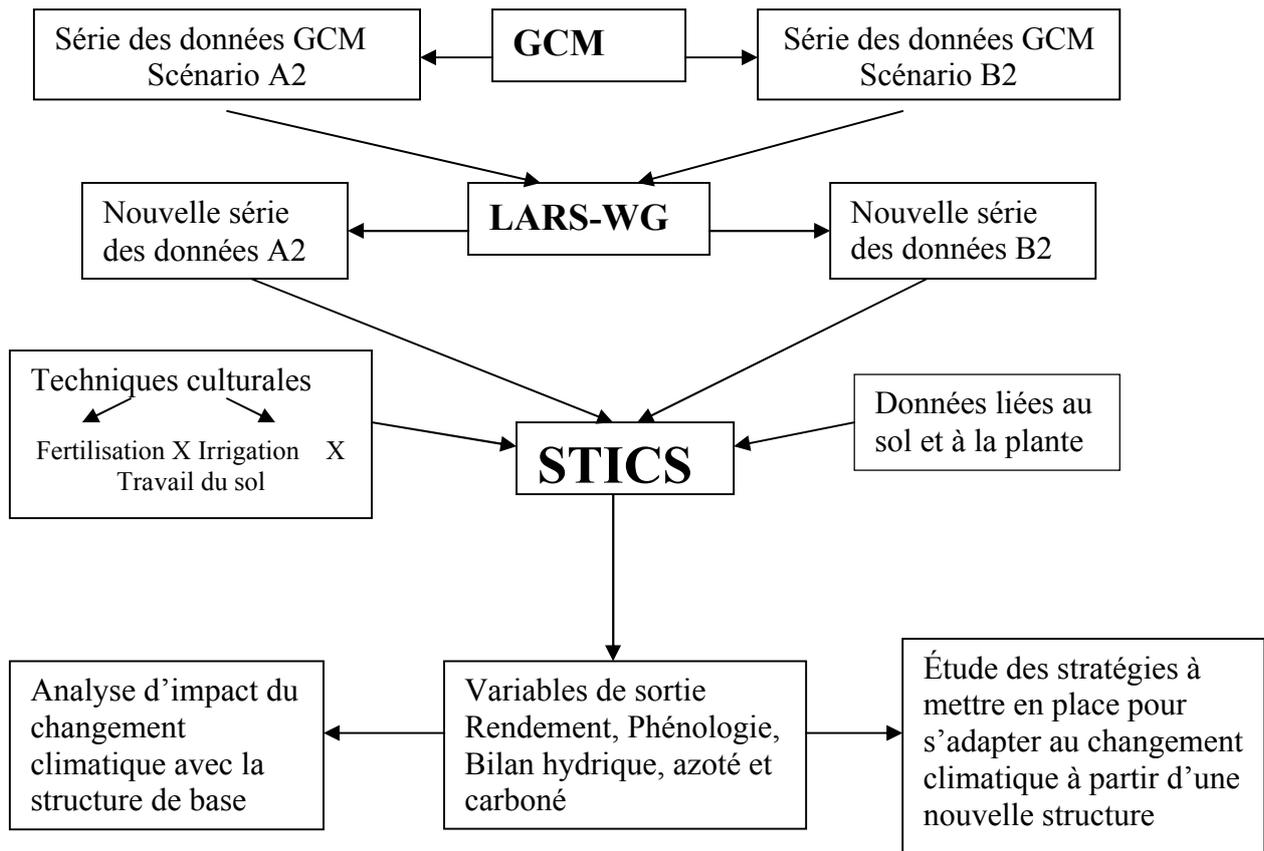


Figure. 23 - Schéma résumant la méthodologie utilisée pour étudier les impacts du changement climatique

1-1- Utilisation des scénarios du changement climatique dans le STICS.

Le modèle STICS permet de prendre en compte les données climatiques issues des simulations de GCM pour les différents scénarios proposés A2 et B2 qui ont les seuls à avoir été utilisés pour les simulations climatiques dans les modèles GCM, de la même manière qu'avec des données météorologiques réelles.

Les GCM ont typiquement une résolution horizontale comprise entre 250 et 600 Km, leur résolution est donc très grossière. Ceci signifie que la représentation de la surface de la terre dans le modèle est très lissée par rapport à la réalité, avec des conséquences évidentes sur la véracité de la simulation du climat (Christian, 2005).

L'obtention des données climatiques à plus haute résolution repose sur l'établissement des relations significatives entre les climats locaux et ceux à grande échelle, ce qui permet l'obtention de données utiles à l'échelle du site précis. Ces relations demeureront valides dans les conditions climatiques futures (Semenov et Brooks, 1999).

Le passage d'une grande échelle à une échelle locale a été réalisé à l'aide d'un générateur de données climatiques LARS-WG (Semenov et Barrow, 1997 ; Semenov *et al.*, 1998).

1-2- Génération stochastique des scénarios climatiques

1-2-1- Généralité sur LARS-WG

LARS-WG est un générateur stochastique de données météorologiques conçu par Semenov et Barrow, (1997). C'est un modèle statistique capable de générer les données météorologiques quotidiennes ayant les mêmes caractéristiques statistiques que les données observées. Il permet de créer des scénarios climatiques à pas de temps journalier qui sont basés sur les variations mensuelles prévues par les sorties de GCM (González *et al.*, 2005). Ce type de modèle statistique peut :

- Générer de longues séries chronologiques de données météorologiques (précipitations, températures maximales et minimales et rayonnement solaire) qui permettent l'évaluation des risques agricoles et hydrologiques;
- Offrir un moyen de simuler les données météorologiques là où les relevés d'observation sont très courts;
- Servir d'outil moins coûteux en terme de temps de calcul et capable de produire des informations sur les scénarios de changements climatiques à haute résolution.

1-2-2- Méthode d'application des données de GCM dans l'étude d'impact

La méthode des anomalies appliquées dans le générateur climatique LARS-WG (Semenov et Barrow, 1998), permet de calculer des anomalies mensuelles pour chaque variable climatique, comme le rapport (pour la pluie) ou la différence (pour la température) entre le climat mensuel moyen simulé sous les effets du changement climatique qui correspond à un forçage radiatif équivalent à 650 ppm [CO₂] (scénario SRES B2) ou 800 ppm [CO₂] (scénario SRES A2), et le climat de la série contrôle qui correspond à un forçage radiatif de la période qui précède le changement climatique (généralement 1960-1989). Ensuite, elles sont appliquées sur la distribution statistique des données physiques réelles: ce sont les valeurs moyennes ainsi que leurs variabilités qui peuvent être modifiées.

LARS-WG, est capable de prendre en compte les modifications sur les moyennes et les écart-types des paramètres climatiques observées (fig. 24). La fiabilité des résultats est déterminée à partir des tests statistiques (Garcia, 2006).

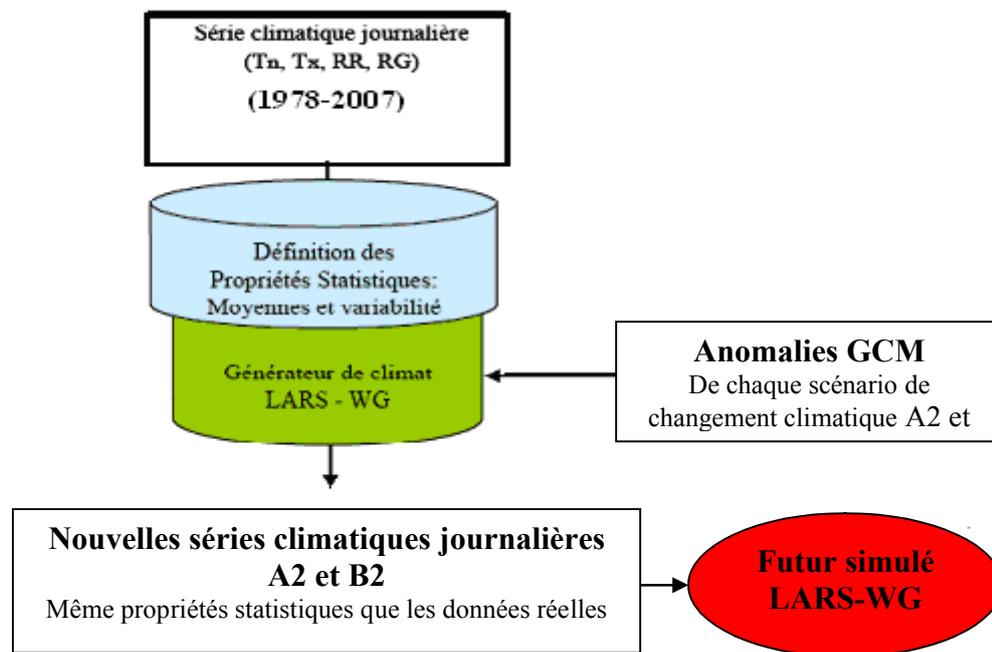


Figure. 24- Schéma décrivant la méthode des anomalies appliquées dans un générateur climatique LARS-WG. Tn est la température minimale ; Tx est la température maximale ; RR est la pluviométrie ; et RG est le rayonnement global.

1-2-3- Séries de données appliquées dans cette étude

Pour utiliser la méthodologie des anomalies, nous avons utilisé des données réelles issues d'une station météorologiques de l'ONM s'étalant du 1978 à 2007, et une série de référence qui précède le changement climatique et qui correspond à la période s'étalant de 1960-1999 ainsi que les données des scénarios climatiques A2 et B2 « série future » simulés par le modèle GCM au point de grille le plus proche de notre zone d'étude ($X=0^{\circ}$ E, $Y=37.5^{\circ}$ N).

Les données des scénarios A2 et B2 sont subdivisées en quatre périodes de décennie séparées comme suit ; 2021-2030, 2041-2050, 2061-2070 et 2081-2090. Pour faciliter l'étude, on considère qu'une culture annuelle s'étale sur deux années (une saison agricole), nous choisissons les données appartenant à la décennie considérée pour chaque scénario, ce qui permettra de comparer les situations prévues entre les différentes périodes des scénarios.

1-3- Choix de techniques culturales pour la simulation

L'étude des impacts du changement climatique doit être réalisée séparément pour chaque période du scénario, pour cela nous avons proposé « une nouvelle structure » ; des

techniques culturales qui nous ont permis d'améliorer la production du blé dur sous chaque scénario du changement climatique :

a- Plusieurs dates et densités de semis ont été introduites afin d'améliorer le rendement dans le futur.

b- Application du travail du sol, à différentes profondeurs ainsi qu'à des dates différentes afin de voir son effet sur le rendement.

c- Irrigation et fertilisation à des différents stades phénologiques.

Cette nouvelle structure a été obtenue à partir de plusieurs essais faits par le modèle STICS.

2- Paramétrage et validation du modèle de culture STICS

Hadria (2006), montre que le modèle STICS fonctionnait globalement bien en milieu aride et semis aride, malgré les spécificités climatiques (pluies faibles et irrégulières, dynamique forte des températures, fort rayonnement d'origine solaire).

L'adaptation de ce modèle à la culture du blé concerne la détermination des différents paramètres décrivant la croissance, la structure et le développement de la plante. Le paramétrage de STICS pour une espèce donnée ne prend pas l'ensemble des paramètres du modèle, il dépend des choix des formalismes (Pindard, 2000).

2-1- Les options et les formalismes choisis

Le modèle prend en compte l'augmentation de la concentration de CO₂ et son impact sur la physiologie des plantes. Pour cela, il intègre deux formalismes :

- Efficiencia de conversión: elle est modifiée par sa teneur élevée dans l'atmosphère (Kimball, 1983 ; Kimball *et al.*, 1993).

- Conductance stomatique: la teneur élevée de CO₂ génère une diminution de la conductance stomatique (Kimball *et al.*, 1993; Drake *et al.*, 1997). Idso (1991), a montré qu'il existe une proportionnalité entre l'effet du CO₂ sur l'efficacité de conversion et sur la conductance stomatique selon un rapport de 2.5 pour un ajout de 300 ppm à la concentration nominale.

La structure modulaire de STICS offre à l'utilisateur de ce modèle le choix entre plusieurs options de calcul. L'Annexe III, résume les principales options choisies pour notre

simulation, le choix de ces options est en fonction du nombre de paramètres et au type des données nécessaires.

2-2- L'environnement du STICS

Le modèle STICS est interfacé avec 5 fichiers d'entrée (6 pour STICS-feuille) (fig. 25). Le fichier **travail.usm** décrit la simulation en spécifiant le nom des fichiers d'entrée, les conditions initiales et la période de simulation. Les fichiers **stat.dat** et **NomEssai.lai** (**.obs**) donnent les variables de forçage au pas de temps choisi pour la simulation. Les fichiers **NomEssai.tec**, **param.sol**, **NomPlante.plt** et **param.par** précisent les paramètres liés à l'itinéraire technique, au sol, à la plante et les paramètres structuraux utiles à la simulation (fig. 25) (Brisson, 2002),

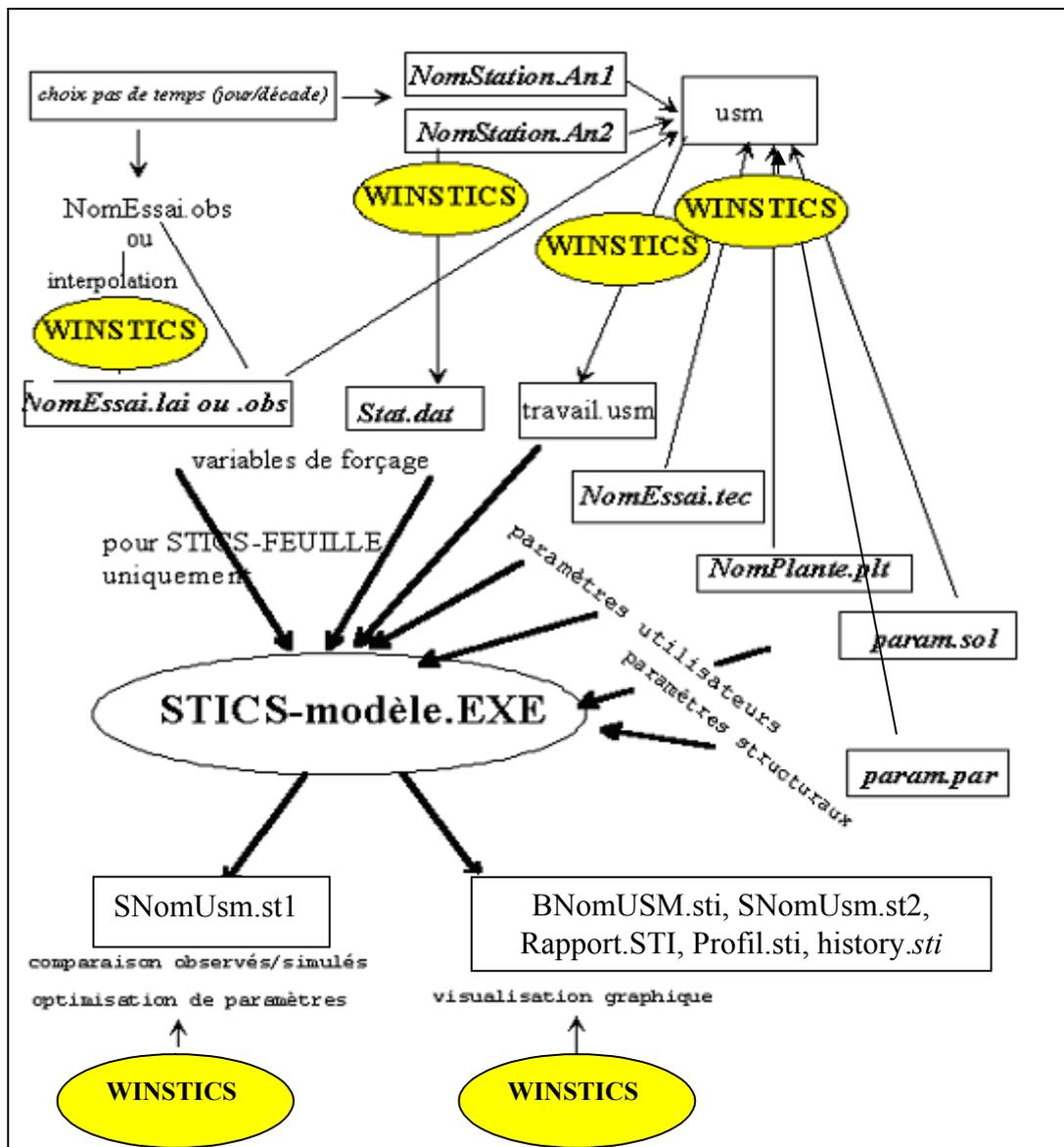


Figure. 25 -Schéma entrées/sorties de STICS (Brisson *et al.*, 2002)

2-2-1- Notion d'USM

Une unité de simulation (USM) rassemble toutes les informations nécessaires pour faire une simulation : les caractéristiques du sol et son contenu initial en eau et en azote, les caractéristiques éco-physiologiques et agronomiques de la culture, l'itinéraire technique réalisé sur la culture et le sol pendant le cycle cultural, les conditions climatiques journalières pendant la période de simulation et naturellement les dates de début et de fin de simulation définies par l'utilisateur du modèle. Dans la pratique, un fichier USM inclut les noms du fichier sol (*.SOL), du fichier plante (*.PLT), des fichiers climatiques (*.STAT.DAT), un fichier climatique par année calendaire et un fichier technique (*.TEC) (Brisson, 2002),

2-2-2- Les variables d'entrées

Les données indispensables pour faire tourner le modèle sont celles qui caractérisent une situation agronomique correspondant à une parcelle de blé dur.

Les variables d'entrées sont classées en quatre catégories :

- les variables climatiques journalières ;
- les paramètres liés au sol ;
- les paramètres liés à la plante ;
- les pratiques culturales (fertilisation, irrigation, travail du sol, etc.) ;

2-2-2-1- Variables climatiques

Les variables climatiques indispensables à l'exécution du modèle sont les températures minimales et maximales journalières, le cumul journalier des précipitations ainsi que le rayonnement solaire. L'évapotranspiration potentielle peut être utilisée comme une entrée du modèle si elle est disponible. Dans le cas contraire, elle peut être calculée selon l'une des méthodes proposées par STICS: la méthode de Priestly et Taylor (1972), de (Panman, 1948) et celle résistive de schuttleworth-Wallace (Schuttleworth et Wallace, 1985 ; Brisson *et al.*, 1998). Deux noms du fichier climatique sont nécessaires dans le cas des cultures d'hiver.

Il est nécessaire d'avoir les données climatiques au pas de temps journalier sur l'ensemble des périodes de simulation. Dans notre cas l'ETP n'est pas disponible, elle est donc calculée par le model selon la méthode de Priestly et Taylor (1972), car elle n'exige pas beaucoup de paramètres climatiques.

2-2-2-2- Paramètres liés au sol

Le type de sol le plus dominant de la région de Chlef est argilo limoneux (DSA, 2008). Les données qui décrivent les paramètres physiques et chimiques de ce type de sol proviennent d'une étude réalisée par Bouthiba (2003), où les données sont liées à la quantité d'argile, la teneur en azote total, le CaCO₃, la densité apparente et le pH (tab. 07). Par ailleurs, l'humidité à la capacité au champ, le point de flétrissement et l'albédo du sol sont donnés par le référentiel du logiciel du STICS (Brisson, 2002).

2-2-2-3- Paramètres liés à la plante

Les caractéristiques des espèces et des variétés sont décrites dans un fichier plante (*.PLT). Les paramètres contenus dans ce fichier (tab. 07) sont relatifs aux fonctions physiologiques suivantes : levée (levé), accélération maximum foliaire (amf), indice foliaire maximum (lax), sénescence des feuilles (sen), floraison (flo), début de remplissage du grain (drg), maturité (mat) et récolte (rec) (Annexe.I-4). Les dates de ces stades phénologiques sont données en entrée du modèle et en se basant sur les sommes des températures entre deux stades successifs. Nous avons forcé le modèle pour déterminer sa capacité à simuler la croissance et le rendement de la plante en fonction des dates réellement observées (Annexe.I-3). Ces dates sont collectées auprès de la direction des services agricoles, de la chambre d'agriculture et du CCLS de la wilaya de Chlef.

2-2-2-4- Itinéraires techniques

On entend par itinéraire technique la succession des opérations agricoles menées pendant la conduite de la culture. Les renseignements sur les itinéraires techniques culturaux ont été obtenus à partir des enquêtes terrains, des références techniques fournies par la chambre d'Agriculture, et la DSA de Chlef, ainsi que par des fiches techniques concernant la culture des céréales fournies par l'ITGC d'Ain Defla. Ces itinéraires techniques (structure de base) sont souvent utilisés par les agriculteurs de la région.

Cette structure de base comprend :

- Le labour d'automne au mois d'octobre ; utilisation d'un cultivateur de 25-30 Cm de profondeur ;
- Reprise du labour ; utilisation de cultivateur ;
- Epandage de la fumure azotée ; utilisation de 1.5 qx/ha de sulfate d'ammonium 21% ou 1 qx/ha d'urée 46 % ;

- Recroissance de façon superficielle ;
- Le semis est réalisé en mi-novembre, avec une densité de 270 plants par mètre carré et une profondeur de 3 cm.
- Deux apports d'azotes de 1 qx/ha l'un au stade tallage et l'autre au stade montaison. Notons que les apports d'engrais sont rarement utilisés par les agriculteurs à des raisons sécuritaires (DSA de Chlef). L'irrigation n'est pas pris en compte dans cette structure, afin de bien étudier l'effet de changement du climat sur le système sol -plante.

Rappelons que le modèle STICS ne simule pas l'interaction plante - bioagresseurs (parasites, maladies cryptogamiques, mauvaises herbes...), et ne prend pas en compte les traitements phytosanitaires. Il fait l'hypothèse que l'état sanitaire de la parcelle est suffisamment bon pour la croissance et le développement de la plante (Brisson et Delecolle., 1991).

Tableau. 07 -Les principales variables de forçage

| Fonction | Paramètre | Définition | Unité |
|----------------|-----------|---|-------------------|
| Données sol | Argi | Teneur en argile de la couche de surface | % |
| | Norg | Teneur en azote organique dans l'horizon d'humification | % |
| | Calc | Teneur en calcaire dans la couche de surface | % |
| | albedo | albédo du sol | (SD) |
| | PH | Potentiel Hydrogène | |
| | HCC | Humidité à la capacité au champ | g g-1 |
| | DA | Densité apparente | g/cm ³ |
| | HPF | Humidité au point de flétrissement | g g-1 |
| Données plante | jullev | Jour julien du stade LEV (levée). | |
| | julamf | Jour julien du stade AMF (accélération maximale de croissance foliaire, fin de phase juvénile). | |
| | jullax | Jour julien du stade LAX (indice foliaire maxi). | |
| | julflo | Jour julien du stade floraison FLO. | |
| | juldrg | Jour julien du stade DRG (début de remplissage des grains). | |

| | | | |
|-------------------------------|----------------|--|-------------------------|
| | jullan | Jour julien du stade LAN (indice foliaire nul). | |
| | julmat | Jour julien du stade MAT (maturité physiologique) | |
| | julrec | Jour julien du stade REC (récolte) | |
| | julsen | Jour julien du stade SEN (début de sénescence nette). | |
| | julrecbutoir | Jour julien de récolte butoir (si la plante n'a pas fini son cycle à cette date, la récolte est imposée) | |
| Données itératives techniques | engrais | Type d'engrais | Kg/ha |
| | jultrav | Jour julien de travail du sol. | |
| | proftrav | Profondeur de travail du sol. | Cm |
| | Densité | Densité de semis | plantes.m ⁻² |
| | julplt | Jour julien de la date de semis ou de plantation | |
| | profsem | Profondeur de semis | Cm |
| Les données liées au climat | NomStationJ.An | Le nom de la station et l'année en jour | |
| | Tm | Température minimale | (C°) |
| | Tx | Température maximale | (C°) |
| | RR | Précipitation | (mm) |
| | RAD | Rayonnement global | MJ/m2/j |

2-2-3- Les fichiers de sorties

STICS permet d'avoir:

2-2-3-1-Les fichiers de bilan de simulation

- Un fichier "**b+nomUSM.sti**", c'est le bilan de simulation qui donne les informations de base: les données d'entrées, les phases de développement de la culture, la croissance et les composantes du rendement, bilan en eau et azote durant le cycle et durant toute la période de simulation.

- Un fichier "**rapport.sti**", qui donne une synthèse de toutes les simulations réalisées sous forme d'une ligne par simulation.

2-2-3-2-Les fichiers dynamiques

Ils permettent d'examiner en détail l'évolution chronologique des variables ; l'un concerne les variables que l'on peut comparer à des données observées "**S+nomUSM.STI**" et l'autre donne à l'utilisateur le choix de 20 variables parmi les 165 "**S+nomUSM.ST2**".

2-2-3-3-Le fichier profil.sti

Ce fichier permet de récupérer l'une des variables du sol (humidité, température, azote, densité racinaire) par cm, à des dates choisies.

2-2-3-4-Le fichier history.sti

Il s'agit d'un fichier mouchard qui donne des informations sur la valeur des paramètres actifs de la simulation et les problèmes rencontrés lors de l'exécution.

2-3- Le matériel végétal

L'étude a été réalisée sur une culture de blé dur, variété Chen's (Annexe I). C'est une variété à cycle végétatif précoce. Selon CCLS (2008), c'est la variété la plus utilisée durant les dernières années pour les agriculteurs de la région (distribution 65 %). Elle est cultivée entre mi-novembre et mi-décembre, son rendement optimal en grain est de 35 à 40 qx/ha. Elle est moyennement tolérante à la sécheresse.

Chapitre VI- Etude d'impact du changement climatique

1- Impact du changement climatique

Nous avons réalisé la simulation avec toutes les périodes des scénarios climatiques A2 et B2. L'option utilisée est la réinitialisation des états du sol et de la culture (garder avec maintien de l'état du bilan hydrique et azoté du sol, des réserves azotées et carbonées et du développement racinaire de la plante au même état lors de début de la simulation).

Une série de variables a été étudiée ayant permis d'évaluer les conditions générales de production du blé dur durant toutes les périodes de chaque scénario. Dans tous les cas, nous avons simulé les différents aspects de croissance et de développement (rendement, bilan hydrique, bilan azoté et carboné ainsi que la phénologie). Notons que ces variables ont été simulées par le modèle STICS au pas de temps journalier :

— Rendement : la variation du rendement au futur a été étudiée selon les deux structures (structure de base et nouvelle structure) à chaque période du scénario.

— Phénologie : nous avons étudié l'effet du changement climatique sur les principaux stades phénologiques du blé dur.

— Bilan hydrique, azoté et carboné : l'analyse de leurs variations a été réalisée à partir des sorties du modèle de chaque période de simulation. L'objectif de cette étude est d'estimer l'évolution et l'accentuation des différents stress subis par la plante au cours du cycle de la culture.

1-1- Impact du changement climatique sur le rendement

Afin d'implémenter le modèle STICS, il faut que toutes les données climatiques générées par LARS-WG soient mises au format STICS, tout en gardant les mêmes fichiers d'entrées (fichier *.PLT, PARAM SOL et *.TEC) avec leurs variables de forçage. Nous obtenons ainsi les résultats suivants :

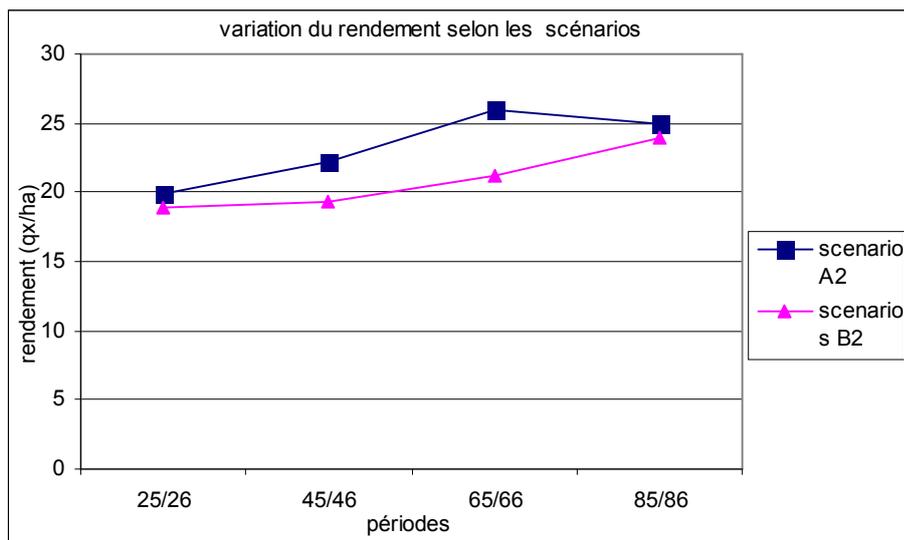


Figure. 26 - Variation des rendements simulés suivant les différentes périodes des scénarios A2 et B2

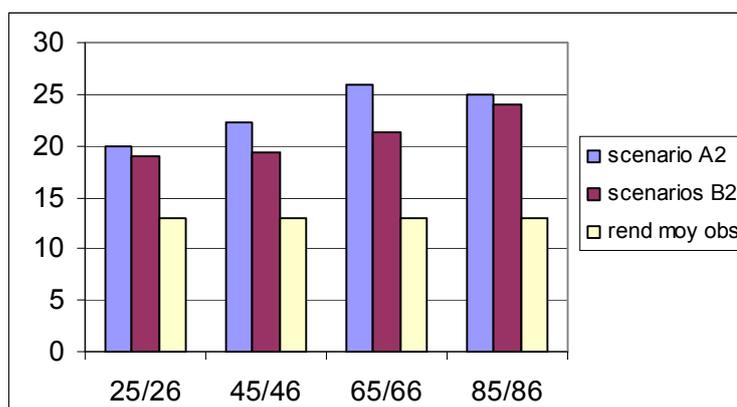


Figure. 27 - Comparaison entre le rendement simulé et observé dans les différentes périodes des scénarios A2 et B2.

Les figures 26 et 27, montrent une augmentation du rendement simulé durant dans toutes les périodes de chaque scénario par rapport au rendement moyen observé durant la dernière décennie de 1996 jusqu'à 2007. Cette amélioration du rendement sera plus au moins accentuée dans les périodes du scénario A2 que B2. La période 2060 à 2070 apparaît comme la meilleure période dont le rendement atteint un moyen de 26 qx/ha.

Le pourcentage de l'augmentation du rendement par rapport au rendement observé serait de 44 % en moyenne pour le scénario A2, alors que celui du scénario B2 serait autour de 37.5 % en moyenne. Cette amélioration du rendement serait due aux conditions favorables dans le futur, où la production de la biomasse végétative aura progressé suite à l'augmentation de la teneur en CO₂ dans l'atmosphère (650-800 ppm pour A2 et 500-650 ppm pour B2 : GIEC, 2001).

Selon Seguin *et al.*, (2005), la concentration très élevée du taux de CO₂ induirait une augmentation de la photosynthèse, ceci garantirait une amélioration de l'efficacité de conversion du rayonnement intercepté en biomasse.

1-2- Impact du changement climatique sur la phénologie

Garcia (2006) montre qu'une teneur élevée en CO₂ peut avoir des effets sur la phénologie des cultures. Pour bien illustrer cet effet nous avons pris une même date de semis pour toutes les périodes de chaque scénario, les résultats sont les suivants :

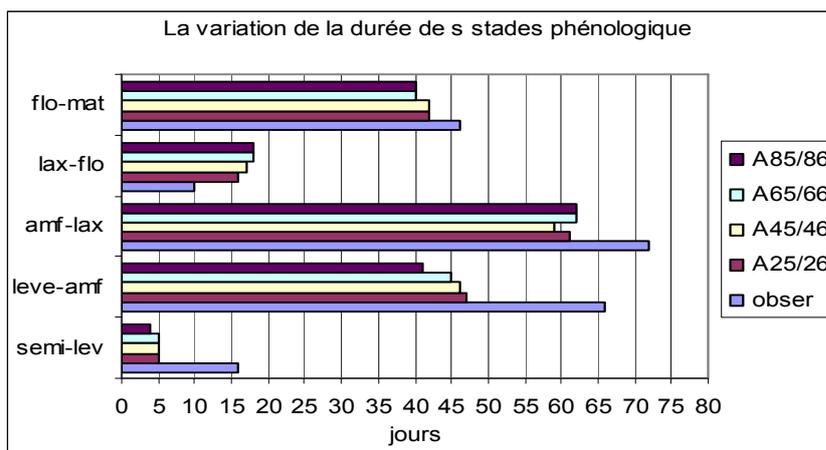


Figure. 28 - Variation de la durée des stades phénologiques pour le scénario A2.

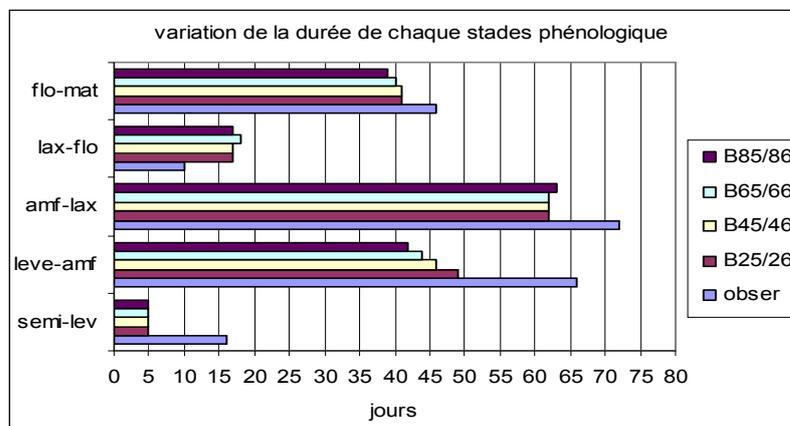


Figure. 29 - Variation de la durée des stades phénologiques pour le scénario B2.

Tableau. 08 – Variation des dates des différents stades phénologiques par rapport à l'observé concernant les périodes du scénario A2 et B2

| | OBS | A2 (25/26) | A2 (45/46) | A2 (65/66) | A2 (85/86) | B2 (25/26) | B2 (45/46) | B2 (65/66) | B2 (85/86) |
|--------------|------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| semis | 15-nov. | 15-nov. | 15-nov. | 15-nov. | 15-nov. | 15-nov. | 15-nov. | 15-nov. | 15-nov. |
| leve | 1-déc. | 20-nov. | 20-nov. | 20-nov. | 19-nov. | 20-nov. | 20-nov. | 20-nov. | 20-nov. |
| amf | 5-févr. | 6-janv. | 5-janv. | 4-janv. | 30-déc. | 8-janv. | 5-janv. | 3-janv. | 1-janv. |
| lax | 18-avr. | 8-mars | 5-mars | 7-mars | 2-mars | 11-mars | 8-mars | 6-mars | 5-mars |
| flo | 28-avr. | 24-mars | 22-mars | 25-mars | 21-mars | 28-mars | 25-mars | 25-mars | 24-mars |
| mat | 13-juin | 5-mai | 3-mai | 4-mai | 29-avr. | 8-mai | 5-mai | 3-mai | 30-avr. |

Les simulations du modèle montrent que le changement climatique provoquerait un avancement des dates de tous les stades phénologiques (tab. 08) suivis par un raccourcissement du cycle de 19.6 % par rapport aux dates observées durant la saison 2006/2007 (fig.28 et 29). Ceci est conforme aux prédictions faites par Rousset et Arrus (2006) qui ont montré que le changement climatique implique un décalage et une réduction des périodes de croissance pour la région du nord d'Afrique (en l'occurrence notre région d'étude).

Tableau. 09- Variation de la durée des différents stades phénologiques concernant les périodes du scénario A2 par rapport à l'observé.

| | A2 (25/26) | A2 (45/46) | A2 (65/66) | A2 (85/86) |
|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| semi-leve | -11,00 | -11,00 | -11,00 | -11,00 |
| leve-amf | -19,00 | -20,00 | -21,00 | -24,00 |
| amf-lax | -11,00 | -13,00 | -10,00 | -9,00 |
| lax-flo | 6,00 | 7,00 | 8,00 | 7,00 |
| flo-mat | -4,00 | -4,00 | -6,00 | -7,00 |
| Cycle total | -39,00 | -41,00 | -40,00 | -44,00 |

Tableau. 10 -Variation de la durée des différents stades phénologiques concernant les périodes du scénario B2 par rapport à l'observé

| | B2 (25/26) | B2 (45/46) | B2 (65/66) | B2 (85/86) |
|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| semi-leve | -11,00 | -11,00 | -11,00 | -11,00 |
| leve-amf | -17,00 | -20,00 | -22,00 | -24,00 |
| amf-lax | -10,00 | -10,00 | -10,00 | -9,00 |
| lax-flo | 7,00 | 7,00 | 8,00 | 7,00 |
| flo-mat | -5,00 | -5,00 | -6,00 | -7,00 |
| cycle total | -36,00 | -39,00 | -41,00 | -44,00 |

Ces variations détectées auraient presque une même intensité pour les différentes périodes de chaque scénario (tab.09 et 10).

La durée de la période "semis - levé" sera réduite de 11 jours (tab.09 et 10) par rapport à l'observé, ceci serait expliqué par l'accélération à atteindre une satisfaction des besoins en froids permettant de garantir un bon démarrage de la culture dont la température moyenne de l'air durant cette phase varierait entre 20 et 24 C° (Annexes IV et V, fig 1, 2, 3 et 4).

On estime un raccourcissement remarquable atteint les 24 jours durant la période "levé-amf". Ceci probablement dû à la satisfaction du besoin en azote (augmentation de l'indice de stress azoté "INNS" de 0.58 à 1 durant la phase végétative), qui accélérerait la vitesse de croissance de 7.5 à 15.3 mg/m²/jour par rapport à l'observé. Par ailleurs, la photosynthèse et le rythme d'apparition des feuilles seront rapides par l'augmentation du nombre des feuilles émises de 12 à 17 feuilles.

Par contre, on estimerait une légère prolongation de la durée de la phase "lax-flo", qui sera de 5 à 8 jours par rapport à l'observé dans chaque scénario. L'interprétation d'un tel résultat pourrait être expliquée par les extrêmes climatiques (Katz et Brown, 1992). En effet, cette phase est plus sensible aux conditions extérieures (Mazoyer, 2002) dont l'apport journalier de précipitation pourra atteindre les 60 mm/jour avec une température moyenne de l'air variant entre 11 à 17C° durant cette période (Annexes IV et V, fig. 05 et 06). Selon Belaid (1996), la floraison ne débutera que lorsque la température dépassera les 14°C, ce qui expliquerait la forte réduction de la fertilité des épis, en cas de baisse de température (Bahlouli *et al.*, 2005).

En ce qui concerne le stade "floraison – maturité", on estime un raccourcissement de 4 à 7 jours, des températures élevées tendent à raccourcir la période de remplissage des grains de cette culture.

Pour conclure, l'avancement et le raccourcissement des stades phénologiques toucheront surtout les phases végétatives « levée –floraison ». Les hausses de température dans un milieu enrichi en CO₂ croîtront la vitesse de croissance et la productivité de la biomasse végétative, tout en accusant un raccourcissement de ces stades. Par contre le raccourcissement semble faible dans les phases reproductrices (tab.09 et 10), ce qui serait probablement dû aux conditions climatiques (température, précipitation) qui affecteraient la floraison et la maturité des grains.

1-3- Impact du changement climatique sur le bilan hydrique, azoté et carboné

1-3-1- Le bilan hydrique

Le fonctionnement hydrique s'appuie sur le calcul des différents termes d'offre et de demande en eau de la plante.

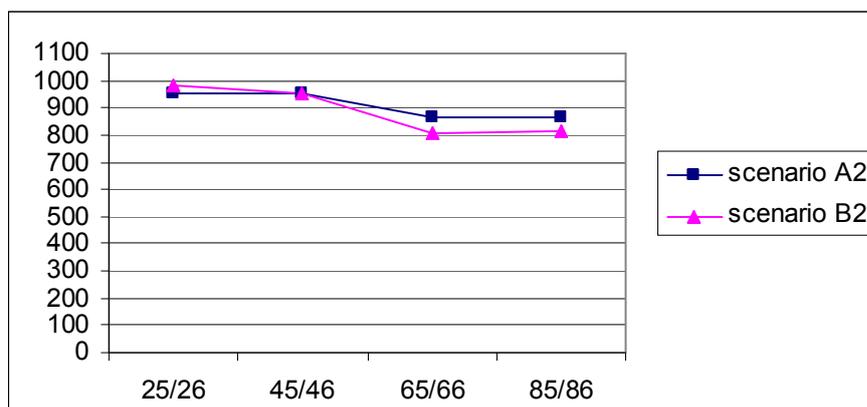


Figure. 30 - Variation du bilan hydrique selon les scénarios futurs A2 et B2.

L'allure générale de ce graphique (fig. 30), montre une baisse du bilan hydrique de 950 mm à 862 mm pour A2 et de 980 mm à 817 mm pour B2, la variation détectée entre les scénarios n'a pas une grande différence.

Les sorties du modèle STICS prévoient une diminution de cumul des pluies sur la période de simulation "cpluie" de 457 mm à 369 mm de la première à la dernière période du scénario A2 et de 487 mm à 324 mm à celle du scénario B2.

On constate que malgré la diminution du bilan hydrique, les rendements durant les deux dernières périodes (2061-2070, 2081-2090) de chaque scénario restent stables (fig.31 et 32), ceci pourra être due à l'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau qui augmenterait de 66.5 à 81.25 kg/ha/mm en moyenne pour les deux scénarios et qui permettrait d'augmenter l'efficacité de conversion du rayonnement en biomasse.

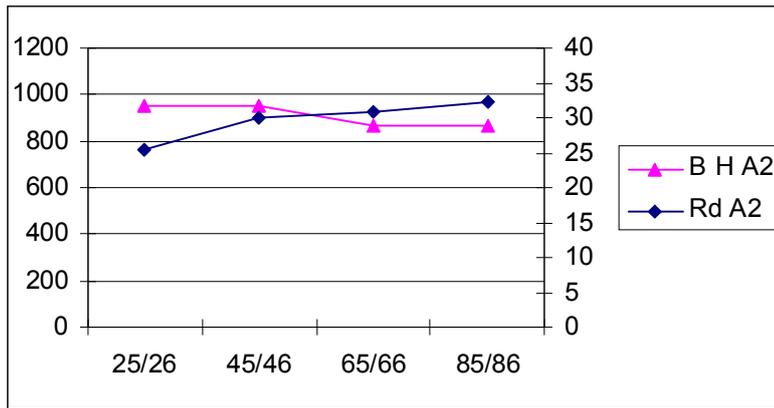


Figure. 31 -Variation du rendement et du bilan hydrique pour le scénario A2

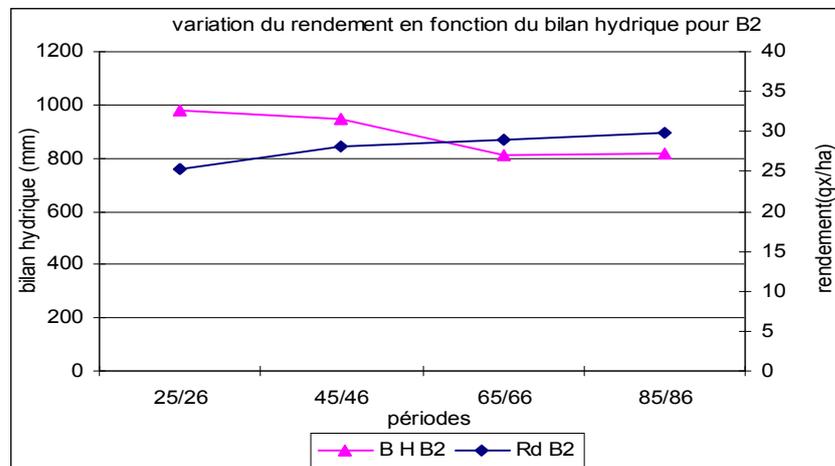


Figure. 32 -Variation du rendement et du bilan hydrique pour le scénario B2

Pour mieux comprendre les variations de certains paramètres du bilan hydrique tels que l'apport journalier d'eau en relation avec l'évapotranspiration journalière sur l'ensemble de la simulation, on prend au hasard les saisons agricoles 2025/2026 et 2085/2086 (chaque saison agricole représentant les deux premières et dernières périodes de chaque scénario), et on obtient les résultats suivantes :

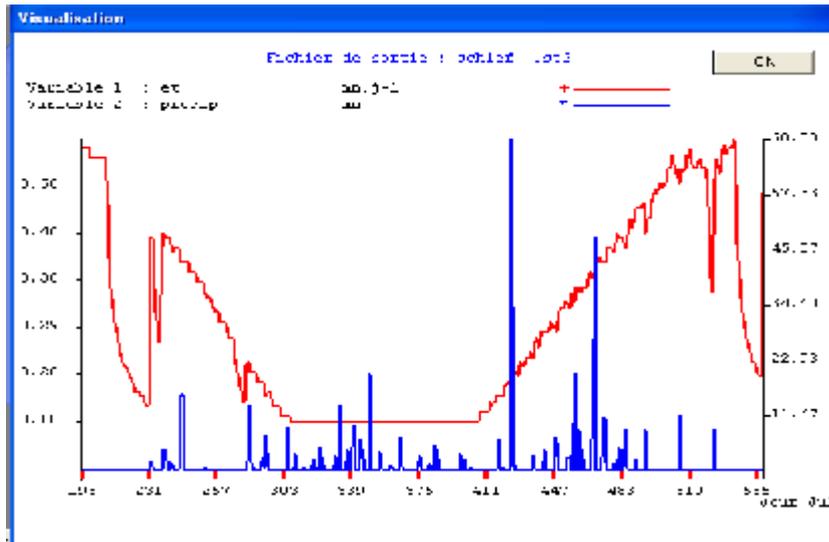


Figure. 33- Variation de l'apport journalier d'eau "précip" et de l'évapotranspiration journalière "et" durant l'ensemble de la simulation de la période 2025/ 2026 du scénario A2.

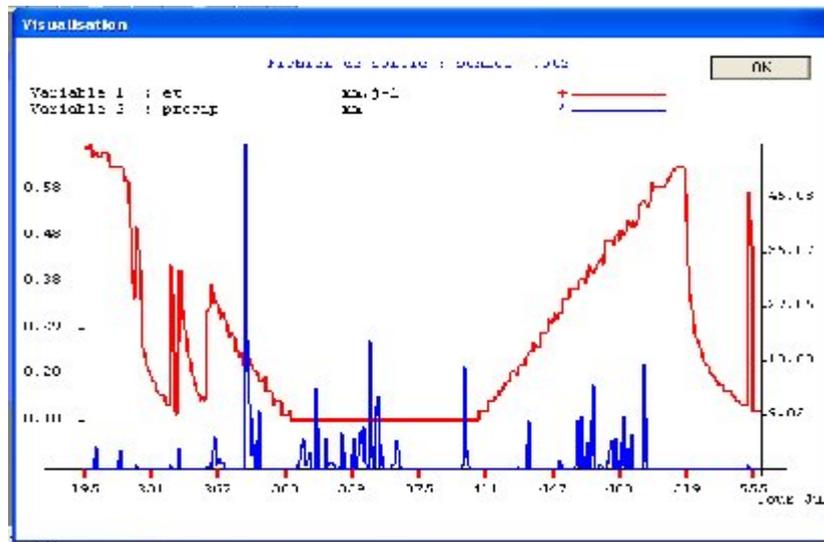


Figure. 34 -Variation de l'apport journalier d'eau "précip" et de l'évapotranspiration journalière "et" durant l'ensemble de la simulation de la période 2085/ 2086 du scénario A2.

On estime qu'il y aura une augmentation de l'apport journalier d'eau "précip" par rapport à l'évapotranspiration journalière "et" au cours de tous les stades de développement et durant toutes les périodes de simulation de chaque scénario.

Cette résultat conduit à dire que le blé n'aurait pas subi de contrainte hydrique, les indices de stress hydrique (turfac et swfac) seront équivalents à 1 (0 = effet du stress maximal, 1= absence d'effet du stress).

Malgré les conditions d'absence de stress hydrique, le rendement ne sera pas élevé, cela pourrait être dû à une faible capacité d'extraction d'eau du sol propre à la plante

durant les deux premières décennies de chaque scénario s'étalant du 2021 à 2030 et du 2041 à 2050 (fig 35 et 36). Il est expliqué par un faible flux d'absorption d'eau et d'azote limité par le transfert sol – racine et racine – plante.

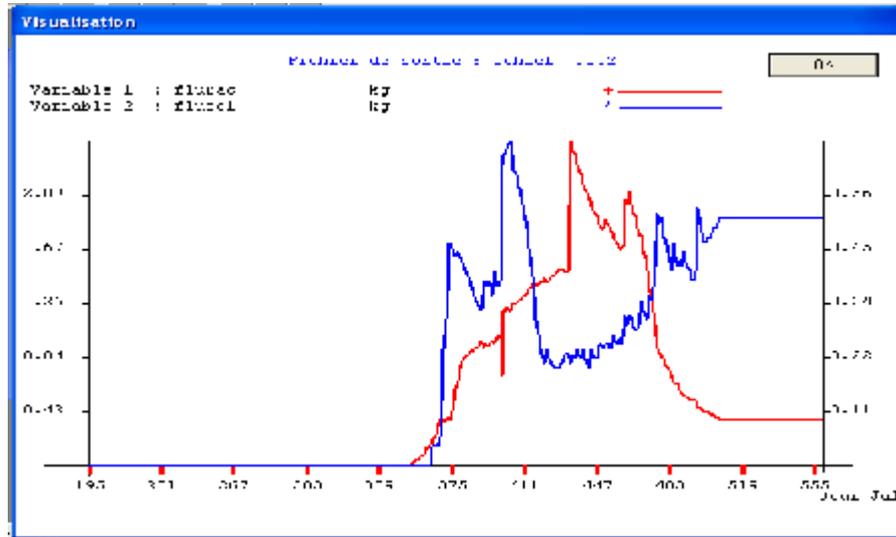


Figure. 35 - L'évolution du flux d'absorption d'eau et d'azote limité par la capacité d'absorption par le transfert sol- racine « flusol » et par la plante « flurac » durant la saison agricole 2085/ 2086 du scénario A2.

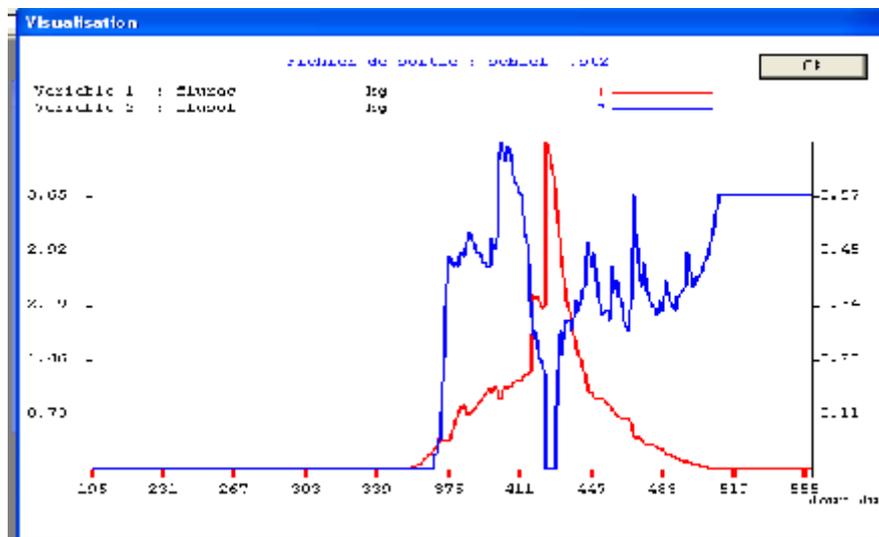


Figure. 36 - L'évolution du flux d'absorption d'eau et d'azote limité par la capacité d'absorption par le transfert sol- racine « flusol » et par la plante « flurac » durant la saison agricole 2025/ 2026 du scénario A2.

Les figures ci-dessus montrent que le faible taux de flux de transfert d'eau et d'azote du sol vers les racines durant les deux premières périodes des scénarios par rapport aux dernières causeraient cette différence de rendement entre ces périodes. Un tel résultat

nous a permis de supposer que la plante subit un stress d'excès d'eau limitant la croissance des racines en profondeur et en densité.

Dans le modèle STICS, la variable d'excès d'eau correspond à la proportion des racines ennoyées. Selon Affholder (2001), STICS ne permet pas de simuler explicitement la saturation, puisque l'humidité maximum admise dans les couches élémentaires est la capacité au champ. Lorsqu'une couche est à cette teneur en eau, tout apport par drainage depuis les couches supérieures sera drainé vers les couches inférieures.

Suivant les figures 35 et 36, la contrainte d'excès d'eau apparaît durant les deux premières périodes de chaque scénario dont des apports des pluies excessives provoqueraient une anoxie racinaire, d'où une perturbation dans le flux d'absorption d'eau et d'azote « flusol » durant la phase "FLO-DRG». Dans le modèle STICS une anoxie peut induire un ralentissement de croissance mais pas forcément son arrêt (Brisson *et al.* 1998).

1-3-2- Le bilan azoté

Sur le même principe que le module du fonctionnement hydrique, celui du fonctionnement azoté utilise le concept de facteur limitant et compare chaque jour l'offre du sol et la demande de la culture qui sont liées aux organes de stockage et l'état azoté de la culture.

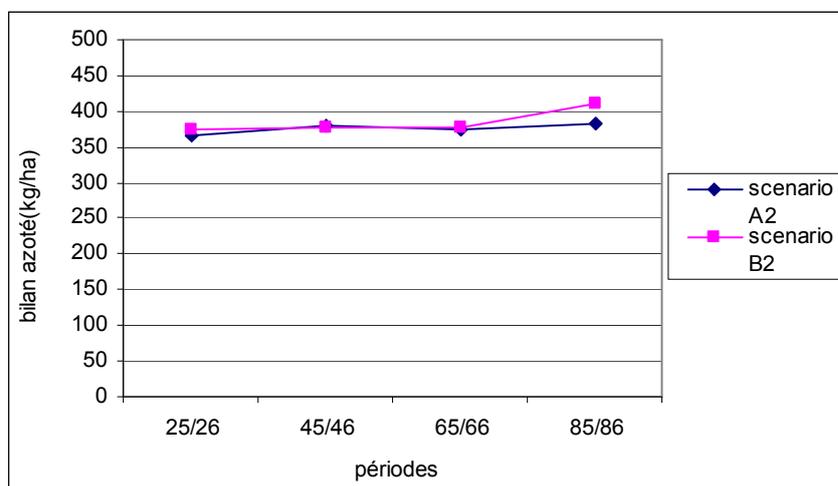


Figure. 37 - Variation du bilan azoté selon les scénarios A2 et B2.

Selon la figure 37, on remarque une faible différence du bilan azoté entre les trois premières périodes de chaque scénario, par contre on estimera une grande différence entre les scénarios durant la dernière période 2081-2090. Cette augmentation sera plus accentuée dans le scénario B2 que A2, ceci pourrait être dû à l'incapacité d'utiliser complètement une quantité

abondante d'assimilés azotés dans le scénario B2 qui expliquerait le faible rendement par rapport à A2. Les sorties du modèle estiment une teneur d'azote total au niveau des grains de l'ordre de 61.37 % pour A2, tandis que pour B2 ne sera que de 47 % (correspond au rapport entre la quantité d'azote contenu dans les grains et à celle dans les parties aériennes de la plante). Cette différence pourrait être expliquée par une faible translocation d'azote vers les grains pendant la phase reproductrice, prouvant la diminution du rendement.

Suivant le bilan de simulation, il semble que la diminution du bilan azoté au cours de la dernière décennie du scénario A2 serait due au faible taux de minéralisation de l'humus qui est de 220 kg N/ha contre celui du B2 qui est de 280 Kg N/ha et d'une augmentation de pertes par lixiviation (diminution de 14 kg N /ha par contre 4 kg N /ha pour le scénario B2).

1-3-3- Le bilan carboné

La croissance de la culture est pilotée de façon tout à fait classique par le bilan de carbone : l'interception du rayonnement solaire par le feuillage puis la transformation en biomasse aérienne qui est orientée vers les organes de récolte pendant la phase finale du cycle (Brisson, 2002). Le bilan azoté de la culture est simulé parallèlement au bilan carboné, dont il dépend en partie (Garcia, 2006).

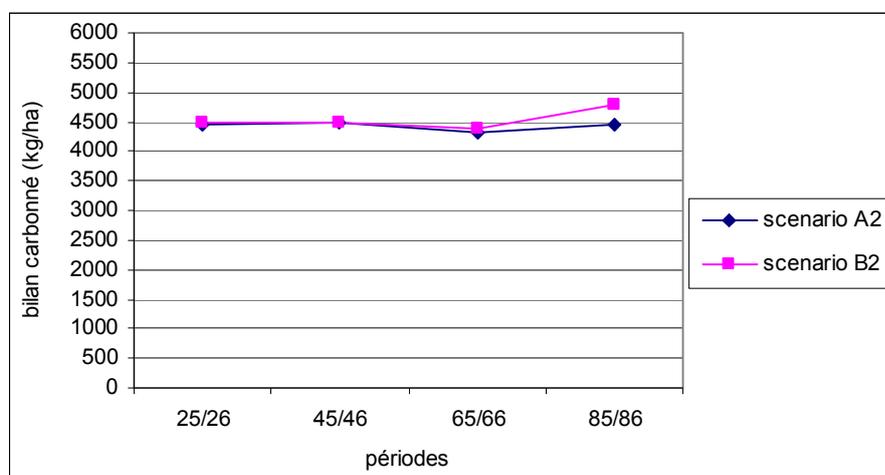


Figure. 38 - Variation du bilan carboné selon les scénarios A2, B2

La variation de ce graphe suit la variation de la courbe du bilan azoté. En effet l'évolution de l'azote et celle du carbone sont très liés (Garcia *et al.*, 2004). L'augmentation du bilan carboné pourrait être dû à l'accumulation des assimilés carbonés dans les tiges et les feuilles susceptibles d'être utilisés par la plante.

L'effet fertilisant du CO₂ commence avec une fixation photosynthétique prononcée. Selon Hartwell *et al.*, (1997), une accumulation carbohydratée accrue dans les feuilles et autres organes de la plante sous forme d'amidon et d'hydrates de carbones solubles, peut entraîner dans certains cas une inhibition de la photosynthèse dont il peut être un signe d'inadaptation de plantes cultivées sous enrichissement en CO₂.

Selon les sorties du modèle la production du CO₂ par le sol durant la dernière période sera de 4430 kg C/ha pour A2 et de l'ordre de 5697 kg C/ha pour B2 durant la dernière période. Cette augmentation peut aussi être due à une fixation importante du carbone atmosphérique par le sol (séquestration du gaz carboniques par les sols agricoles).

Le rapport C/N exprime la relation existante entre le bilan azoté et le bilan carboné, qui signifie la quantité d'azote assimilée par unité de carbone décomposé. En effet, le passage de la forme organique à la forme minérale soit ammoniacal, soit nitrique, est en fonction de ce rapport (Matthieu Valé, 2006)

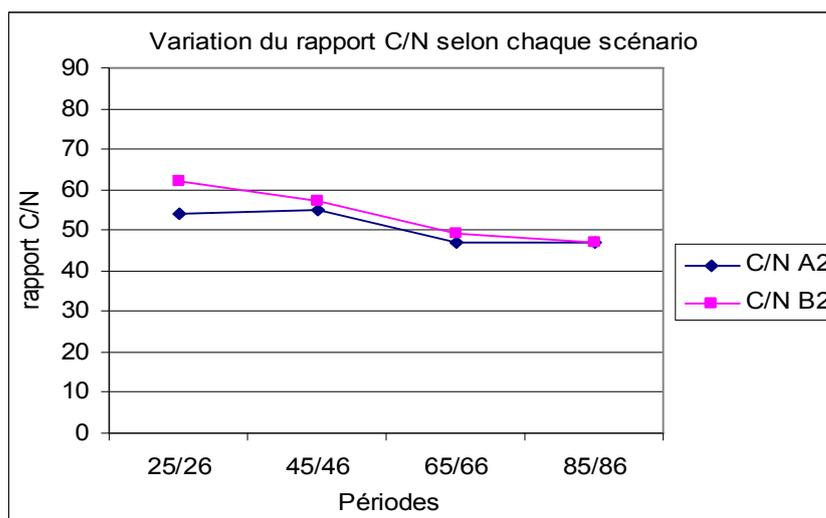


Figure. 39 - Variation du rapport C/N selon les scénarios A2 et B2.

On illustre d'une manière générale une diminution de rapport C/N pour les deux scénarios. Cette diminution serait de 62 à 47 pour le scénario B2 et de 54 à 47 pour le scénario A2, elle sera plus ou moins importante en scénario B2 qu'en A2

La valeur basse de C/N durant les dernières périodes correspond à des situations d'excédents en nutrition azotée qui pourra être due à la fumure azotée excédentaire, reliquats d'azote minéral élevés à l'automne ou un problème de nutrition azoté en fin de végétation (problème de translocation d'azote vers les grains). Cette diminution pourra être expliquer par

l'intrant en matière organique provenant de l'accumulation de la biomasse des cultures due à l'augmentation de la teneur en CO₂ dans l'atmosphère.

Il en résulte que l'azote minéral ne serait pas limitant et que la vitesse de la minéralisation serait élevée au cours des deux dernières périodes par rapport aux précédentes (augmentation de 0.20 à 0.22 kg N/ha/jour en moyenne), ce qui permettrait d'obtenir un meilleur rendement.

2- Etude de stratégies d'adaptation au changement climatique

L'objectif de cette étude est de savoir les possibles stratégies d'adaptation des techniques culturales, afin de diminuer les impacts du changement climatique sur la culture du blé dur.

2-1- Effet des dates de semis sur le rendement

Pour connaître l'effet des dates de semis sur le rendement du blé dur, nous avons appliqué un semis tous les dix jours, débutant de la fin de septembre jusqu'à la mi-décembre, les résultats sont représentés dans les figures 40 et 41.

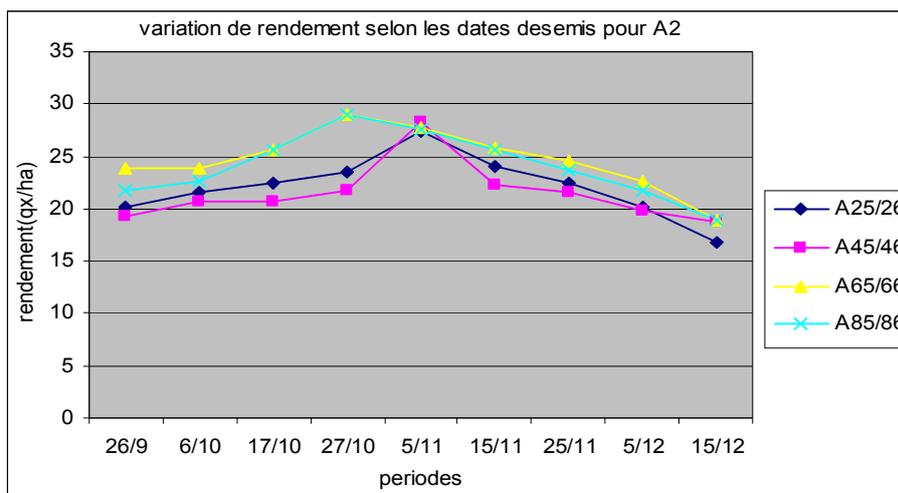


Figure. 40 - Variation du rendement selon les dates de semis pour le scénario A2.

La figure 40 montre que la dernière semaine d'octobre sera considérée comme une date optimum pour les deux dernières périodes du scénario A2, où le rendement atteint les 29qx/ha, et les dates aux alentours du 05 novembre, pour les deux premières périodes avec des valeurs avoisinants 28 qx/ha.

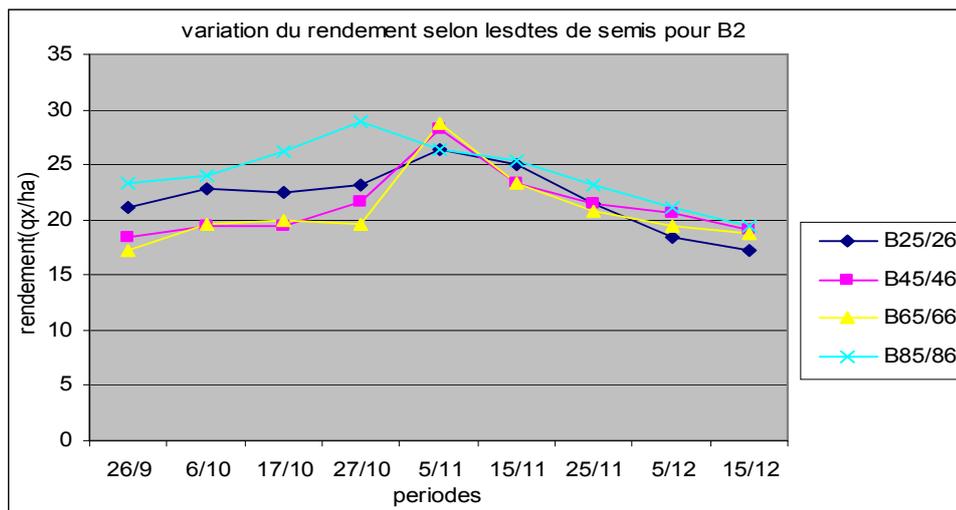


Figure. 41 - Variation du rendement selon les dates de semis pour le scénario B2.

La figure 41 illustre que la date du semis de la première semaine de novembre sera convenable pour les trois premières périodes 2021 à 2070 du scénario B2, dont le rendement varie entre 26 qx/ha et 28.8 qx/ha, tandis que la date de semis pour la période 2081 à 2090 sera la dernière décade d'octobre où le rendement atteindra de 29 qx/ha.

Ces résultats montrent l'importance du semis précoce dans le futur pour la région d'étude. En effet, les conditions climatiques seront favorables pour que la levée soit rapide, le sol sera encore humide grâce à la douceur de cette période (s'étalant de la fin d'octobre jusqu'au début de novembre) dont les sorties du modèle, estime que la température et l'humidité du premier horizon du sol varieront entre 20°C à 25°C et 30 % à 32 % respectivement (Annexes IV et V, fig. 08) ce ci devrait limiter les pertes pendant cette période. Selon Oussible et Bourarach (1998), les céréales semées précocement profitent mieux des premières pluies qui permettent d'assurer l'implantation du peuplement à la levée et minimiser les risques d'exposer les phases de reproduction à la sécheresse très probable de fin du cycle.

Donc on peut déduire que, si le semis serait réalisé entre le 27 octobre et le 05 novembre le rendement serait augmenté de 33 % en moyenne par rapport au semis tardif du 15 décembre.

2-2- Effet des densités de semis sur le rendement

Après avoir eu l'effet des dates du semis sur le rendement, il est important de déterminer la densité de celui-ci, critère important de la qualité d'implantation du blé dur.

Dans ce contexte on a choisi des différentes densités de semis : 200 plt/m², 250 plt/m², 300 plt/m², 350 plt/m² et 400 plt/m². Les résultats sont les suivantes :

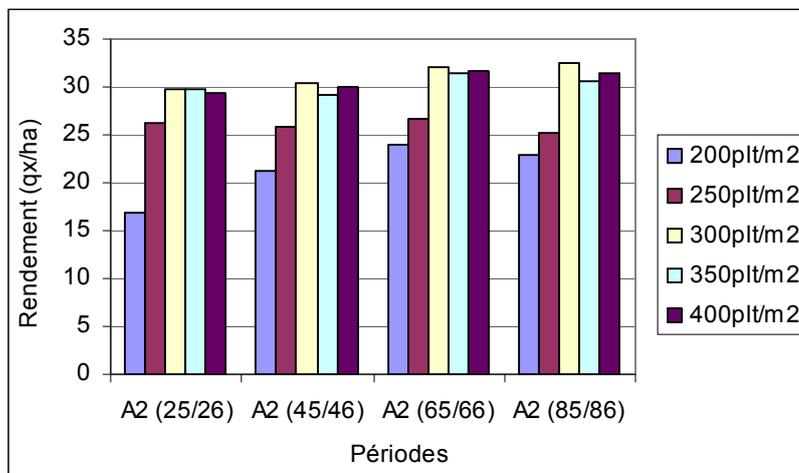


Figure. 42 - Variation du rendement selon les densités de semis du scénario A2

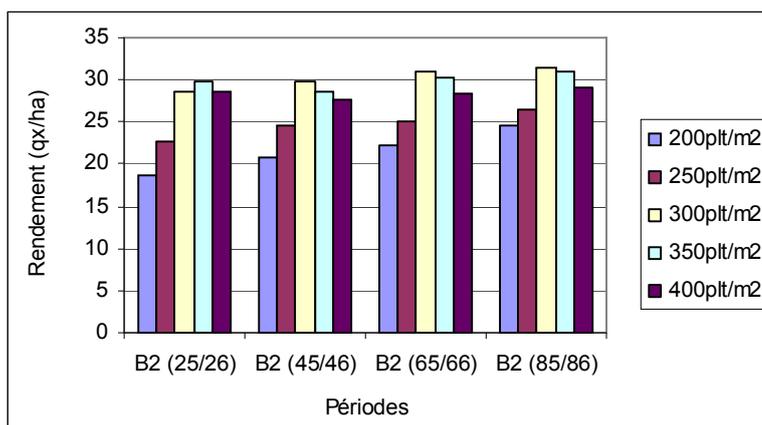


Figure. 43 - Variation du rendement selon les densités de semis du scénario B2

D'après les figures ci-dessus, la faible densité (200 plt/m²) pénalise le rendement ; elle affecte le nombre et le poids des grains par mètre carré. Les sorties du modèle estiment que le nombre des grains par mètre carré pourrait atteindre les 5874 grains/m², alors que son poids serait de 0.055 g/grain, où le rendement ne dépassera pas les 24 qx/ha pour chaque scénario. Selon Gate (2007), en semis clair, on observe un développement plus marqué des adventices et une limitation de potentiel du rendement lié au manque d'épis.

Un meilleur rendement serait constaté à des densités élevées autour de 300 à 350plt/m² et peut atteindre 400 plt/m². Le nombre des grains par mètre carré sera de 8640 grains/m² et son poids sera de l'ordre de 0.066 g/grain. Pelletti et Vullioud (2004) montrent, qu'à une densité élevée, les plants en croissance peuvent couvrir le sol plus rapidement et

priver les mauvaises herbes de lumière ; leurs racines peuvent tirer davantage profit de l'eau et des nutriments

La densité préconisée pour la plupart des périodes serait environ de 300 plt/m², dont le rendement atteint les 29 qx/ha dans le scénario B2 et les 32 qx/ha en scénario A2.

2-3- Effet des techniques culturales sur le rendement

Des techniques culturales sont réalisées pour maximiser le rendement dans le futur. Ayant le type de sol, la variété du blé dur utilisée, les conditions climatiques qui caractérisent chaque période, ainsi que la densité et les dates de semis propre à chaque période de scénario, nous avons utilisé les combinaisons des techniques culturales à partir d'une fertilisation, irrigation et travail du sol. Ces combinaisons sont toujours comparées à un témoin incluant l'ensemble des techniques.

La nouvelle structure comprend :

- deux apports azotés de 50 kg/ha de type urée, l'un au stade de début de tallage et l'autre au stade épiaison ;
- un apport d'eau de 20 mm/ha est apporté au stade levé ;
- deux interventions de travail du sol à des dates différentes.

Rappelant que cette structure a été obtenue à partir de plusieurs essais faits par le modèle STICS. Les résultats sont exposés sous forme des histogrammes :

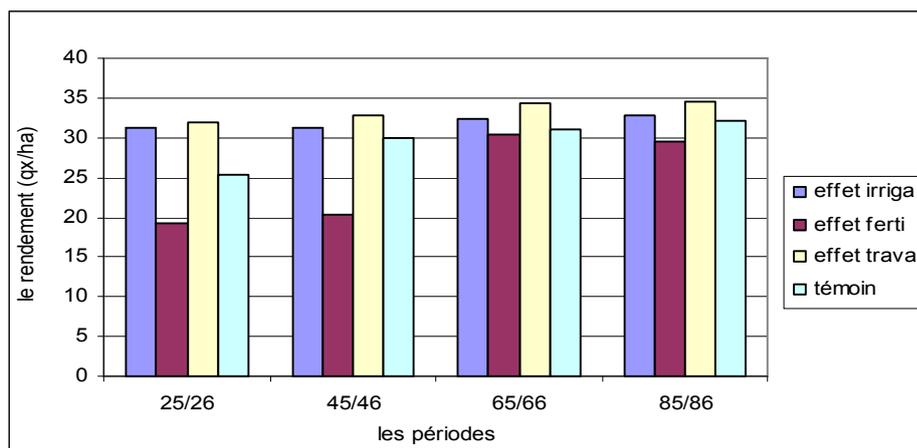


Figure. 44 - Effet des techniques culturales sur le rendement du scénario A2

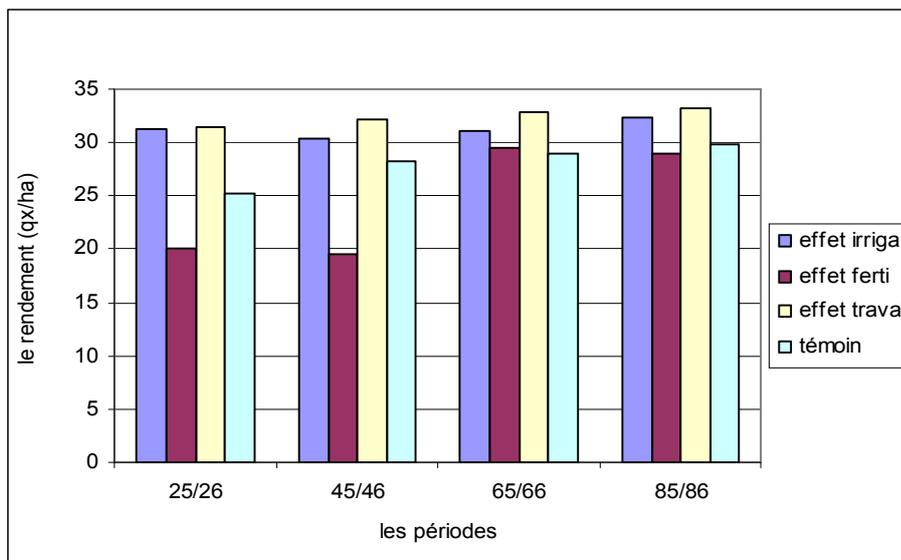


Figure. 45 - Effet des techniques culturales sur le rendement du scénario B2

D'après ces figures, toutes les techniques réalisées auraient les mêmes tendances pour les différentes périodes des scénarios:

- La fertilisation : l'augmentation du rendement dans le futur montrerait l'importance de la fertilisation azotée durant les deux premières périodes par rapport au témoin. Les résultats signifient que la fertilisation azotée est l'un des principaux éléments de l'intensification du rendement durant ces périodes de chaque scénario, en effet sans fertilisation azoté (deux apports azotés de 50 kg/ha l'un au stade de début de tallage et l'autre au stade épiaison) le rendement n'atteindrait que les 20 qx/ha en moyenne par rapport au témoin qui pourrait arriver à 25 qx/ha.

Durant les deux dernières périodes, cet effet sera moins important, le manque d'apport d'azote montrera une légère différence par rapport au témoin, qui pourrait être compenser par la teneur élevée en CO₂ dans l'atmosphère durant la fin du siècle qui affecterait la fertilité du sol. Selon Robert (2002), la séquestration du carbone par les terres agricoles aura un impact direct sur la qualité, et la fertilité des sols agricoles.

-L'irrigation: notre résultat montre que l'effet de cette technique serait moins important que celui de la technique précédente ; l'élimination de l'apport des 20 mm au stade levé pourrait améliorer légèrement le rendement durant toutes les périodes de chaque scénario. Cela conduit à dire que les apports de pluie pourront satisfaire les besoins de la culture ; un indice de stress hydrique égale à 1 durant toutes les périodes des deux scénarios.

- Le travail du sol: la simulation sans travail du sol nous a permis de prédire une augmentation du rendement par rapport au témoin. Selon Oussible et Bourarach (1998), le travail minimum et le zéro travail sont très préconisés pour la conservation de l'eau dans les zones arides et semis arides, raison pour laquelle nous pourrions éliminer les deux interventions de travail du sol, afin d'améliorer le rendement de l'ordre de 34 qx/ha durant les dernières périodes du scénario A2 et de l'ordre de 33 qx/ha à celui du B2.

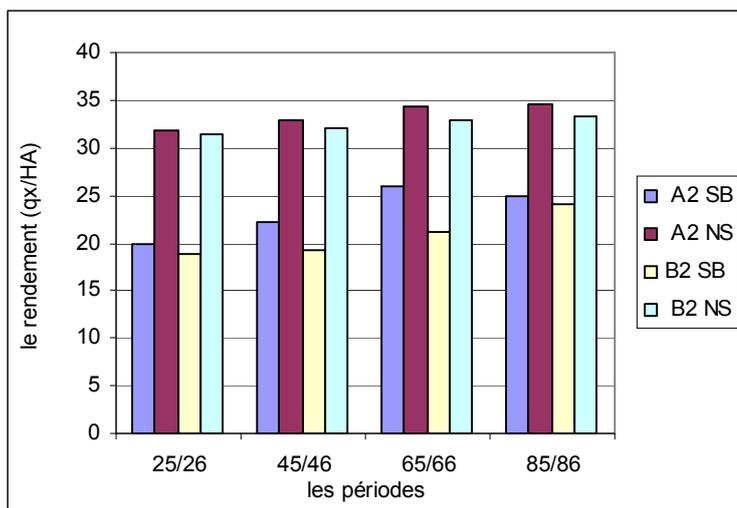


Figure. 46 - Comparaison entre le rendement de structure de base et celui de la nouvelle structure

On peut conclure que le raisonnement des techniques culturales pourra améliorer le rendement de 30 % et de 35.8 % en moyenne environ pour le scénario A2 et B2 par rapport à la structure de base (fig. 46). C'est le cas pour le travail du sol et l'irrigation qui seront raisonnés globalement pour les deux scénarios.

Conclusion et perspectives

Conclusion et perspectives

Nécessaires aux études d'impact pour la production agricole, les simulations sont limitées par la variabilité des conditions du temps telles que les amplitudes des températures journalières, des précipitations et de la couverture nuageuse.

Ce travail a conduit à mettre en relation l'ampleur de cette variabilité des conditions climatiques avec la production du blé dur dans une région semi-aride, en l'occurrence la région de Chlef. Ceci est en accord avec les propositions de certains auteurs qui ont montré que le changement climatique aura des conséquences négatives sur la production culturale et en désaccord avec d'autres qui affirment un résultat contraire. (Rozenzweig et Tubiello, 1997, Bindi et Moriondo, 2005)

En effet, cette étude a permis de réaliser une approche des impacts possibles du changement climatique, à l'aide du modèle STICS, qui peut être forcé par des variables d'entrée provenant des scénarios climatiques ; ces derniers sont simulés par les modèles de circulation générale sur la région d'étude.

Pour cette raison nous avons pris en compte deux scénarios A2 et B2 (les seuls à avoir été utilisés pour les simulations climatiques dans le modèle GCM) dont chacun est subdivisé en quatre périodes : 2021-2030, 2041-2050, 2061-2070 et de 2081-2090. Les scénarios ont permis d'effectuer des prévisions pour chacune des périodes, en voici les principaux résultats :

- Une augmentation du rendement de blé dur durant toutes les périodes de simulation en effet le rendement accroîtrait de l'ordre de 44% pour le scénario A2, et de 37.5 % pour le scénario B2 en moyenne par rapport au rendement moyen observé durant la dernière décennie de 1996 jusqu'à 2007.

- Un avancement des différents stades phénologiques serait accompagné d'un raccourcissement du cycle de croissance de l'ordre de 19 % par rapport aux dates observées ;

- Les apports journaliers de précipitations satisferaient les besoins de la plante en eau donc aucun stress hydrique ne sera signalé ;

- La disponibilité en azote minérale ne serait pas limitante durant toutes les périodes des scénarios, l'indice de stress azoté équivalent à 1 signifiant l'absence du stress.

Dans le but d'améliorer le rendement et minimiser les effets négatifs du changement climatique attendus, nous avons proposé différents itinéraires techniques :

- Un semis précoce entre le 27 octobre et le 05 novembre garantirait une augmentation du rendement de 33 % par rapport à un semis tardif autour 15 décembre ;

- Une densité de semis de 300 pl/m² couplée à une date de semis précoce semble convenir à augmenter le rendement dans l'ordre de 29 qx/ha à 32 qx/ha en moyenne par rapport à un semis d'une faible densité.

- Le raisonnement des techniques culturales pourrait améliorer le rendement de l'ordre de 30 % et 35.8 % durant les scénarios A2 et B2 respectivement.

Ces pratiques agricoles peuvent être considérées comme une stratégie à adopter pour minimiser les risques de réduction de rendement sous un changement prédit du climat, notamment une hausse du CO₂ atmosphérique et de la température.

Tous ces résultats nous ont conduits à dire que les impacts du changement climatique seraient positifs sur notre région, ce qui se traduirait par une amélioration des conditions climatiques futures.

Les perspectives, limites et recommandation :

- Dans ce travail nous avons présenté le modèle STICS aux gestionnaires agricoles comme un outil d'aide à l'expérimentation. Ceci permettra à l'agriculteur de réfléchir sur ses pratiques agricoles, en tenant compte les interactions du système plante - sols - climat - pratiques culturales.

- L'étude d'impact du changement climatique sur le fonctionnement de la plante exige un très grand nombre de paramètres qui ne sont pas toujours facilement mesurables par l'expérimentation, ce qui limite le processus de simulation.

- De même, la détermination des variables d'entrées dans le modèle STICS et le manque de précision des valeurs des paramètres climatiques et le rôle mal connu des océans et des nuages (Dequé *et al.*, 2005) limitent l'interprétation des résultats de simulation et le fonctionnement de la culture à long terme.

- Les gestionnaires agricoles devront coordonner parcimonieusement le travail du sol et les apports d'eau et d'azote surtout à la fin du siècle pour optimiser le rendement sous les nouvelles conditions climatiques.

— Un semis de blé avancé et plus dense permettra de garantir une densité suffisante en sortie d'hiver.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- ANDI. (2008) – Agence National de Développement de l'Investissement. Monographie de la wilaya de Chlef. Guichet Unique Décentralisé de Blida. Pp. 3-17.
- ABH Cheliff.Zahrez. (2003) - Schéma-Directeur d'Aménagement Hydraulique de la Wilaya de Chlef. *Rapport de synthèse sur l'évaluation des ressources en eau et en sols ; Synthèse Mission I, Chlef*. Pp. 5-13.
- Affholder, F. (2001) - Modélisation de culture et diagnostic agronomique régional. *Mise au point d'une méthode et application au cas du maïs chez les petits producteurs du Brésil Central*. Thèse doctorat, INA. Paris- Grignon. Pp. 231-237.
- Amir, J. and Sinclair, T.R. (1991) - A model of the temperature and solar radiation effects on spring wheat growth and yield. *Field Crops Research* 28. Pp. 47 - 58.
- Antipolis, S. (2007) - Suivi de la stratégie méditerranéenne pour le développement durable. *DEVELOPPEMENT AGRICOLE ET RURAL, Cahier des charges de l'étude régionale « Agriculture et changement climatique » en partenariat avec CHICEM*. Plan Bleu, Centre d'Activités Régionales. Pp.10-17.
- Asseng, S., Turner, N. C., Ray, J. D. and Keating, B. A. (2002) - A simulation analysis that predicts the influence of physiological traits on the potential yield of wheat. *European Journal of Agronomy* 17. Pp. 123-141.
- Bahlouli, F., Bouzarzour, H. and Benmohammed, A. (2005) – Selection of stable and high yielding cultivar of durum wheat under semi-arid condition. *Pakistan Journal of Agronomy* 16. Pp. 360-365.
- Baldy, C. (1981) - Utilisation efficace de l'eau par la végétation en climats Ed : *les Colloques*. Montpellier. Pp.195-198.
- Baldy, C. (1984) - Utilisation efficace de l'eau par la végétation en climats méditerranéens Ed : *les Colloques*. Montpellier. Pp.195-198.
- Barbottin, A. (2004) - Utilisation d'un modèle de culture pour évaluer le comportement des génotypes : Pertinence de l'utilisation d'Azodyn pour analyser la variabilité du rendement et de la teneur en protéines du blé tendre, Thèse doctorat, *Institut Nationale Agronomique*. Paris-Grignon. Pp.115-220.
- Baubion, C. (2004) - Impact du changement climatique sur le bassin de la Seine *Centre d'Informatique Géologique. Ecole des Mines de Paris*. Pp.5-15.
- Belaïd, D. (1996) - Aspect de l'agriculture. *Edition I.N.E.S*. Batna. 205 P. Collection des cours d'agronomie (1996).

- Benaichata, L., Taibi, K et Merrati, A. (2008) - Détection de changements dans les facteurs extrêmes du climat au sud de la méditerranée durant les deux dernières décennies. *Université Ibn Khaldoun de Tiaret*. Pp.6-8. [1. benaichata@mail.univ-tiaret.dz](mailto:benaichata@mail.univ-tiaret.dz).
- Benmohamed, A. (1998) - La production de l'orge et la possibilité de développement en Algérie » *Université de Farhate Abasse, Setif*. Pp.75-80.
- Bernardi, M. et Gomme, R. (2004) – Changements Climatiques et Agriculture Activités de la deuxième année .Développement d'un réseau sur les changements climatiques et l'agriculture pour les pays du bassin méditerranéen. *Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) Service de l'environnement et des ressources naturelles (SDRN), CLIMAGRI*. Pp.1-6.
- Bindi, M. et Moriondo, M. (2005).-Impact of a 2°C global temperature rise on the Mediterranean region. *Agriculture analysis assessment*, In : C. Giannakopoulos, M. Bindi, M. Moriondo, P. Le Sager, & T. Tin, *Climate change impacts in the Mediterranean resulting from a 2°C global temperature rise* , WWF Report. Pp. 54-66.
- Bonjean, A. (2001) - Histoire de la culture des céréales et en particulier de celle du blé tendre (*Triticum aestivum* L.). *Dossier de l'environnement de l'INRA, n°2*. Pp.12.
- Bouazza, Z., Jalil, M., Charfi, R. et Zerouali, A. (2002) - Vulnérabilité et adaptation du secteur irrigué au Maroc aux impacts des changements climatiques, Des Travaux Publics, Casablanca, Maroc Département de l'Environnement; MATHUE, Rabat, Maroc. *Conférence Internationale Organisée à Agadir par l'ANAFID*. Pp.1-13.
- Boufenar, O., Zaghouane, F. et Zaghouane, O. (2006) - Guide des principales variétés de céréales à paille en Algérie (blé dur, blé tendre, orge et l'avoine) I.T.G.C *Première édition*. Pp.23-29.
- Bouthiba, A. (2003) - Comportement de trois variétés de blé dur (*Triticum durum* sp) vis-à-vis du stress hydrique dans la région de Chlef. Thèse magister, Université de Chlef. Pp.28-32.
- Bouthiba, A. et Merabet, B.A. (2005) - L'irrigation de complément du blé dur .Influence de la nature du matériel végétal et de la variabilité climatique interannuelle dans une plaine semi aride d'Algérie. *Ed : Sciences & Technologie C-N°23*. Pp.72-79.
- Bouzerzour, H. et Oudina, M. (1989) - Association de certains caractères morphologiques au rendement grain chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) en conditions semi-arides. *Inst. Nat. Agron. El Harrach.13* .Alger. Pp.157-167.

- Brisson ,N.,Mary ,B., Ripoche ,D., Jeuffroy,M.H., ,F., Nicoullaud B., Gate, P., Devienne-Baret, F., Antonioletti, R., Durr ,C., Richard ,G., Beaudoin ,N., Recous ,S., Tayot ,X., Plenet ,D., Cellier, P., Machet ,J.M., Meynard ,J.M, and Delecolle ,R.(1998) -STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie 18*. Pp.311-346.
- Brisson, N. (2002) - Le cadre conceptuel des modèles de culture. Note Présentée par Michel-Claude GIRARD, correspondant de l'académie, section 7. Unité Climat, Sol et Environnement. INRA -Avignon .E-mail : brisson@avignon.inra.fr Pp.1-6.
- Brisson, N., Bonhomme, R., Ameglio, T., Gautier H., Olioso A.et Drouet, J L. (1997) - Modèle de culture : simulations sous contraintes à partir d'un potentiel de production. *INRA, Département de Bioclimatologie, Service de Formation Permanente, Tome 2: du couvert végétal à la petite région agricole*. Écoles chercheuses INRA en bioclimatologie. Pp.39 -52.
- Brisson, N., Déqué, M., Diaz, R., Ducharma, A., Juin, S., Labon Vallet, S. (2005) - Utilisation des scénarios de changement climatique dans un model de culture. Séminaire STICS, 17-18 mars 2005.Cany-le-Rouet. France. Pp.1-6.
- Brisson, N., Gary,C., Justes,E., Roche,R., Mary,B., Ripoche,D., Zimmer,D., Sierra,J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussièrè, F., Cabidoche ,Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillèrè, J.P., Maraux ,F., Seguin ,B, and Sinoquet, H.(2003) - An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy 18*, pp. 309- 332.
- Brisson, N.et Delecolle, R. (1991) - Développement et modèles de simulation de culture. *Agronomie 12*. Pp.253-263.
- Brisson,N., Ruget,F., Gate, P., Lorgeou,J., Nicoullaud ,B., Tayot ,X., Plenet, D., Jeuffroy ,M.H., Bouthier, A., Ripoche, D., Mary, B. and Justes,E. (2002) - STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and corn. *Agronomie 22*. Pp. 69-93.
- CCLS. (2008) – Coopération des céréales et des légumes secs ; Fiche technique culturelle des céréales, Chambre d'Agriculture .Chlef.
- Chehat, F. (2007) - Analyse macroéconomique des filières, la filière blés en Algérie. Projet PAMLIM « Perspectives agricoles et Agroalimentaires Maghrébines Libéralisation et Mondialisation » Alger. Pp.7-9.

- Christian, R. (2005) - Contribution à la climatologie du Luxembourg Analyses historiques, scénarios futurs. Luxembourg, *Travaux scientifiques du Musée national d'histoire naturelle Luxembourg, Ferrantia. 43*. Pp.12-24.
- CIC. (2000) - Rapport annuel des conseils international des céréales « CIC » pour l'année 2000. Pp.1-3.
- CIC. (2007) - Rapport annuel des conseils international des céréales « CIC » pour l'année 2007. Pp. 5-7.
- Deniaux, P.h. (2000) - Les scénarios d'émission, *Les enjeux de l'environnement .Outils et ressources*. Pp.1-4.
- Denoux, E., Cassou Ch. et Valcke, S. (2003) - Les modèles de circulation générale. *Les enjeux de l'environnement .Outils et ressources*. Pp.1-2.
- Déqué, M., Jones, R.G., Wild, M., Giorgi, F., Christensen, J.H., Hassell, D.C., Vidale, P.L., Rockel, B., Jacob, D., Kjellström, E., De Castro, M., Kucharski, F., Van den Hurk , B.(2005) - Global high resolution versus Limited Area Model climate change projections over Europe: quantifying confidence level from PRUDENCE results. *Climate Dyn 25*. Pp.653-670.
- Diarra, D. Z. (2001) – Rapport de stage sur le downscaling avec le modèle spécial régionale de prévision, Direction Nationale de la Météorologie. Bamako, Mali centre Africain pour les applications de la météorologie au développement. Pp.1-17.
- Drake, B.G., Gonzalez-Meler, M.A., Long, S.P. (1997) - More efficient plants: a consequence of rising atmospheric CO₂? *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology 48*. Pp. 609-639.
- Durutan, N.,Guler, M., Karaca, M. et Yilmaz, B.(1990)- Les recherches sur le blé, *Agricultures méditerranéennes N°1*.Turquie. Pp. 277-278.
- Emberger, L. (1955) - Une classification biogéographique des climats. Rech. Trav Lov.Géol. Bot. Zool. Fasc. Sci. Montpellier. 47 P.
- Enright, W. (2001) - Changement d'habitudes, changement climatique : Analyse de base Institut canadien de la santé infantile. Canada. Pp. 9-39.
- FAO. (2004) - Cultures et Pénuries alimentaires *Rapport N°1*, février 2004. Pp. 3-5.
- FAO. (2007) - Perspectives de l'alimentation, *Rapport N°5*. Rome. 7 P.
- Feliachi, K. (2000) - Programme de développement de la céréaliculture en Algérie. Dans : Acte du premier symposium international sur la filière blé 2000 - *Enjeux et stratégies, Alger (Algérie)*. Pp. 21-27.

- Gallais, A. et Bannerot, H. (1992) - Amélioration des espèces végétales cultivées –Objectifs et critères de sélection, *Ed : INRA éditions*. Paris.768 P.
- Garcia de Cortazar atauri, I. (2006) - Adaptation du model STICS à la vigne (*Vitis vinifera* L.). Utilisation dans le cadre d'une étude d'impact du changement climatique à l'échelle de la France, *Thèse doctorat*. Pp.100-152.
- Garcia de Cortázar Atauri, I., Brisson, N. et Seguin, B. (2004) - Estimation de l'impact du changement climatique sur les résultats agronomique de la vigne avec le modèle STICS. *Actes Mondiat, ITV ed*. France. Pp.12-15.
- Gate, Ph. (2007) - Avancer les semis pour éviter la séc. *Perspectives Agricoles* n°337, pp.1-2.
- GIEC. (1995) - Climate Change., 1995 -The science of climate change. Houghton ,J.T.,Meira Filho ,L.G, Callender, B.A.,Harris ,N.,, Kattenberg ,A.,Maskell ,A (eds). *Cambridge University Press*, Cambridge. 22 P.
- GIEC. (1996) - Deuxième rapport d'évaluation du GIEC - Changements climatiques 1995. *Rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat*. Genève, pp 64-50, site internet du GIEC <http://www.ipcc.ch>.
- GIEC. (2000) - Rapport spécial du Groupe de travail III, Scénarios d'émissions, Résumé à l'intention des décideurs. OMM, PNUE, Préparé par N. Nakicenovic, O.Davidson, G.Davis, A. Grubler, T. Emilio et al. 27 P.
- GIEC. (2001) - Climate Change. The Scientific Basis. Contribution du Groupe de travail I au Troisième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, N.Y., É.-U.881 P.
- GIEC. (2007) - 4ème rapport du Le quatrième rapport d'évaluation du GIEC ou « Climate change 2007 ». Pp. 6-10.
- González-Camacho, J. M., Claude Mailhol, J., Ruget, F. (2005) – L'évolution attendue du déficit en eau estivale dans la vallée de la Drome et conséquence sur l'agriculture irriguée. Pp.1-5.
- Hadria, R. (2006) - Adaptation et spatialisation du model STICS pour la gestion d'un périmètre irrigué en milieu semis aride .Thèse Doctorat. .Université Cadiayyad .Faculté des sciences Semalalia-Marahache. Pp. 6-23.
- Hamadache, A. et Kouider, D. (2004) - La filière céréalière en Algérie. Intégration productions agricoles et productions agro-alimentaires.Alger. Pp.5-6.

- Hanks, R.J., Klute, A. et Bresler, E. (1969) - A numeric method for estimating infiltration, redistribution drainage and evaporation of water from soil. *Water Resour. Res.* 5(5). Pp. 1064-1069.
- Hartwell allen, J.R., Barker J. T. et Boote, K.J. (1997) – Effet fertilisant du CO₂ : Production et rétention accers d'hydrate de carbone en terme du rendement en biomasse et en grain .Archives de document de la FAO site [http://www.fao .org](http://www.fao.org)- Archives de document de la FAO
- Hulme, M., Wigley ,T. M. L., Barrow ,E. M., Raper ,S. C. B., Centilla ,A., Smith ,S. and Chipanshi ,A.C.(2000) - Using a Climate Scenario Generator for Vulnerability and Adaptation Assessments: MAGICC and SCENGEN Version 2.4 *Workbook, Climatic Research Unit, UEA, Norwich*. Pp. 3-7.
- Idso, S.B. (1991) - A general relationship between CO₂-induced increases in net photosynthesis and concomitant reductions in stomatal conductance. *Environmental and Experimental Botany* 31. Pp. 3381- 383.
- INRA. (2002) – STCS: Conception et formalismes,
<http://www.avignon.inra.fr/stics/accueil/accueil.php>
- Jamieson, P .D., Porter ,J., Goudriaan ,J., Ritchie, J .T., Van Keulen ,H. and Stol, W.(1998) - A comparison of the model AFRCWHEAT2, CERES-Wheat, Sirius, SUCROS2 and SWHEAT with measurements from wheat grown under drought. *Field Crops Research*.55. Pp. 23 - 44.
- Jancovici, J M. (2004) - Le réchauffement climatique : Réponses à quelques questions élémentaires. Site internet: <http://manicore.com>
- Jeuffroy, M .H. et Bouchard, C. (1999) - Intensity and Duration of Nitrogen Deficiency on Wheat Grain Number. *Crop Science* 39. Pp. 1385-1393.
- Jeuffroy, M H., Barré, C., Bouchard, C., Desmotes-Mainard, S., Devienne –Barret, F., Girard, M.L. and Recous, S. (2000)- Fonctionnement d'un peuplement de blé en condition de nutrition azotée sub-optimale. *In: Fonctionnement des peuplements végétaux sous contraintes environnementales*. INRA, Paris. Pp. 3-10.
- Jeuffroy, M. H. and Recous, S. (1999) - Azodyn: a simple model simulating the date of nitrogen deficiency for decision support in wheat fertilization. *European Journal of Agronomy* 10. Pp. 129-144.
- Kara, K. M. (2008) - La menace climatique en Algérie et en Afrique, Les inéluctables solutions. Pp.212-215.

- Kimball, B.A. (1983) -Carbon dioxide and agricultural yield: an assemblage and analysis of 430 prior observations. *Agronomy Journal* 75. Pp. 779-788.
- Kimball,B.A., Mauney, J.R., Nakayama, F.S., Idso,S.B.(1993) - Effects of increasing atmospheric CO₂ on vegetation. *Vegetatio*. 104/105. pp. 65-75.
- Ktz, R .W.,Brown ,B. J.(1992) - Extreme events in a changing climate, *Climatic Change* 279. Pp. 289-302.
- Le Treut, H. (1999) - L'augmentation anthropique des gaz à effet de serre, un problème global. <http://www.agora21.org/mies/chan-clim1.html>
- Lebonvallet, S. (2002) - Simulation de l'azote chez le blé dur et impacte de changement climatique. Mémoire de diplôme d'étude approfondis, Ed : Institut national agronomique, Paris Grignon. Pp. 152-163.
- Lemaire, G., Gastal, F., Plénet, D. (1997) - Dynamics of N uptake and N distribution in plant canopies. Use of crop N status index in crop modelling. *In: Diagnostic Procedures for Crop N Management. Eds G Lemaire and I G Burns.INRA.Paris.* Pp. 15-29.
- Lev-Yadun, S., Gopher, A. et Abbo, S. (2000) - The cradle of agriculture, *Science* 288. Pp. 1602-1603.
- Levet, t. (2006) – Impact des changements climatiques sur la production des prairies en France .Mémoire de fin d'étude. Pp.1-7.
- Machenhauer,B., Windelband, M., Botzet ,M., Christensen, J. H., Deque, M., Jones ,R., Ruti P.M. and Visconti ,G.(1998) -Validation and analysis of regional present-day climate and climate change simulations over Europe. *MPI Report No. 275, MPI, Hamburg, Germany.* Pp. 26-30.
- MATE. (2001)- Elaboration de la stratégie et du plan d'action national des changements climatiques : *Communication nationale initiale [soumise à la CCNUCC]*. Mars, 155 p: <http://unfccc.int/resource/docs/natc/algnc1.pdf>
- Matthieu Valé, M. (2006) - Quantification et prédiction de la minéralisation nette de l'azote du sol in situ, sous divers pédoclimats et systèmes de culture français Thèse doctorat : SEVAB (*Sciences Ecologiques, Vétérinaires, Agronomiques et Bioingénieries*), Arvalis. Pp. 24-25.
- Mazoyer, M. (2002) - Larousse agricole –Le monde paysan au XXI^{ème} Ed : *Larousse/VUEF*. Paris. Pp .51-60.

- Mearns, L.O., Giorgi, F., Whetton, P., Pabon, D., Hulme, M. and Lal, M. (2003): -Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Regional Climate Model Experiments DDC of IPCC TGCIA Final Version 2003. Pp. 3-5.
- Ministère d'Agriculture. (2010) - L'Agriculture Algérienne en chiffre Écrit par mouqawal - Mis à jour Février 2010. Pp. 1-2.
- Monteith, J.L. (1996)-The Quest for Balance in Crop Modeling. *Agronomy Journal*.88. Pp. 695 - 697.
- Morancho, J. (2000) - Production et commercialisation du blé dur dans le monde.new challenges .Zaragane : *CIHEAM-IAMZ* .2000. Pp. 29-32.
- Nicholls, N.,Gruza, G.V.,Jouzel, J.,Karl ,T.R.,Ogallo, L.A.,Parker ,D.E. (1996) - Chap 3. Observed climate variability and change. In : Houghton JT, Meira Filho LG, Callender BA, Harris N, Kattenberg A, Maskell A (eds). *Climate Change 1995: The science of climate change. Contribution of working group I to the second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge*. Pp. 137 – 192.
- Oussible, M.et Bourarach, E.H (1998) - Projet de Développement et amélioration de l'installation des céréales d'automne en bour favorable. Volume IV. Synthèse et recommandations. Pp. 41-45.
- Parker, D.E., Horton, .E.B. and Alexander, L.V. (2000) -Global and regional climate in 1999. *Weather* 55. Pp. 188 – 199.
- Passioura, J. B. (1996) - Simulation Models: Science, Snake Oil, Education or Engineering? *Agronomy Journa* 88l. Pp. 690 - 694.
- Pelleti, D.et Vullioud, P. (2004) - Lin d'hiver ou de printemps: une culture à découvrir. Agroscope RAC Changins, CH-1260 Nyon 1 *Revue suisse Agric*. Pp. 109-116.
- Penman, H.L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. *Proc. Roy. Soc. London A*. Pp.120-146.
- Perarnaud, V., Seguin, B., Malezieux, E., Deque, M., Loutau, D. (2005) - Agrometeorological research and applications needed to prepare agriculture and forestry to 21st Century Climate Change. *Climatic change* 70. Pp. 319-340.
- Pindard, A. (2000) - La relation stress hydrique – rendement du maïs - Utilisation d'un simulateur de culture (STICS). Mémoire d'Ingénieur d'Agronomie. Pp. 7-42.
- Planton S. (2003) - A l'échelle des continents : le regard des modèles. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences, Paris*. Tome 335, N°6-7. Pp. 535-543.

- Polcher, J. (2005) - Où et comment mesurer le changement climatique. Ecole National des Ponts et Chaussées Pp. 20-25.
- Porter, J. (1993) - A model of the growth and development of wheat incorporating responses to water and nitrogen. *European Journal of Agronomy* 2. Pp. 69-82.
- Priestley, C.H.B. & Taylor, R.J. (1972) - On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon Weather Rev* *AQO*, 81-92.
- Emberger L., 1954. Une classification biogéographique des climats. Montpellier, Série Bot., n° 7. Pp. 3- 43.
- Rachedi, M. F. (2003) -Les céréales en Algérie – Problématique et option de reforme I.T.G.C, *La céréaliculture N°38*. Pp. 32-38.
- Raunet, M. (2005) - Semis sous couvert végétal et changement climatique. *CIRAD*. Pp. 5-8.
- Ritchie, J.T., Otter, S. (1984) - CERES WHEAT, A user-oriented Wheat Yield Model, and Temple. Robert, N. and Denis, J.B. 1996. Stability of baking quality in bread wheat using several statistical parameters. *Theory and Applied Genetics* 93. Pp.172-178.
- Robert, M. (2002) –La séquestration du carbone dans les sols pour une meilleure gestion du sol. *Rapport sur les ressources en sols du monde. 96*, Institut National de Recherche Agronomique. Paris, France. Pp. 17-27.
- Rosensweig, C., Tubiello, F.N. (1997) - Impacts of global climate change on Mediterranean: current methodologies and future directions, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Climate Change I*. Pp. 219- 232.
- Rousset, N. (2008) - Le commerce international comme stratégie d’adaptation à la rareté des ressources hydriques ? Utilité et application du concept de « commerce d’eau virtuelle » en Afrique du Nord, *Dossier de travail. N° 24/2007*.
- Rousset, N. et Arus, R. (2006) - L’agriculture du Maghreb au défi du changement climatique : quelles stratégies d’adaptation face à la raréfaction des ressources hydriques ? Communication à WATMED 3,3^e conférence internationale sur les Ressources en Eau dans le Bassin Méditerranéen, Liban, 1-3 novembre. France <http://www.upmf-grenoble.fr/lepii-epe>. Pp. 1 -7.
- Rousset, N. et René, A. (2004) - Economie de l'adaptation au changement climatique et l'agriculture dans le bassin de méditerranéen. LEPII-CNRS. Pp.7-12.
- Seguin B., 2004 - Changement climatique et effet de serre. Quelles conséquences pour l'agriculture et la forêt? *Séminaire de l'Ecole Doctorale RP2E-ENSIC*. Nancy, 15-01-2004. Pp.12-20.

- Seguin, B., Brisson, N., Loustou, D., Dupoey, J.L. (2005) - Impact du changement climatique sur l'agriculture et la forêt. Dans « L'homme face au climat ». *Actes du symposium du Collège de France*. Paris. Pp. 177- 203.
- Semenov, M.A. & Brooks, R.J. (1999) - Spatial interpolation of the LARS-WG stochastic weather generator in Great Britain. *Climate Research 11*. Pp. 137-148.
- Semenov, M.A. and Barrow, E.M. (1997) - Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. *Climatic Change 35*. Pp 397-414.
- Semenov, M.A., Brooks, R.J., Barrow, E. M. and Richardson, C.W. (1998) -Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. *Climate Research 10*. Pp. 95-107.
- Shuttleworth, W.J., Wallace, J.S. (1985) -Evaporation from a sparse canopy: an energy combination theory. *Quart. J. Royal Society 111*. Pp. 839-855.
- Sottile, M.F. (2006)- Changements climatiques pour la révision des normes d'efficacité énergétiques dans les nouveaux bâtiments Étude réalisée pour l'Agence de l'efficacité énergétique. Ouranos– 109. Pp.4-5.
- Soussana J.-F. (2001) - Changement climatique : impacts potentiels sur l'agriculture et adaptations possibles (Annexe scientifique). *Economie et stratégies agricoles - Nouveaux enjeux pour l'agriculture*. A. Colin. Paris. Pp.195-222.
- Stöckle, C.O., Donatelli, M. and Nelson, R. (2003) – CropSyst a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy 18*. Pp. 289 - 307.
- Weir, A.H., Bragg, P.L., Porter, J .R. and Rayner, J .H. (1984) - A winter wheat crop simulation model without water or nutriment limitations. *Journal of agricultural Science, Cambridge 102*. Pp. 371-382.
- Whisler ,F. D., Acock ,B., Baker, D. N., Fye, R .E., Hodges, H .F., Lambert ,J. R., Lemmon ,H. E., McKinion, J. M. and. Reddy, V. R.(1986) - Crop simulation models in agronomic systems. *Advances in Agronomy.40*. Pp. 141 - 208.
- Williams, J. R., Jones, C. A., Kiniry, J. R. and Spanel, D. A. (1989) - The EPIC Crop Growth Model. *Transactions of the ASAE 32*. Pp. 497-511.
- Zaaboubi, S. (2007) – Effet comparatifs de deux outils aratoires (Disque- Dents) et de différents précédents culturaux sur les propriétés physiques d'un sol cultivé en céréales dans la région de Timgad. Mémoire magister. Université de Batna. Pp.78.
- Zaghouane, O., Abdellaoui, Z. et Houassine, D. (2006) – Quelles perspectives pour l'agriculture de conservation dans les zones céréalières en conditions algériennes

Options Méditerranéennes, Série A, Numéro 69 ? *Institut Technique des Grandes Cultures* Alger, Algérie. Pp.1-5

Zeghida, A., El Mourid, M., Feliachi, K. et Hadjres, N. (2006) - Guide des principales variétés des céréales. I.T.G.C. Première édition ,62 P.

Annexes

Annexes I- Présentation de la variété utilisée

I-1- Les caractères de la variété Chen's

Caractéristiques culturales

Alternativité : hiver
Cycle végétatif : précoce
Tallage : moyen à fort

Caractéristiques morphologiques

Compacité de l'épi : compact
Couleur de l'épi : blanc à roux pale
Hauteur de la plante à la maturité : 65 à 75Cm

Résistance

Au froid : tolérante
A la verse : résistante
A la sécheresse : moyennement tolérante à la sécheresse

Conditions techniques

Date de semis : mi-novembre à la mi – décembre
Dose de semis (Kg / ha) : 110-150
Fertilisation (u/ ha)
Azotée : 46 à 90
Phosphatée : 46
Potassique : 46

Productivité

Rendement en grain optimal : 35 à 40 qx/ha

Caractéristiques qualitatives

Poids de mille grains (PMG) : moyen
Mitadinage : résistante
Moucheture : résistante

Source I.T.G.C – CNCC ,2006

I-2- D'autres caractères morphologiques

| Caractère code UPOV | Désignation du caractère | Niveau d'expression |
|------------------------|--|-----------------------|
| 1 | Coléoptile : pigmentation anthocyanique | - |
| 2 | Première feuille : pigmentation anthocyanique | - |
| 3* | Plante : port au tallage | Dressé |
| 4 | Plante : fréquence des plantes ayant la dernière feuille | Nulle à très faible |
| 5* | retombante | |
| 6* | Epoque d'épiaison (premier épillet visible sur 50% des | Précoce |
| 7* | plants | |
| 8 | Dernière feuille : glaucescence de la gaine | Fort |
| 9 | Dernière feuille : glaucescence du limbe | Faible |
| 10* | Barbe : pigmentation anthocyanique des points | Nulle à très faible |
| 11* | Tige : pilosité du dernier nœud | Nulle à très faible |
| 12* | Tige : glaucescence du col de l'épi | Moyenne |
| 13 | Epi : glaucescence | Moyenne |
| 14* | Plante : hauteur (tige, épi et barbes) | Courte |
| 15 | Distribution des barbes | Sur toute la longueur |
| 16 | Barbes dépassant l'extrémité de l'épi | Plus longues |
| 17 | Glume inférieure : forme (épillet au tiers moyen de l'épi) | Ovoïde |
| 18* | Glume inférieure : forme de la troncature | Echancrée |
| 19 | Glume inférieure : largeur de la troncature | Etroite |
| 20* | Glume inférieure : longueur de bec | moyenne |
| 21 | Glume inférieure : forme du bec | Droit |
| 22* | Glume inférieure : pilosité de la face externe | Présente |
| 23* | Section de la paille | Peu paisse |
| 24 | Barbes : couleur | Noire |
| 25* | Epi : longueur à l'exclusion des barbes | Court |
| 26 | Epi : pilosité du bord | Nulle très faible |
| 27* | Epi : couleur | Blanc |
| 28 | Epi : forme en vue de profil | Pyramidal |
| 29 | Epi : compacité | Compact |
| 30 | grain : forme | Demi –allongé |
| 31* | grain : longueur des poils de la brosse (vue dorsale) | Courtes |
| | grain : coloration au phénol | Faible |
| | type de développement | - |

(*) Caractère obligatoire

Source I.T.G.C – CNCC, (2006)

I-3- Présentation des dates observées des différents stades phénologiques du blé dur

| Stade phénologique | Date | Jour julien |
|--------------------|-------|-------------|
| Semis | 15/11 | 319 |
| Levée -03 feuilles | 07/12 | 341 |
| Tallage | 10/02 | 406 |
| Montaison | 09/03 | 433 |
| Epiaison | 29/03 | 453 |
| floraison | 10/04 | 465 |
| Maturité | 05/06 | 521 |
| Récolte | 08/06 | 524 |

Source (C.C.L.S, 2008)

I-4- Les stades de développement de la plante selon STICS (source INRA, 2002)



Annexes II- Propriétés physiques et chimiques du sol

| <u>Granulométrie du sol</u> | <u>Teneur</u> |
|------------------------------------|-----------------------|
| Argile | 33.79% |
| Limon fin | 12.94% |
| Limon grossier | 26.43% |
| Sable | 15.57% |
| Sable grossier | 9.25% |
| Densité apparente | 1.34g/cm ³ |
| <u>Paramètres chimiques</u> | <u>Teneur</u> |
| PH | 8.09 |
| Azote total | 0.124 |
| Calcaire total | 28.56 |
| Carbone | 1.58 |
| Matière organique | 3.01 |
| Le rapport C/N | 12.23 |
| CE ms/cm | 2.9 |

Source (Bouthiba, 2003)

Abstract

The scenarios of climate change globally announce an increase in average temperature, a decrease in summer rainfall in low and middle latitudes and an increase in demand for water around the tropics. In such circumstances, what will the potential impacts of these changes on durum wheat, particularly in the region of Chlef? Region known for its sub-arid climate.

For this, we used the outputs of a GCM as input data in the simulation model STICS crop development. This model requires daily climate data such as minimum temperatures, maximum temperatures, precipitation and global radiation. Generator allows stochastic climate data LARS-WG; we were able to generate outputs to the proper resolution. We have integrated these new series in the STICS model whose main purpose was to assess the impact of climate change on the yield of durum wheat. Simulations with the STICS model has been realized, they believe yield increases of around 44% on average for the A2 scenario, while the B2 scenario would be around 37.5% on average. This increase is attributed to the high concentration of CO₂ leveling the atmosphere, which would result in an increase in photosynthesis, this would ensure the improvement of efficiency of conversion of intercepted radiation into biomass.

Keywords: climate change, simulation, scenario, STICS, grains yields, durum wheat

ملخص

سيناريوهات تغيير المناخ على الصعيد العالمي تعلن زيادة في متوسط درجات الحرارة وانخفاض هطول الأمطار الصيفية في خطوط العرض المنخفضة والمتوسطة وزيادة في الطلب على المياه في جميع أنحاء المناطق المدارية، في مثل هذه الظروف، ما هي الآثار المحتملة لهذه التغييرات على القمح الصلب، وخاصة في منطقة الشلف؟ المنطقة المعروفة بمناخها القاحل.

لهذا استعملنا نواتج نموذج الدوران العامة وإدخالها في نموذج محاكاة نمو المحاصيل STICS. هذا النموذج يتطلب البيانات اليومية للمناخ، مثل درجات الحرارة الدنيا والقوى والأمطار والإشعاع العالم. نواتج نموذج الدوران العامة لها رؤيا غير واضحة للأمكنة، وفضل مولد للبيانات العشوائية للمناخ (LARS-WG) قمنا بإعادة توليد بيانات أخرى ذات رؤيا واضحة في إطار مختلف سيناريوهات انبعاث غازات الاحتباس الحراري. هذه النتائج استخدمت فيما بعد كمعطيات لنموذج محاكاة تطوير المحاصيل STICS والهدف الرئيسي هو تقييم أثر تغيير المناخ على إنتاج القمح الصلب في منطقة الشلف. المحاكاة التي أجريت على نموذج المحاصيل STICS، أظهرت زيادة في المحصول بنحو 44% للسيناريو A2 وحوالي 37.5% للسيناريو B2 في المتوسط، هذه الزيادة في المحصول متصلة بزيادة تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي والتي أدت إلى زيادة التركيب الضوئي للنبات، هذه الأخيرة أدت بدورها إلى تحسين فعالية تحويل الإشعاع العام إلى كتلة حيوية للنبات.

الكلمات الرئيسية: التغييرات المناخية، المحاكاة، السيناريو، STICS، المرود، القمح الصلب.