



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعريريج

Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi- B.B.A.

كلية علوم الطبيعة والحياة وعلوم الارض والكون

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers

قسم العلوم الفلاحية.

Département des Sciences Agronomiques



Mémoire

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie.

Filière : Sciences Agronomiques.

Spécialité : Amélioration des plantes.

Intitulé

**Changement climatique en zone méditerranéenne et méthodes
d'estimation de la vulnérabilité des cultures par le biais de la
modélisation et des indices d'aridité.**

Présenté par :

M^{lle}.SERAI Amani.

M^{lle}.DELLIDJ Maroua.

Devant le jury :

Président : M^{me} TABTI Dahbia. MCB..... (Université de **B.B.A**)

Encadrant : M^{me} CHOURGHAL Nacira. MCA..... (Université de **B.B.A**)

Examineur : M^r MAAMRI Khelifa. MCB..... (Université de **B.B.A**)

Année universitaire : 2020/2021

Remerciements

*Nous tenons tout d'abord à remercier **ALLAH** qui nous a donné le pouvoir et la volonté pendant toutes ces années consécutives jusqu'au terme et concrétisation de notre objectif, d'avantage pour persévérer et aller de l'avant.*

Nous remercions nos parents car ce travail représente un petit fruit de leurs souffrances et qui sans eux nous ne pouvons pas traverser ces longues années d'études et de travail.

*Nous tenons à exprimer nos remerciements les plus sincères à notre promotrice **Dr. CHOURGHAL Nacira** d'avoir bien voulu diriger notre travail, et d'avoir donné le meilleur de son savoir et de son aide, ses conseils et sa compréhension, et surtout d'avoir fait preuve de beaucoup de patience toute au long de notre travail.*

*Nous exprimons nos remerciements aux honorables membres du jury :
Mme. TABTI Dahbia pour avoir fait l'honneur de présider le jury de ce travail.
Et nos vifs remerciements à **Mr MAAMRI Khelifa** pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant d'examiner ce mémoire.*

*Nos sincères remerciements à l'ensemble de **tous les professeurs** qui nous ont enseignés et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études, ainsi à nos collègues de **la promotion 2020/2021 Master2, Amélioration des plantes** de l'Université Mohamed El-Bachir El- Ibrahimi.*

Merci à tous ceux qui, de près ou de loin, contribués à la réalisation de ce travail.

AMANI & MAROUA

Dédicace

A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, à toi mon père

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore.

à tous mes sœurs et mon frère AMIR, mes nièces, et mes neveux, je dédie ce travail dont le grand plaisir leurs revient en premier lieu pour leurs conseils, aides, et encouragements.

À mon amie, sœur et partenaire au travail sur les efforts considérables, l'esprit de persévérance et de travail acharné Maroua.

Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagnaient durant mon chemin d'études supérieures, mes aimables amis, collègues d'étude, et frères de cœur...

Seraï Amaní



Dédicace

Je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés je n'arriverais jamais à leurs exprimer mon amour sincère.

À mon cher père, l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect.

À mon adorable mère, la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non âmes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse.

*À mes chers frères : **YOUCEF, KHALED** et sa femme.*

*À mes chères sœurs d'amours : **NASSIMA, HALIMA** et son mari.*

À mes nièces adorés et mon neveu.

*À mon amie et copine qui m'accompagnée dans toutes les étapes de mémoire, sa compréhension et ses efforts tout au long de ce travail ma sœur **AMANI***

À tous mes collègues de la promotion Master2 2020/2021

*À tous personnes qui me connais. Je cite les plus proches de mon cœur : **ANFEL, MIMI, YESMINE 'ASMA'**. Je dédie ce travail.*

MAROUA



Table des matières

| | |
|---|-----|
| Liste des figures..... | i |
| Liste des tableaux..... | ii |
| Liste des abréviations..... | iii |
| Introduction | 1 |
| Chapitre I : Les changements climatiques (CC) en zone méditerranéenne | |
| I.1 Généralités sur le changement climatique | 3 |
| I.1.1. Climat..... | 3 |
| I.1.2. Changement climatique | 3 |
| I.2. Causes naturelles et anthropique du CC | 3 |
| I.2.1. Causes d'origine naturelle..... | 3 |
| A. L'activité solaire..... | 3 |
| B. Périodicité astronomique..... | 3 |
| C. Volcans | 4 |
| D. Les courants océaniques | 4 |
| E. La cryosphère..... | 4 |
| I.2.2. Causes d'origine anthropique | 4 |
| I.2.2.1. Modification de la composition naturelle de l'atmosphère | 4 |
| A. Gaz à effet de serre (GES)..... | 4 |
| B. Les composés chlorés et combustion des énergies fossiles..... | 5 |
| C. Changement dans l'utilisation des terres et la couverture terrestre (Land Use and Land Cover Change (LULCC))..... | 6 |
| I.3. Modélisation du climat et scénarios climatiques (SRES et RCP) | 6 |
| I.3.1. Les modèles climatiques..... | 6 |
| I.3.2. Scénarios climatiques (SRES et RCP)..... | 6 |
| I.3.2.1. Scénarios SRES..... | 7 |
| I.3.2.2. Scénario climatique RCP..... | 10 |

Table des matières

| | |
|--|----|
| I.4. Changements climatiques en zone méditerranéenne..... | 11 |
| I.4.1. Températures | 11 |
| I.4.2. Précipitations..... | 13 |
| I.4.3. Evénements extrêmes..... | 13 |

Chapitre II : Impacts des changements climatiques CC sur les cultures

| | |
|--|----|
| II.1. Modèles de simulation de la croissance des cultures..... | 15 |
| II.1.1 Les modèles simples..... | 15 |
| A. Les modèles biophysiques..... | 15 |
| B. Les modèles statistiques | 15 |
| C. Les modèles agronomiques..... | 15 |
| II.1.2. Les modèles complexes | 15 |
| A. Les modèles écophysologiques..... | 15 |
| B. Les modèles mécanistes | 16 |
| C. Les modèles agro-environnementaux | 16 |
| II.2. Modèles d'étude de l'impact du CC sur les cultures | 16 |
| II.2.1. Impact de la croissance des températures sur les cultures..... | 17 |
| II.2.2. Impact de la croissance du taux de CO ₂ dans l'atmosphère sur les cultures | 17 |
| II.3. Méthodes d'étude de l'effet de la variabilité climatique sur les cultures..... | 19 |
| II.3.1. Développement | 20 |
| II.3.2. Croissance..... | 20 |
| II.3.3. Répartition des assimilât et rendement | 21 |
| II.3.4. Environnement | 21 |
| II.3.4.1. Bilan hydrique | 21 |
| II.3.4.2. Bilan de nutriments..... | 22 |
| II.3.4.3. Paramètres climatiques..... | 22 |
| II.3.5. Itinéraire technique, gestion de la culture et caractéristiques des | |

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| cultivars..... | 22 |
| II.3.6. Méthodologie d'application dans les études d'impact du changement climatique..... | 23 |
| Chapitre III : Vulnérabilité de l'agriculture méditerranéenne | |
| III.1. Ressources en eau pour l'agriculture (quantité et qualité) | 25 |
| III.1.1. Qualité d'eau | 25 |
| III.1.2. Quantité d'eau..... | 25 |
| III. 2. Agriculture pluviale..... | 26 |
| III.3. Etude de la vulnérabilité au moyen des indices d'aridité : indice de Martonne, le coefficient d'Emberger et l'indice ombro-thermique de Gausсен.... | 26 |
| III.3.1. Indice de de MARTONNE..... | 26 |
| III.3.2. Indice d'aridité de BAGNOULS GAUSSEN..... | 27 |
| III.3.3. Le coefficient d'Emberger..... | 28 |
| Conclusion..... | 29 |
| Références Bibliographiques..... | 31 |
| Résumés | |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure.1 Evolution des émissions de CO ₂ annuelles mondiales en gigatonnes selon les Scénarios RCP 2,6, RCP 4,5, RCP 6,0, et RCP 8,5 | 10 |
| Figure.2 Evolution des concentrations atmosphériques moyennes de gaz à effet de serre | 11 |
| Figure.3 Le réchauffement de l’atmosphère (évolution des températures annuelles moyennes par rapport aux moyennes de la période 1880-1899)..... | 12 |
| Figure.4 Évolution attendue des températures durant les mois d’été sur la période 2081-2100 comparée à la période 1986-2005, sur la base du scénario moyen-bas RCP4.5..... | 12 |
| Figure.5 Évolution du niveau des précipitations entre avril et septembre, le sud de l’Europe/Méditerranée (30°N à 45°N, 10°O à 40°E) dans le cadre de différents scénario..... | 13 |
| Figure.6 Schéma présentant les différents termes de la respiration de l’écosystème cultural..... | 18 |
| Figure.7 Organigramme schématique d’un modèle de culture théorique fonctionnant au pas de temps journalier..... | 19 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau.1 Evolution des gaz à effet de serre depuis 1750..... | 5 |
| Tableau.2 Les scénarios de projections SRES..... | 9 |
| Tableau.3 Effets d'une sélection de facteurs environnementaux sur les différents processus de la plante et leur utilisation dans la modélisation..... | 23 |

Liste des abréviations

| | |
|------------------------------|---|
| AOGCM | : Modèles de Circulation Générale Océan-Atmosphère |
| CC | : Changement climatique |
| CCNUCC | : Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques |
| CFCs | : Chlorofluorocarbones |
| CNRS | : Centre national de la recherche scientifique |
| CO₂ | : Dioxyde de carbone |
| CH₄ | : Méthane |
| CFC-11 | : Chlorofluorocarbures |
| CF₄ | : Tétrafluorure de carbone |
| ENSO | : El-Niño/Southern Oscillation |
| <i>ET</i> | : Evapotranspiration Réelle de la culture |
| <i>ET₀</i> | : Evapotranspiration de référence |
| <i>ET_c</i> | : Evapotranspiration de la Culture dans les conditions optimales de culture |
| FAO | : Food and Agriculture Organisation |
| GCM | : Globale Climate Model |
| GES | : Gaz à effet de serre |
| GHG | : Green House Gases |
| GIEC | : Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat |
| HAB | : Harmfulalgae blooms – Efflorescences algales nuisibles |
| HFC-23 | : Trifluorométhane |
| <i>I</i> | : Irrigations |
| IPCC | : Intergouvernemental Panel on Climat Change |
| LULCC | : Land Use and Land Cover Change |
| MCG | : Modèles de Climat Global |
| NAO | : Oscillations Nord Atlantique |
| OCDE | : Organisation de coopération et de développement économiques |
| <i>P</i> | : Précipitations |
| <i>PAR</i> | : Rayonnement photo synthétiquement actif |
| ppb | : Parties par billions (unité de concentration) |
| ppm | : Parties par millions |
| Ra | : Part autotrophe |
| Raa | : Partie aérienne des plantes |
| Rar | : Partie aérienne des racines |
| RCM | : Regional Climate Model |

Liste des abréviations

| | |
|-------------------------|---|
| RCP | : Representative Concentration Pathway |
| Rh | : Part hétérotrophe |
| RUE | : Efficience d'utilisation du rayonnement |
| SRES | : Special Report on Emissions Scénarios |
| T | : Température |
| Y_a | : Rendement réel |
| Y_m | : Rendement maximum |

INTRODUCTION

Introduction

Les projections climatiques futures pour l'Afrique du Nord indiquent des changements considérables dans la moyenne, la variabilité et les extrêmes de températures et de précipitations au cours du XXI^e siècle, faisant de la région l'un des principaux « points chauds » du changement climatique (**Schilling et al., 2020**). En matière de températures, un réchauffement annuel et saisonnier est systématiquement prévu par divers modèles de circulation globale (GCM) et générale (RCM) (**Bucchignani et al., 2018**) et les températures sont prévues pour augmenter de 4,5 °C en été et de 2,5 °C en hiver dans le scénario optimiste « Representative Concentration Pathways » (RCP4.5) (**Christensen et al., 2013**).

En Algérie, le secteur agricole dépend essentiellement des précipitations et l'agriculture pluviale couvre 98,6 % de la superficie agricole totale (Schilling et al., 2012). La céréaliculture domine le Nord de l'Algérie, et est pratiquée en pluviale sur 97 % de la Surface Agricole Utile (SAU). Cependant, la production dans ce secteur reste faible et ne répond qu'au quart du besoin annuel de consommation estimé à 80 millions de quintaux. Les projections montrent que cette situation va s'accroître encore plus dans le climat futur et indiquent que les sociétés en zone sud du bassin méditerranéen vont vivre des situations d'insécurité alimentaire encore plus graves (**Lobell et al., 2008**). Toutefois, ces situations peuvent être influencées par la prise en considération de l'interaction avec les pratiques culturales (**Ventrella et al., 2012**). Particulièrement le semis précoce semble pouvoir atténuer les effets négatifs du changement climatique futur sur le blé dur en zone sud méditerranéenne (**Lhomme et al., 2009 ; Chourghal et Hartani, 2020**).

Le changement climatique aurait comme conséquences la baisse des rendements agricoles et une augmentation des risques d'insécurité alimentaire et nutritionnelle (**Newman, 2016**). La recherche de stratégies efficaces d'adaptation et d'atténuation constitue un préalable indispensable pour une assurance de la sécurité alimentaire dans le futur. Alors que l'adaptation suppose l'ajustement des pratiques ou activités pour limiter les effets néfastes et profiter des avantages offerts par le processus du changement climatique, l'atténuation consiste à la création des puits à carbone et la réduction des sources d'émission des gaz à effet de serre (**IPCC, 2014**). La connaissance anticipée des probables effets du changement climatique sur les systèmes de production permettra le développement de stratégies efficaces d'atténuation et d'adaptation (**Teka et al., 2013**).

Introduction

A travers ce travail nous proposons une synthèse bibliographique sur le changement climatique en zone méditerranéenne et méthodes d'estimation de la vulnérabilité des cultures par le biais de la modélisation et des indices d'aridité. Nous avons réparti le manuscrit en trois chapitres : le premier chapitre est consacré à introduire les notions de base concernant le changement climatique, ses causes, la modélisation et les scénarios climatiques climatique ainsi que les caractéristiques du climat futur en zone méditerranéenne. Dans le deuxième chapitre nous apportons de l'information sur la modélisation des cultures et son importance. Dans le dernier chapitre nous avons résumé les principales méthodes d'étude de la vulnérabilité au moyen des indices d'aridité.

Chapitre I :

*Les changements climatiques
(CC) en zone méditerranéenne*

I.1. Généralités sur le changement climatique

I.1.1.Climat

Le climat se définit, d'après le site fédéral belge pour une information fiable sur les changements climatiques (2019), comme « l'ensemble des facteurs météorologiques (des variables de surface comme la température, les précipitations et le vent) qui caractérisent un endroit donné, pendant une période donnée. C'est une présentation synthétique du comportement de l'atmosphère au-dessus d'une région donnée, qui s'appuie sur des statistiques à long terme ». Les paramètres qui l'influencent sont parmi tant d'autres la circulation atmosphérique, océanique, le relief et l'énergie solaire (Climat.be, 2019).

I.1.2.Changement climatique

Les changements climatiques désignent une variation statistiquement significative de l'état moyen du climat ou de sa variabilité persistant pendant de longues périodes (généralement, pendant des décennies ou plus). Les changements climatiques peuvent être dus à des processus internes naturels ou à des forçages externes, ou encore à des changements anthropiques persistants de la composition de l'atmosphère ou de l'affectation des terres.

Dans son premier article la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), définit les changements climatiques comme étant des changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours des périodes comparables. » (UNESCO et PNUE, 2015)

I.2. Causes naturelles et anthropique du CC

Les facteurs naturels et anthropiques ont entraîné une forte baisse de la diversité biologique particulièrement de la flore ligneeuse. (SOLLY et al, 2020)

I.2.1. Causes d'origine naturelle

A/ L'activité solaire

Le soleil traverse des périodes de grande activité, qui se traduisent par une augmentation du nombre de tâches solaires, ainsi que par un accroissement du rayonnement, de l'activité magnétique et des flux de particules de haute énergie. Ces fluctuations de l'activité solaire s'effectuent à des échelles, de temps qui peuvent varier de plusieurs millions d'années à quelques minutes (TABET, 2008)

B/Périodicité astronomique

A long terme, l'orbite de la terre autour du soleil est influencée par l'interaction gravitationnelle de la lune et d'autres planètes à l'origine des « forces des marées » (Munk et

al., 2002). Une perturbation de l'orbite terrestre est climatiquement très importante car elle contrôle la distribution saisonnière et latitudinale du rayonnement solaire (**Burroughs, 2007**). Elle peut entraîner des changements climatiques importants à différentes échelles de temps et est considérée d'après plusieurs études à l'origine de l'âge de glace (**Mavi et Tupper, 2004 ; Viner et al., 2006**).

C/Volcans

Les éruptions volcaniques explosives peuvent injecter dans l'atmosphère des millions de tonnes de poussière et de cendre (**Viner et al., 2006**). Cette poussière absorbe le rayonnement solaire et provoque donc un réchauffement des niveaux supérieurs de l'atmosphère (stratosphère), mais induit à l'inverse un refroidissement à faible altitude (**Burroughs, 2007**). L'éruption du Tambora au sud-est de l'Asie par exemple a causé un vaste refroidissement global et une « année sans été » en Europe (**Engvild, 2003 ; Oppenheimer, 2003**).

D/Les courants océaniques

Les courants océaniques jouent un très grand rôle dans le transport d'énergie à plus haute altitude, ce qui signifie que tout changement dans cette composante impliquera inévitablement d'importants changements dans le climat (**Burroughs, 2007**). Ces changements peuvent avoir lieu à une échelle de temps décadaire tel que « l'Oscillation Pacifique Inter-décadaire » (**Viner et al, 2006**), mais peuvent aussi être quasi-annuels tel que « El-Niño/Southern Oscillation (ENSO) » et les « Oscillations Nord Atlantique » (NAO) », où les variations de la température de la surface de la mer et du vent affectent dramatiquement le climat et par conséquent la biosphère (**Tao et al, 2004**).

E/La cryosphère

Le changement de la couverture globale de neige et de glace, mis à part la couverture neigeuse saisonnière, a une action sur le long terme (**Mavi et Topper, 2004**). Les observations depuis 1972 montrent que la couverture neigeuse de l'hémisphère nord a régressé depuis 1987, particulièrement au printemps (**WMO, 1998**). Cela a induit une diminution de l'albédo régional avec en conséquence une augmentation de la température hivernale dans l'hémisphère nord (**Sirotenko,1999**).

I.2.2 Causes d'origine anthropique

I.2.2.1 Modification de la composition naturelle de l'atmosphère

A/Gaz à effet de serre (GES)

L'énergie solaire est le résultat d'un équilibre naturel entre l'énergie entrante et l'énergie sortante, appelée effet de serre. Pour l'expliquer brièvement, le soleil propulse son

énergie vers la Terre dont une partie est gardée sur la surface de la planète et un tiers environ est renvoyé vers l'espace après avoir atteint le sol. La quantité absorbée par la Terre est ensuite renvoyée sous forme de rayons infrarouge et donc de chaleur (ce qui induit son réchauffement). Les gaz présents naturellement dans notre atmosphère détiennent la capacité d'absorber partiellement ces rayons infrarouges, ce qui réchauffe ainsi l'atmosphère. Parmi les sortes de gaz à effet de serre dont le dioxyde de carbone (CO₂), certains peuvent et sont produits artificiellement par l'homme. Lorsque les quantités de gaz carboniques libérées dans l'atmosphère deviennent trop importantes et que la concentration devient anormale, cela modifie les équilibres naturels avec des répercussions négatives à tel point que le climat s'en trouve perturbé(Climat.be, 2019)

B/Les composés chlorés et combustion des énergies fossiles

Les composés chlorés ou chlorofluorocarbones (CFCs) sont des gaz propulseurs d'aérosols qui sont utilisés principalement dans les fluides de nettoyage industriel et dans les équipements de réfrigération. Ils sont susceptibles d'épuiser la couche d'ozone stratosphérique dont la conséquence en est le développement continu du trou d'ozone dans l'antarctique (Burroughs, 2007).

En fait cette couche d'ozone permet d'absorber le rayonnement ultra-violet (Mavi et Topper, 2004) et son épuisement conduit inévitablement à une augmentation du flux de ce rayonnement au voisinage du sol, ce qui influe négativement sur tous les aspects de la vie organique. L'utilisation des hydrocarbures et la combustion de l'énergie fossile quant à elle provoque le dégagement de dioxyde de soufre (SO₂), qui est converti dans l'atmosphère en acide sulfurique et forme alors des aérosols sulfatés qui peuvent être absorbeurs nets de l'énergie solaire réfléchi en surface.

Tableau.1 : Evolution des gaz à effet de serre depuis 1750.

| | CO₂ (ppm) | CH₄ (ppb) | N₂O (ppb) | CFC-11 (ppt) | HFC-23 (ppt) | CF₄ (ppt) |
|---|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| Concentration Préindustrielle (1750) | 280 | 700 | 270 | 0 | 0 | 40 |
| Concentration en 1998 | 365 | 1745 | 314 | 268 | 14 | 80 |
| Temps de séjour Atmosphérique (ans) | | 12 | 150 | 45 | 260 | >50000 |

(Source : Nefzi, 2012)

L'IPCC (2001) estime que 75 % de l'augmentation du taux de CO₂ dans l'air a pour origine la combustion des carburants fossiles, 25 % est plutôt due aux nouvelles utilisations des terres.

C/Changement dans l'utilisation des terres et la couverture terrestre (Land Use and Land Cover Change (LULCC))

L'activité humaine est à l'origine de la modification de la surface terrestre. Le développement des surfaces agricoles et de l'élevage s'est fait aux dépens des forêts. Le changement de la surface terrestre, particulièrement le déboisement et la déforestation à grande échelle, a une incidence sur l'albédo et la rugosité régionale (Mavi et Topper, 2004), ce qui pourra affecter le transfert d'énergie, les ressources en eau et autres composantes du système climatique (Horton et al, 2010).

I.3. Modélisation du climat et scénarios climatiques (SRES et RCP)

Le rythme de l'opinion climatique est régi par les publications de L'IPCC, qui à travers ses rapports d'évaluation du changement climatique trace à chaque fois de nouvelles lignes pour ses activités. Les résultats présentés dans les différents rapports de l'IPCC sont basés sur les observations climatiques réelles ainsi que sur les sorties des modèles de simulation du climat(Chourghal, 2016)

I.3.1 Les modèles climatiques

Les modèles climatiques sont des outils importants permettant d'interpréter les observations ainsi que les interactions entre les composantes climatiques, et d'estimer les évolutions à venir. Ce sont des modèles numériques qui intègrent une suite d'interprétations physiques des composantes climatiques ainsi que leurs différentes interactions essentielles pour reconstruire les grandes tendances climatiques semblables aux observations réelles. Les modèles climatiques analysent les processus climatiques sur la base de points grilles en trois dimensions, à travers lesquelles les flux de masse et d'énergie ainsi que leur stockage sont quantifiés par un ensemble d'équations.(Chourghal, 2016)

I.3.2 Scénarios climatiques (SRES et RCP)

Un modèle climatique est une représentation numérique du système climatique essentiellement basée sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques de ses composants ainsi que sur leurs processus d'interaction, et représentant la totalité ou une partie de ses propriétés connues.(CNRS, 2020)

Divers modèles présentant des degrés de complexités variés peuvent être utilisés pour représenter le système climatique. Des modèles de circulation générale couplés "Atmosphère/Océan" (**AOGCM**) fournissent une représentation générale du système climatique ; néanmoins vu la complexité des interactions et rétroactions entre les composants du système climatique, il y'a une évolution constante qui tend vers l'élaboration de modèles plus complexes à chimie et biologie actives. (**CNRS, 2020**)

En résumé les Modèles de Climat Global (**MCG**) sont des modèles climatiques permettant de simuler la réponse du système climatique à la variation de la concentration des **GES**. Ces derniers utilisent une résolution spatiale qui se situe généralement entre 250 Km et 600 Km, comprenant dans un contexte virtuel 30 niveaux verticaux sous forme de cubes empilés les uns par-dessus les autres, de la surface terrestre jusqu'à la fin de l'atmosphère, renfermant des équations et des caractéristiques propres à chacun (**CNRS, 2020**)

I.3.2.1 Scénarios SRES

Généralement, ils sont obtenus à partir de projections qui sont souvent fondés sur des informations complémentaires provenant d'autres sources ; quatre genres de scénarios sont communément utilisés dans l'étude du changement climatique : le scénario climatique, le scénario d'émissions le scénario de forçage radiatif et le scénario du SRES (Spécial Report on Emissions Scenarios)(**FARAH, 2014**)

La première série de scénarios sont regroupés sous l'appellation "scénarios A1". Ces scénarios reposent sur l'hypothèse d'une croissance économique rapide de l'économie mondiale associée à une croissance de la population mondiale jusqu'au milieu du 21^{ème} siècle, suivie d'une légère baisse de celle-ci et de l'introduction rapide de nouvelles technologies énergétiques efficaces. Les économies régionales se développent fortement et la prospérité est répartie équitablement.

Les scénarios **A1** se subdivisent en trois groupes :

- **En A1F1**, le monde continue principalement de fonctionner avec les combustibles fossiles,
- **En A1T** avec des combustibles non fossiles,
- **En A1B** avec un mélange des deux

Le scénario **A2** quant à lui décrit un monde qui reste divisé. Dans l'ensemble, il n'y a pas de redistribution des ressources naturelles disponibles, des connaissances technologiques et du bien-être entre les régions riches et les régions pauvres.

Chapitre I :..... Les changements climatiques (cc) en zone méditerranéenne

Le scénario **B1** suit le scénario **A1**, mais le monde se tourne plus rapidement vers une économie axée sur les services avec une introduction rapide de technologies propres et durables.

Le scénario **B2** parle d'un monde axé sur la préservation de l'environnement et de l'égalité sociale, mais qui part de solutions régionales en matière de durabilité économique, sociale et écologique(**Chourghal, 2016**)

Tableau.2 : Les scénarios de projections SRES.

| Forces Scénarios | | Technologies Énergétiques | Population mondiale | Environnement | Situation économique |
|---------------------|-------------|---|--|--|---|
| A1 | A1F1 | Basé sur un usage intensif de combustibles fossiles | Atteint son maximum au milieu du siècle et diminue ensuite | Solutions essentiellement technologiques pour protéger l'environnement | Croissance très rapide réduction des différences régionales au niveau du revenu |
| | A1T | Lié à des sources d'énergie autres que fossiles | | | |
| | A1B | Etabli sur un équilibre entre toutes les sources d'énergies | | | |
| A2 | | Progrès technologique hétérogène et lent | Augmentation constant | Divergences dans les solutions | Croissance par habitant fragmenté et lent. Développement à orientation régionale |
| B1 | | Développements rapides des technologies propres fondées sur l'utilisation efficace des ressources | Atteint son maximum au milieu de siècle et diminue ensuite | Solutions mondiale | Croissances très rapides. Economie orienté à la valorisation de services et de l'information |
| B2 | | Développement lent, et différenciés selon les régions | Augmentation régulière | Solution régionale | Niveau intermédiaire de croissance économique, orienté vers les solutions locales |

(Source : FARAH, 2014)

Selon le **tableau 2**, le pire scénario serait le scénario A1F1, ce dernier induirait à un réchauffement plus conséquent que les autres scénarii avec une augmentation de plus de

3,5°C en 2100 ; le scénario B1 quant à lui représente la vision la plus optimiste de ce que serait ce réchauffement avec un peu moins de 2 °C en 2100. (FARAH, 2014)

I.3.2.2 Scénarios climatiques RCP

Le G.I.E.C. envisage 4 différents scénarios (R.C.P.) selon ces émissions et le forçage équivalent estimé : trois scénarios de stabilisation des émissions, RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6 et un scénario qui garde la tendance actuelle, RCP 8.5. **La figure 1**, représente les émissions de CO₂ selon les différents RCPs (lignes) et les catégories de scénarios utilisés en WGIII (les aires colorées montrent une gamme de 5 à 95 %) (IPCC, 2014)

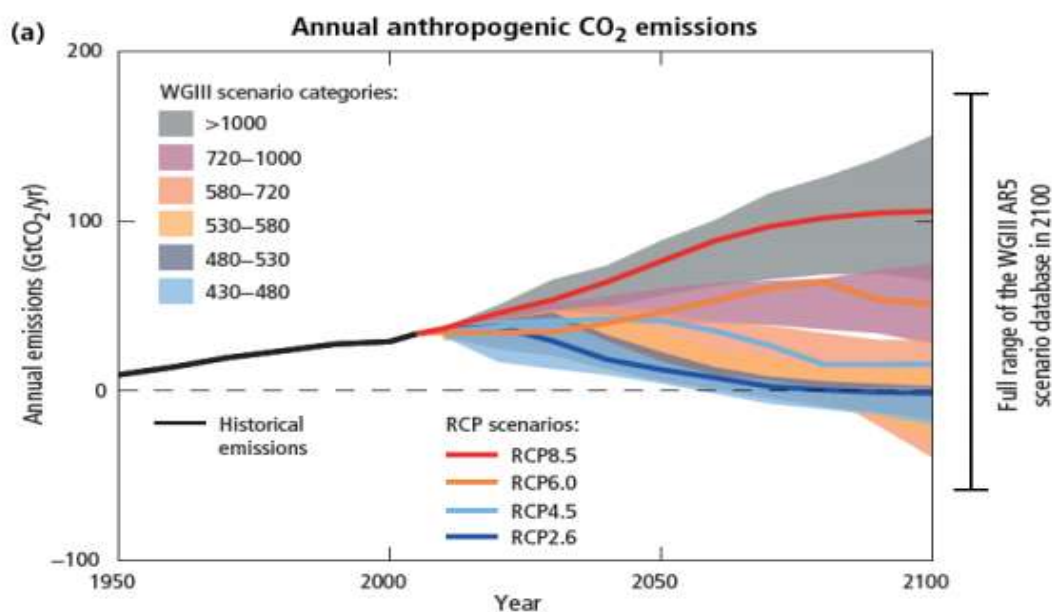


Figure1 : Evolution des émissions de CO₂ annuelles mondiales en gigatonnes selon les Scénarios RCP 2,6, RCP 4,5, RCP 6,0, et RCP 8,5 (IPCC,2014)

Les concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone (CO₂), de méthane (CH₄) et d'oxyde nitreux ou protoxyde d'azote (N₂O) se sont accrues à des niveaux jamais atteints dans les 800.000 dernières années (Van Ypersele, 2017).

La source de ces augmentations est la deuxième révolution industrielle, phénomène qui a commencé dans les années 1850. Le graphique suivant (Figure2) illustre cette nette augmentation. Ces gaz contribuent au réchauffement en absorbant une partie du rayonnement infrarouge émis à la surface de la terre et renvoient celle-ci vers la terre. Ce phénomène est appelé l'effet de serre.

- Légende :**
- Le méthane en ppb.
 - Le dioxyde de carbone en ppm6.
 - Le protoxyde d'azote en ppb5.

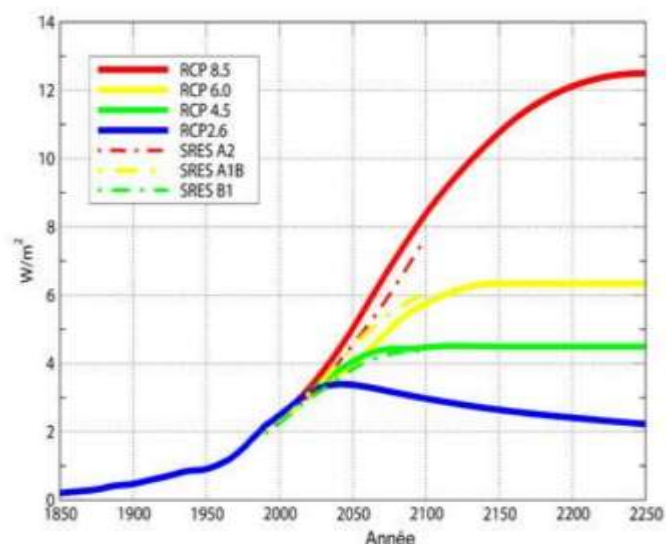


Figure.2 : Evolution des concentrations atmosphériques moyennes de gaz à effet de serre.

(Source : IPCC, 2014).

I.4. Changements climatiques en zone méditerranéenne

Comme son nom l'indique, le climat méditerranéen se rencontre sur les bords de la mer Méditerranée. Il est influencé par les vents chauds venant des tropiques qui provoquent de fortes chaleurs en été. L'hiver est plutôt doux mais il peut être marqué par des phénomènes brutaux comme de violents orages.

Le climat du bassin Méditerranéen est plutôt sec et caractérisé par de longues périodes de sécheresses, mais aussi par des pluies parfois intenses durant les périodes hivernales et automnales. Les rives Sud et Est subissent des températures plus élevées ainsi que des périodes de sécheresses plus intenses ; 80% du volume de leurs précipitations annuelles proviennent des pluies hivernales, contre 30% pour la rive Nord (IRD,2016)

I.4.1. Températures

En région Méditerranée, les températures annuelles moyennes sont aujourd'hui environ 1,5°C au-dessus des moyennes avant la révolution industrielle (1880-1899) et supérieures aux tendances mondiales en matière de réchauffement (+1,1°C) (MedECC,2019)

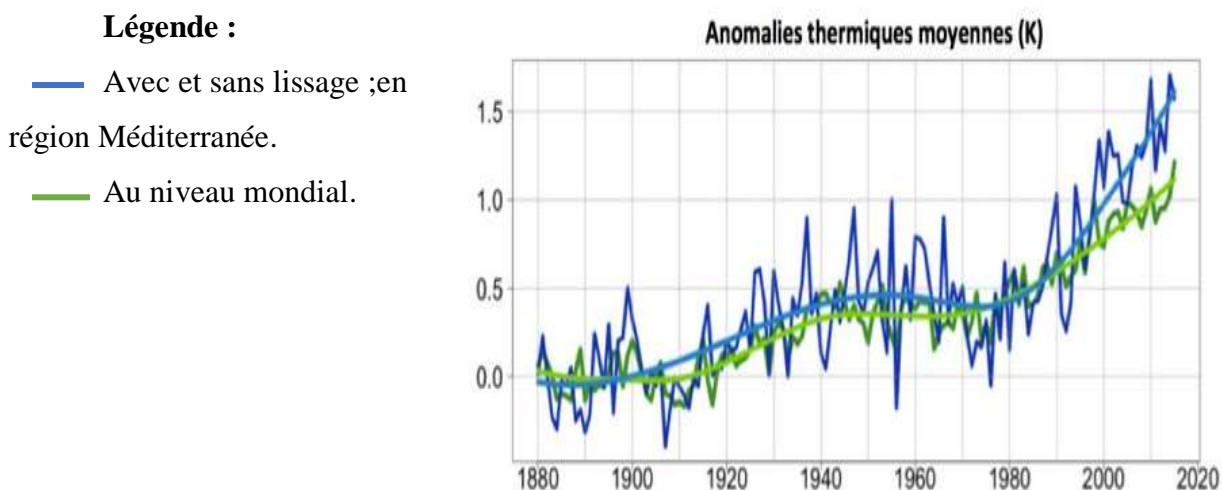


Figure.3 : Le réchauffement de l'atmosphère (évolution des températures annuelles moyennes par rapport aux moyennes de la période 1880-1899)

En région Méditerranée, la température annuelle moyenne est aujourd'hui environ 1,5°C au-dessus de celle de la période 1880-1899 et supérieure à la tendance mondiale en matière de réchauffement (**Cramer et al., 2018**)

Toujours dans cette région, la tendance est de 0,03°C par an, une tendance également supérieure aux tendances mondiales. Sans actions d'atténuation supplémentaires, la température augmentera de 2,2°C (par rapport à la période préindustrielle) en région Méditerranée d'ici 2040, voire de 3,8°C dans certaines régions d'ici 2100 (**Fig.4**). Les périodes estivales seront potentiellement plus impactées par cette augmentation que les périodes hivernales. Des épisodes de fortes températures et des canicules (périodes de chaleur excessive) seront probablement plus fréquents et/ou plus intenses(**MedECC,2019**)

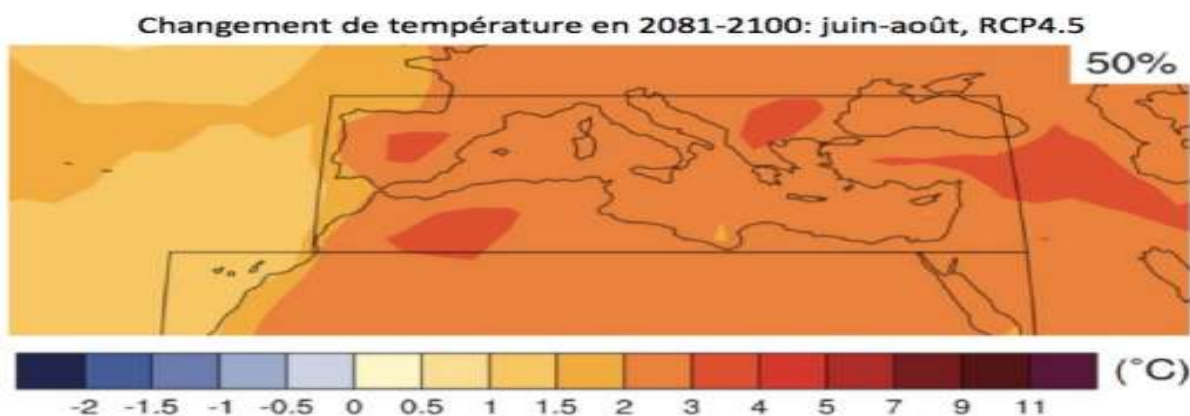


Figure.4 : Évolution attendue des températures durant les mois d'été sur la période 2081-2100 comparée à la période 1986-2005, sur la base du scénario moyen-bas RCP4.5(**IPCC, 2013**).

Pour obtenir un réchauffement comparatif à la période de la révolution industrielle (1880-1899), il convient d'ajouter 0,85°C

I.4.2. Précipitations

Les niveaux de précipitation observés en Méditerranée sont caractérisés par une forte hétérogénéité géographique et temporelle mais les modèles climatiques indiquent clairement une tendance vers une réduction des précipitations dans les décennies à venir (Saadi S et al.,2015).

La baisse des précipitations associées à l'intensification du réchauffement contribue à des tendances fortes vers un assèchement du climat. La fréquence et l'intensité des sécheresses ont déjà sensiblement augmenté en Méditerranée depuis 1950 (Vicente-Serrano et al., 2014).

Une augmentation de la température de 2 à 4°C dans le sud de l'Europe en 2080 provoquerait une baisse importante et généralisée des précipitations pouvant atteindre jusqu'à 30 %, ainsi que la disparition des périodes de gelées dans les Balkans (Forzieri et al., 2014).

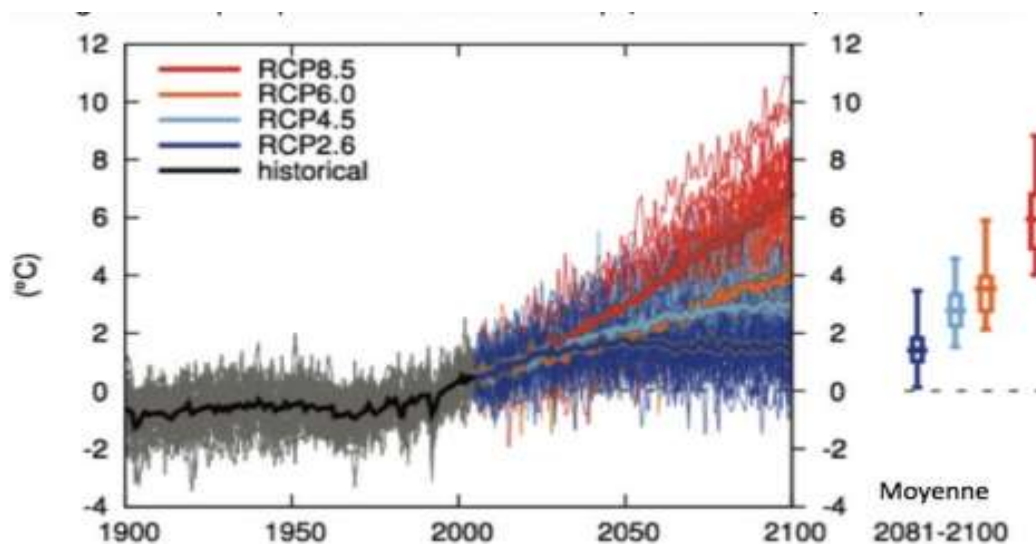


Figure.5 : Évolution du niveau des précipitations entre avril et septembre, le sud de l'Europe/Méditerranée (30°N à 45°N, 10°O à 40°E) dans le cadre de différents scénarios (IPCC ,2013).

I.4.3. Événements extrêmes

Pour décrire les impacts du climat sur le patrimoine culturel, il est indispensable de bien distinguer les événements à survenue rapide :

Les événements à survenue rapide ou événements extrêmes sont de courtes durées, aiguës, intenses, récurrentes, hautement dommageables et incontrôlables. Ils incluent les vents extrêmes, les ouragans, les typhons, les ondes de tempêtes, les précipitations extrêmes, les

Chapitre I :..... Les changements climatiques (cc) en zone méditerranéenne

sécheresses extrêmes, les tempêtes de grêle, les crues subites, les glissements de terrains, les vagues de chaleur, les vagues de froid et les incendies spontanés. Le changement climatique devrait accroître la fréquence et l'intensité de certains de ces types d'évènements à travers le monde (**Lefèvre, 2014**).

Ce sont surtout les évènements extrêmes, en particulier les vents violents, les précipitations extrêmes, les crues subites, les vagues de chaleur et les sécheresses, qui font courir un danger majeur au patrimoine culturel (**Lefèvre, 2014**).

Chapitre II :

*Impacts des changements
climatiques CC sur les cultures*

II.1. Modèles de simulation de la croissance des cultures

Le modèle se définit comme étant la représentation simplifiée d'un processus. Dans le cas étudié, le processus de croissance d'une culture et des échanges avec son environnement est représenté.

Il existe des modèles simples et des modèles plus complexes. Les plus simples sont basés sur des informations statistiques (données météo et connaissances des rendements précédents) en utilisant des fonctions empiriques. Ils ont été exploités à grande échelle pour prédire le rendement des cultures (**Bregaglio et al., 2015**). D'autres modèles mécanistiques, plus complexes, requièrent de nombreuses données d'entrée et leurs sorties sont plus détaillées et spécifiques. Ils se concentrent sur les taux instantanés de chaque processus physiologique lié à l'environnement (**Bregaglio et al., 2015**).

II.1.1 Les modèles simples

A/ Les modèles biophysiques

Certains modèles sont employés pour simuler la croissance et le rendement des cultures, c'est le cas du CROPWAT a été. CROPWAT est un outil d'aide à la décision pour la planification et la gestion de l'irrigation, développé par la FAO (**Smith, 1992**). Il utilise les données climatiques, pédologiques et culturales pour simuler à un pas de temps journalier le bilan hydrique dans le sol, les besoins en irrigation, la production de biomasse et le rendement. (**Zongo, Diarra, Barbier. Et al., 2019**)

B/ Les modèles statistiques

Ils sont construits à partir des lois statistiques, ces modèles sont basés sur des relations comme par exemple la régression à une ou plusieurs variables explicatives. Ils sont simples d'utilisation et permettent d'identifier rapidement les variables explicatives les plus déterminantes (**Gate, 1995**)

C/ Les modèles agronomiques

Induisent les pratiques culturales aux notions physiologiques caractéristiques de la culture comme le modèle STICS (**Brisson et al, 1998**).

II.1.2 Les modèles complexes

A/ Les modèles écophysologiques

Sont basées sur une description fine des processus écophysologiques. Les premiers modèles ne simulaient que le cycle de carbone ensuite ils se sont complexifiés pour intégrer les principaux processus (photosynthèse, respiration, bilan énergétique...etc.), simules au pas de temps journalier, tel est le cas du modèle WOFOST (**Boogard et al., 1998**).

B/ Les modèles mécanistes

Ces modèles sont plus complexes car ils intègrent les principaux processus intervenant dans le système étudié (**El Hassani &Persoons, 1994**). Par exemple, pour les modèles utilisés en écophysiologie, le but est de reproduire les réactions de la plante ou de la culture. Ils sont basés sur des lois et des fonctions physiologiques connues. Différentes données d'entrée viennent alimenter ces modèles : données d'origine interne concernant les propriétés des plantes (génétique, etc.) et des données d'origine externe (données météorologiques, pédologiques, ...) (**Rauff& Bello, 2015**).

C/Les modèles agro-environnementaux

Les préoccupations agro-environnementales (érosion, pollution par les nitrates et les pesticides...etc.), deviennent plus fortes ce qui a fait émerger des modèles tels que EPIC (**Williamset al., 1984**), adapté à la simulation de l'impact de l'érosion des sols sur la production agricole. CROPSYST (**Stockleet al., 2003**), issu d'EPIC, appartient à ce type de modèles ; il simule à la fois l'érosion, la lixiviation d'azote ainsi que les pertes d'azote par volatilisation et dénitrification incomplète.

II.2. Modèles d'étude de l'impact du CC sur les cultures

La répartition géographique des espèces végétales démontre le très fort contrôle que le climat exerce sur la croissance des plantes. Le rayonnement solaire, les valeurs de température et de précipitation et les modèles saisonniers sont essentiels déterminants de la croissance des plantes à travers une variété de mécanismes directs et indirects. D'autres caractéristiques climatiques sont également des influences majeures, telles que la vitesse du vent et fréquence des orages. Il existe un nombre croissant de cas bien documentés de changement dans les écosystèmes en raison du changement climatique récent (et probablement anthropique) (**Walther et al., 2002**).

Dans l'ensemble, le Groupe d'experts intergouvernemental sur Climat Change (**IPCC, 2001**) a conclu que « d'après des preuves collectives, il existe confiance élevée que les récents changements régionaux de température ont impacts sur de nombreux systèmes physiques et biologiques ». Ces récents changements climatiques sont susceptibles de s'accélérer car les activités humaines continuent de perturber le système climatique et de nombreuses revues ont fait des prédictions de conséquences graves pour les écosystèmes (**Izaurrealde et al., 2005**) et pour l'approvisionnement et la sécurité alimentaire (**Easterling& Apps, 2005**).

II.2.1 Impact de la croissance des températures sur les cultures

Les processus physiologiques liés à la croissance, par exemple la photosynthèse et la respiration, ont une température optimale jusqu'à laquelle ils augmentent avant de redescendre. Au contraire, le taux de développement et la progression dans le cycle de vie des cultures ont souvent une réponse strictement linéaire à la température (**Porter et Semenov, 2005**). Ainsi, un changement de température peut avoir comme effet de diminuer les rendements de certaines grandes cultures. (**White et al, 2014**) ont étudié l'effet d'une augmentation de température de 2 à 4°C sur trois prairies canadiennes à différentes proportions de graminées et arbustes, la plupart des espèces étant indigènes. La température ambiante variait entre 13,5 et 16,5 °C selon le site pendant l'expérience et l'augmentation de température était obtenue dans des chambres à ciel ouvert. Dans cette étude, l'augmentation de la température s'est traduite par une diminution de l'accumulation de biomasse totale expliquée majoritairement par une baisse de la proportion de graminées.

Ces effets négatifs se manifesteraient puisqu'une augmentation de la température diminue l'humidité du sol, ce qui limite la croissance de la plante (**Karol et al., 2010**). En effet, il a été estimé que l'évaporation potentielle d'une prairie augmentera de 2 à 3 % pour chaque augmentation de 1°C de température (**Lockwood, 1999**). Par contre, il est important de mentionner qu'il est judicieux de prendre en compte la combinaison de l'amplitude et de la durée de l'épisode de stress thermique ainsi que le stade de développement de la plante lorsque celle-ci subit le stress, et non simplement la température absolue (**Wheeler et al., 2000** In Camille Payant, 2020).

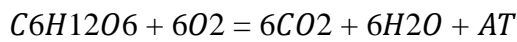
II.2.2 Impact de la croissance du taux de CO₂ dans l'atmosphère sur les cultures

Le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (G.I.E.C) décrit clairement que le climat futur dépend fortement des émissions anthropogéniques de gaz à effet de serre. Ces dernières dépendent à la fois du développement socio-économique (taille de la population, activité économique, niveau de vie, utilisation de l'énergie, utilisation des terres, technologies) et des politiques climatiques (**IPCC, 2014**).

Les plantes consomment le CO₂ en se développant grâce à la photosynthèse. Cependant, la plus importante source biosphérique de dioxyde de carbone est l'ensemble des cultures (**Smith et al, 2012**). Cette source de dioxyde de carbone est le résultat de la respiration des plantes et de la décomposition de la matière organique (**Aubinet et al., 2009**). La respiration est le total de la respiration hétérotrophe et de la respiration autotrophe. La part hétérotrophe (Rh) est celle des microbes et de la faune du sol, ceux-ci décomposant la matière

organique. Tandis que la part autotrophe (Ra) est celle de la partie aérienne des plantes (Raa) et de leurs racines (Rar) (Moureaux et al., 2008)

La respiration est le processus d'oxydo-réduction du glucose qui est réalisé par la photosynthèse. Elle sert à produire l'énergie pour les cellules. Cette énergie est sous forme de molécule (ATP) (d'Adénosine Triphosphate) (Delogu, 2011) L'équation de la respiration est la suivante :



L'augmentation de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère va provoquer une augmentation de la biomasse différente selon le type de plante. Il existe les types de plantes dites « en C3 » ou en « en C4 » selon le nombre d'atomes de carbone de la molécule permettant de fixer le carbone. Par exemple, si la concentration atmosphérique double, les plantes en C3 comme le blé, vont assimiler deux fois plus de carbone que celles en C4 comme le maïs (Seguin, 2010).

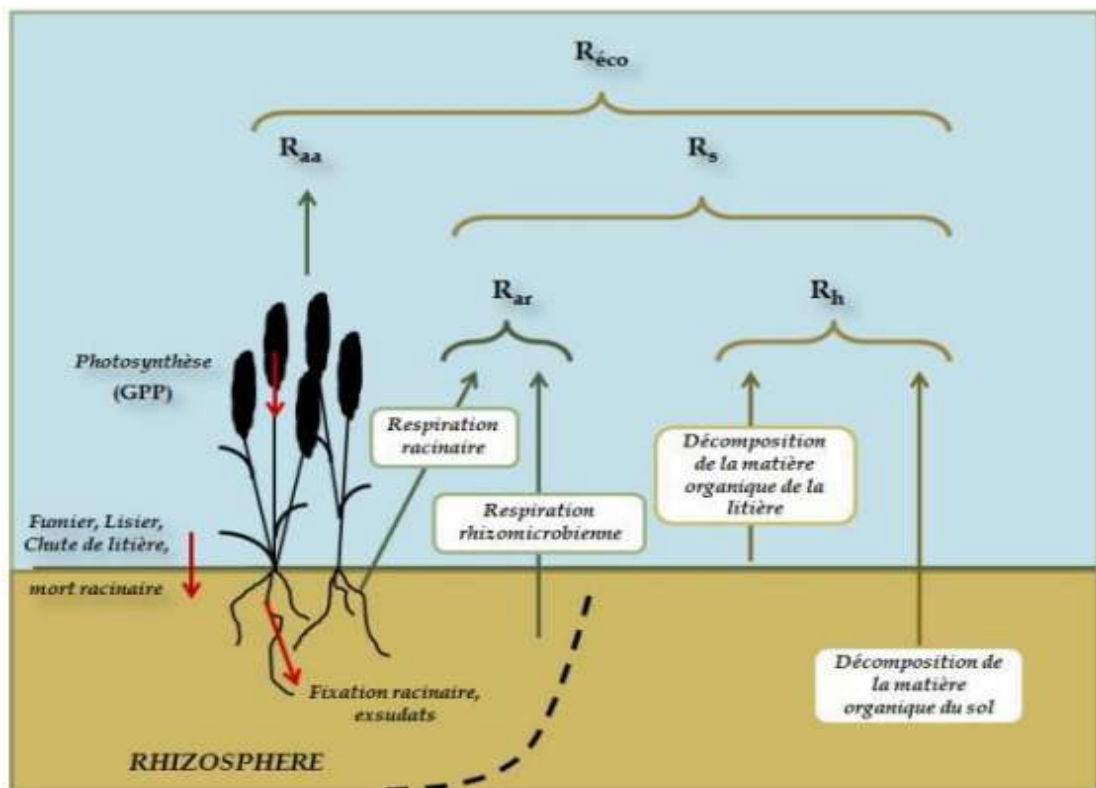


Figure.6 : Schéma présentant les différents termes de la respiration de l'écosystème culturel (Source : Delogu, 2011).

II.3. Méthodes d'étude de l'effet de la variabilité climatique sur les cultures

Comme le montre la **figure.II.2** dans un modèle de culture, la simulation commence par l'introduction d'une série de données spécifiant les conditions initiales environnant la culture, le statut hydrique initial dans le sol, et les paramètres nécessaires pour représenter les caractéristiques physiologiques de la culture.

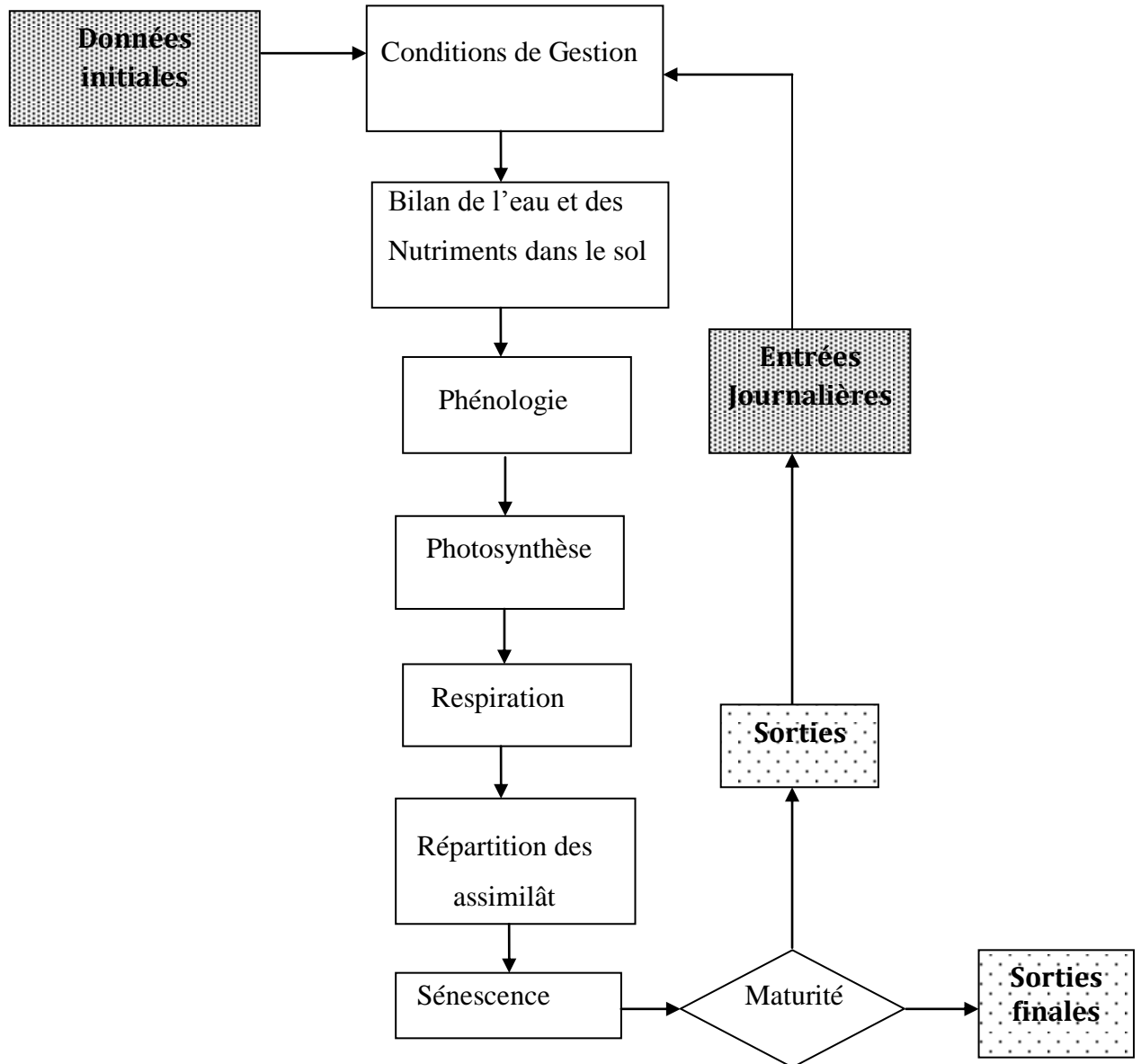


Figure.7 : Organigramme schématique d'un modèle de culture théorique fonctionnant au pas de temps journalier (source : White et Hoogenboom, 2010).

Pour une culture annuelle, le modèle parcourt une série de sous-programmes (appelés « subroutines »), qui simulent les processus de la plante ou du sol à un pas de temps horaire ou journalier, émettant en sortie des valeurs intermédiaires à intervalles spécifiés.

Les « routines » les plus souvent rencontrées dans un modèle sont: (a) le calcul de la phénologie de la plante en fonction de l'accumulation de température et de la photopériode, (b) calcul de l'accumulation de la matière sèche, (c) calcul du partage et de l'allocation de la matière sèche aux différents organes de la plante, (d) calcul de l'effet des facteurs environnementaux (paramètres climatiques, bilan de l'eau et des nutriments dans le sol), (e) conditions de gestion de la culture, (f) caractéristiques des cultivars utilisés.

II.3.1 Développement

La phénologie est la chronologie d'apparition des différents organes (**Prévoit, 2012**). Le développement comprend les processus utilisés par la plante pour gérer les changements importants de la croissance tels que la levée, la formation des fleurs, le début de formation et la croissance du grain, et la fin de la formation du grain qui correspond généralement à la maturité.

White et Hoogenboom (2010) expliquent que chaque phase de développement d'une plante est caractérisée par une durée exprimée en temps physiologique, mathématiquement similaire au temps thermique, degré-jours de croissance ou unités de chaleur, l'effet de la photopériode, de la vernalisation ou d'autres processus pouvant être inclus. La manière de modéliser la phénologie dépend de la biologie de l'espèce cultivée et de la décision du modélisateur concernant la représentation de ses réponses spécifiques. Dans le cas de la température, les décisions concernent la spécification d'une courbe qui décrit la forme supposée d'une réponse physiologique donnée. Les hypothèses communes sont que chaque plante est caractérisée par une température basse appelée « zéro de végétation », au-dessous de laquelle la croissance s'arrête, et une température optimale permettant un taux maximum de croissance. Entre ce seuil et ce plafond, la croissance est proportionnelle à la température, ainsi l'accumulation d'un certain nombre de degrés-jours aboutit à la définition d'une somme de température (**Soltner, 1978**). Chaque phase phénologique est en fait caractérisée par une somme de température nécessaire à sa réalisation.

II.3.2. Croissance

La croissance est décrite principalement par l'accumulation de matière sèche dans les principaux organes de la plante (**White et Hoogenboom, 2010**). L'une des approches les plus utilisées pour simuler l'accumulation de matière sèche, consiste à supposer que la croissance nette journalière est le produit du rayonnement photo synthétiquement actif (*PAR*) intercepté par le couvert et un facteur de conversion, représentant l'efficacité d'utilisation du

rayonnement (*RUE*) par le couvert (**Sandaña et Pinochet, 2011,**). Cette approche a pour base les travaux de (**Monteith 1977**). L'efficacité d'utilisation du rayonnements (*RUE*) peut être modélisée en fonction de la température, du taux de CO₂ ou d'autres stress spécifiques (**White et Hoogenboom, 2010**).

II.3.3. Répartition des assimilât et rendement

La matière sèche accumulée est fournie aux différents organes de la plante à travers un ensemble de règles de répartition qui changent avec le développement, mais parfois aussi avec les différents niveaux de stress. L'approche la plus simple consiste à simuler l'allocation d'assimilant vers les organes reproductifs par une relation linéaire fonction de l'indice de récolte (Harvest Index HI) (**Lhomme, 2012**).

La simulation du rendement réel (Y_a) par rapport au rendement maximum (Y_m) est souvent inspirée du modèle linéaire de base développé par (**Doorenbos and Kassam ,1979**).

II.3.4. Environnement

II.3.4.1. Bilan hydrique

Les processus de base concernant la simulation du bilan hydrique dans le sol sont globalement décrits par un équilibre entre d'une part les gains en eau représentés par les précipitations (P), les irrigations (I), le stock d'eau dans le sol (S), les remontées capillaires à partir de la nappe phréatique (C), et les pertes en eau qui comprennent les pertes par évaporation (E) et par transpiration (T), le ruissellement de surface (R), et la percolation profonde ou drainage (D). Ainsi :

$$(P + I + S + C) = (E + T + R + D) \quad (1)$$

Les paramètres P , I sont principalement prédéterminés. Les paramètres R et C sont souvent négligés. Ils sont très dépendants des caractéristiques spécifiques du terrain de culture et sont par conséquent très variables et difficiles à estimer à une échelle régionale. Pour estimer E et T , les modèles calculent premièrement la demande atmosphérique en eau (ET_0) à partir des variables climatiques et certaines conditions qui concernent le couvert végétal. La forme adaptée de l'équation de Penman–Monteith pour le calcul de l' ET_0 (**Monteith and Unsworth, 1990**) constitue la base du modèle le plus généralement utilisé pour le calcul de l'évapotranspiration de référence ET_0 décrite dans le bulletin de la FAO N° 56 (**Allen et al., 1998**). De nombreuses variantes sont cependant proposées en fonction de la

disponibilité des données climatiques d'entrée (Allen, 1986). Le passage de l' ET_0 à l'évapotranspiration d'une culture donnée ET_c se fait par le biais du coefficient cultural K_c dont la valeur pour une même culture varie en fonction du stade de développement (Allen et al., 1998). L'évapotranspiration réelle ET_{est} est inférieure à ET_c , si les conditions d'alimentation hydrique ne sont pas optimales. Ces dernières dépendent à la fois du taux d'humidité disponible pour la plante à différents niveaux d'enracinement, mais aussi de la distribution des racines dans le sol (White et Hoogenboom, 2010).

Le stockage de l'eau dans le sol S est positif lorsque l'humidité de l'eau dans le sol augmente et négatif lorsqu'elle diminue. Le calcul du bilan de l'eau dans le sol est complexe, en partie à cause de la nécessité de tenir compte des propriétés du sol qui varient avec l'enracinement et l'itinéraire technique (Ritchie, 1998).

II.3.4.2. Bilan de nutriments

Des approches similaires à celles du bilan hydrique sont utilisées dans la modélisation du bilan d'azote et de nutriments, avec des adaptations concernant la conversion du nutriment sous sa forme absorbable dans la solution du sol (White et Hoogenboom, 2010). Dans le cas de l'azote, cela nécessite de simuler sa minéralisation et sa mobilisation, qui à son tour exige le suivi de l'ammonium, du nitrate et de la matière organique du sol (Godwin et Singh, 1998). Le taux de minéralisation de l'azote est proportionnel au taux de labilité de l'azote organique dans le sol et dépend de la température du sol et de sa teneur en humidité (Addiscott, 1983).

II.3.4.3. Paramètres climatiques

Comme il a été montré antérieurement, les paramètres climatiques tels que la précipitation, la température, le rayonnement solaire, la concentration de l'air en CO_2 , l'humidité relative de l'air et la vitesse du vent affectent directement les différents processus de la plante. Les variables climatiques figurent généralement sous forme d'entrées journalières. Leurs effets sont estimés progressivement à travers la simulation des différents processus de la plante discutés antérieurement (Tableau 1).

II.3.5. Itinéraire technique, gestion de la culture et caractéristiques des cultivars

Les modèles de simulation des cultures une fois calibrés et validés pour un type de culture et de cultivar sont capables de simuler l'effet de la période et date de semis et des pratiques culturales (irrigation, fertilisation et travail du sol...) sur le développement et le rendement d'une culture donnée (Matthews, 2002). La gestion de la culture est généralement

simulée à travers des options en entrée, qui offrent la possibilité de modifier certains facteurs tels que le semis, la fertilisation, le travail du sol ou l'irrigation. Dans certains modèles, l'effet des irrigations ainsi que son optimisation sont simulés à travers le calcul d'un facteur dit « efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation (White et Hoogenboom, 2010). L'application de la fertilisation est caractérisée par la date d'application, la quantité et le type de nutriments à apporter et la profondeur d'incorporation de ces nutriments (White et Hoogenboom, 2010). Les caractéristiques des cultivars sont généralement regroupées en un ensemble de paramètres, parfois appelés « coefficients génétiques » censés les différencier, concernant la composition et la croissance du grain, la taille relative de la feuille, la phénologie (durée des phases phénologiques), la réponse à la photopériode, les besoins en vernalisation et autres caractéristiques (White et Hoogenboom, 2010).

Tableau.3 : Effets d'une sélection de facteurs environnementaux sur les différents processus de la plante et leur utilisation dans la modélisation.

| Facteur | Processus |
|--|--|
| Température | Phénologie, Photosynthèse, Respiration, Développement de la feuille, Croissance en phase de reproduction, Elongation, racinaire, Evapotranspiration potentielle, Minéralisation de la matière organique du sol |
| Concentration en CO₂ | Développement, Photosynthèse, Respiration, Transpiration, Développement de la feuille |
| Rayonnement solaire | Photosynthèse, Développement de la feuille, Evapotranspiration potentielle |
| Vent | Evapotranspiration potentielle, |
| Humidité relative | Développement de la feuille, Evapotranspiration potentielle, Transpiration |

Les paramètres des cultivars sont estimés par ajustement des valeurs simulées à celles réellement observées, ce qui nécessite l'accès à une large gamme de données de terrain où la moindre lacune peut affecter la précision de la calibration (Anothai et al., 2008a).

II.3.6. Méthodologie d'application dans les études d'impact du changement climatique

L'impact du changement climatique sur les cultures se retrouve dans une large gamme d'études (Parry et al., 2004). Les plantes naturelles et cultivées sont toutes affectées par les différentes composantes du changement climatique, y compris l'augmentation du taux de CO₂ de l'atmosphère (Norby et Luo, 2004), l'augmentation de la température (Challinor et al., 2005) et la combinaison de ces deux derniers facteurs avec le déficit hydrique (Asseng et al., 2004). La réponse d'une culture donnée au changement climatique étant étroitement liée à la

variabilité du climat régional (IPCC, 2013), les conditions climatiques futures peuvent être avantageuses dans certaines régions et pour certaines cultures, mais désavantageuses dans d'autres cas (Lavalle et al., 2009).

La simulation de la culture dans des conditions climatiques futures n'est pas plus difficile que celle faite dans les conditions réelles ou historiques. L'approche la plus commune consiste à générer des données météorologiques futures avec des modèles climatiques, puis à les utiliser comme entrées des modèles écophysologiques pour simuler la croissance, le développement et le rendement des cultures dans les conditions futures (White and Hoogenboom, 2010). L'impact du changement climatique est exprimé à travers le changement absolu ou relatif dans la productivité et l'utilisation des ressources de la culture (Meza et Silva, 2009). Le choix du modèle de culture dans une étude d'impact dépend du type de culture et des processus simulés par le modèle. Parmi les modèles de culture les plus utilisés pour appréhender l'impact du changement climatique sur les céréales, principalement sur le blé dur, on trouve les modèles CERES (Ventrella et al., 2012) et CropSyst (Sommer et al., 2013).

Chapitre III :

Vulnérabilité de l'agriculture méditerranéenne

III. 1.Ressources en eau pour l'agriculture (quantité et qualité)

III.1.1Qualité d'eau

Les ressources mondiales en eau douce sont de plus en plus polluées par les déchets organiques, les pathogènes, les fertilisants et les pesticides, les métaux lourds et les polluants émergents. La pollution de l'eau par la matière organique est en augmentation en raison des déversements municipal et industriel accrus d'eaux usées, de l'intensification de l'agriculture (notamment l'élevage du bétail) et de la diminution des capacités de dilution dans les fleuves à cause de la réduction du ruissellement et des prélèvements d'eau (**Zandaryaa et Mateo-Sagasta, 2018**). L'eutrophisation est un phénomène généralisé mondialement, qui provient de l'enrichissement des eaux de surface en nutriments à cause d'une gestion inefficace des eaux usées et du ruissellement agricole. La contamination par des agents pathogènes est le problème de qualité de l'eau le plus répandu dans les pays en développement en raison de services d'eau et d'assainissement dangereux (**OMS/UNICEF, 2017**). Les polluants émergents présentent un nouveau défi mondial en matière de qualité de l'eau, tant dans les pays développés que les pays en développement, et représentent une menace potentiellement grave à la santé humaine et aux écosystèmes.

La prolifération des efflorescences algales nuisibles (**HAB**) provenant des changements climatiques se renforce en raison de températures de l'eau plus élevées attribuées par le réchauffement de la planète. De nombreux lacs et estuaires partout dans le monde, qui fournissent de l'eau potable à des millions de personnes et soutiennent les services écosystémiques, contiennent déjà des cyanobactéries toxiques, nuisibles, qui modifient la chaîne alimentaire et entraînent l'hypoxie. Par exemple, en Chine, plus de 60 % des lacs sont victimes de l'eutrophisation et des **HAB**(**Shao et al., 2014**). Les changements climatiques influent gravement sur notre capacité à contrôler ces phénomènes ou les rendent presque impossible (**Havens et Paerl, 2015**).

III.1.2 Quantité d'eau

Au cours des 100 dernières années, l'utilisation mondiale d'eau a été multipliée par six, et continue d'augmenter rapidement de 1 % par an (**AQUASTAT,2010**) en conséquence de la croissance démographique, du développement économique et de l'évolution des tendances de consommation. En 2012, l'Organisation de coopération et de développement économiques (**OCDE**) a établi des projections montrant que la demande en eau augmenterait de 55 % entre 2000 et 2050 au niveau mondial, et proviendrait surtout d'une demande accrue dans les domaines de la production (+ 400 %), de la génération d'énergie thermique (+ 140 %

et de l'usage domestique (+ 130 %) (OCDE, 2012). Une autre étude a conclu que la planète pourrait subir un déficit mondial en eau de 40 % d'ici 2030 dans le scénario du statu quo (business-as-usual) (2030 WRG, 2009).

La croissance démographique, l'augmentation des revenus, le changement dans les tendances de consommation et l'expansion des villes entraîneront une augmentation sensible de la demande en eau, tandis que l'offre se fera plus erratique et incertaine. Cet écart peut générer un stress hydrique dans les régions disposant actuellement de ressources en eau abondantes, comme en Afrique centrale et en Asie de l'Est (Banque mondiale, 2016a).

III. 2. Agriculture pluviale

L'agriculture pluviale ou agriculture sous pluie est une forme d'agriculture qui se différencie de l'agriculture irriguée. Ce type d'agriculture suit le cycle des précipitations annuelles. En dessous de 200 mm de pluie par an, l'agriculture pluviale n'a que peu de chances de produire une récolte.

Elle est largement pratiquée en climat tempéré sans saison sèche. En climat méditerranéen, l'agriculture pluviale est possible avec des plantes capables de se contenter d'une pluviométrie réduite (blé, légumineuses) ou capables d'aller puiser profondément dans les réserves hydriques du sol (oliviers). Elle est pratiquée durant la saison humide en climat tropical. (MCD, 2016).

III.3. Etude de la vulnérabilité au moyen des indices d'aridité

Les indices d'aridité peuvent et ont été employés dans diverses études pour estimer la vulnérabilité de l'agriculture au changement climatique. Dans ces méthodes la base des données climatique est composée des données météorologiques quotidiennes standard (température, précipitations, humidité relative) pour calculer l'aridité à travers les indices de Martonne, le coefficient d'Emberger et l'indice ombro-thermique de Gaussen.

III.3.1. Indice de De MARTONNE

L'indice d'aridité annuelle de De Martonne (De Martonne, 1926) est défini comme suit :

$$I = P/T + 10$$

Où :

T : Température moyenne annuelle en °C ;

P : Précipitation moyenne annuelle en mm.

Cet indice, appelé parfois indice de sécheresse de **De Martonne**, peut être calculé aussi mensuellement et donne une indication sur le degré de sécheresse par rapport à la demande évaporatoire moyenne de l'atmosphère approché par la température.

L'aridité augmente quand la valeur de l'indice diminue. Au niveau mondial, De Martonne a proposé six grands types de macroclimats allant des zones désertiques ou hyperarides ($I < 5$) aux zones humides à forêt prépondérante ($I > 40$). Les zones hyperarides sont caractérisées par des précipitations exceptionnelles.

III.3.2. Indice d'aridité de BAGNOULS GAUSSEN

L'indice d'Ombro-thermique de Gaussen traduit l'effet du stress hydrique sur le développement de la végétation et la formation de la biomasse (**Gaussen, 1953**) et exprime la durée et l'intensité de la saison sèche. Il est employé pour identifier des phénomènes liés à la sécheresse (indiqués par des valeurs positives de BGI) et pour l'évaluation des zones sensibles à la désertification dans la région méditerranéenne (**Kosmas et al, 1999**). Il est défini comme suit :

$$\mathbf{BGI} = \sum_{i=1}^{12} (2T_i - P_i) \cdot K_i$$

Où :

T_i : température moyenne du mois i en °C ;

P_i : précipitation moyenne du mois i en mm ;

K_i : proportion du mois pendant laquelle $2T_i > P_i$.

Ainsi, il définit comme mois sec ou aride tout mois ayant le rapport entre les précipitations et la température moyenne du mois inférieur à deux, c'est-à-dire quand les pertes en eau (supposées causées par une température trop forte) sont supérieures aux apports (précipitations). Inversement, quand $P > 2T$, le mois est considéré comme humide. En région méditerranéenne, certains auteurs définissent un mois sec quand $P < 3T$ ou $P < 4T$ (**Lebourgeois et Piedallu, 2005**).

L'intégration dans cet indice de deux paramètres de nature différente moyennant le coefficient multiplicatif 2 s'explique par la faite que la valeur de $2T$ a été assimilée à la demande évaporative de l'atmosphère (ETP) (**Daget, 1977**). En somme, l'indice d'aridité Gaussen traduit la somme des déficits mensuels corrigés de leur concentration (Intégrale de la courbe $2T-P$ corrigé de la concentration mensuelle).

III.3.3. Le coefficient d'EMBERGER

Parmi les indices bioclimatiques utilisés de façon traditionnelle en Afrique du Nord et ailleurs en Méditerranée, on distingue l'indice bioclimatique d'**Emberger**. Celui-ci prend en compte les précipitations annuelles, la moyenne des Maxima de température du mois le plus chaud (M en °C) et la moyenne des minima de température du mois le plus froid (m en °C) (**Emberger, 1955**).

Cet indice est donné par la formule :

$$Q2 = \frac{2000 * P}{(M + m + 546,4) * (M - m)}$$

Où :

P : la pluviométrie annuelle en mm

M : la température maximale du mois le plus chaud en °C (Juillet)

m : la température minimale du mois le plus froid en °C (Janvier)

Ce quotient, particulièrement adapté aux régions méditerranéennes, traduit le rapport entre la quantité des précipitations et la moyenne des extrêmes thermiques (Mois le plus chaud et le plus froid), le tout corrigé par l'amplitude thermique extrême (M – m). **Emberger** a remarqué que l'amplitude thermique est un facteur important de la répartition des végétations. La combinaison des quotients pluviothermiques obtenus (Q2) et les températures minimales du mois le plus froid (m) (facteur limitant) avec les observations faites sur la répartition de végétation méditerranéenne et plus particulièrement au Maroc a conduit **Emberger** à subdiviser l'aire du climat-gramme en zones caractéristiques par des aridités croissantes de haut en bas, ce sont les « étages bioclimatiques de végétation ».

CONCLUSION

Conclusion

La question des variations climatiques possède une très grande importance puisqu'elle ne concerne pas simplement le cercle restreint des spécialistes, mais touche directement la population, fortement dépendante de l'agriculture. La problématique environnementale est en effet très liée à celle de la sécurité alimentaire.

L'Algérie est soumise aux aléas du climat et subit depuis longtemps les conséquences des sécheresses chroniques. Le changement climatique ressenti depuis le milieu des années 1970 constitue une menace supplémentaire qui s'exprime en termes de réduction des précipitations, notamment sur le Nord du pays.

Les analyses de longues séries sur le Nord de l'Algérie confirment les signaux du réchauffement global ainsi que la réduction sensible du régime pluviométrique sur plusieurs régions en Algérie. Les impacts affecteront en priorité des secteurs sensibles, tels que les ressources en eau ou l'agriculture. Le changement climatique constitue un facteur d'aggravation de risques naturels déjà connus en Algérie, parmi lesquels il est possible de citer la désertification, les sécheresses, la dégradation des oasis, les tempêtes, les inondations et les invasions acridiennes.

L'agriculture est extrêmement sensible aux variations climatiques. Des températures plus élevées diminuent les rendements des cultures utiles tout en entraînant une prolifération des mauvaises herbes et des parasites. La modification des régimes de précipitation augmente la probabilité de mauvaises récoltes à court terme et d'une baisse de la production à long terme.

Bien que certaines régions du monde puissent enregistrer une amélioration de quelques-unes de leurs cultures, le changement climatique aura généralement des impacts négatifs sur l'agriculture et menacera la sécurité alimentaire au niveau mondial. (Nelson et al, 2009) ont indiqué que les populations du monde en développement, déjà vulnérables et exposées à l'insécurité alimentaire, seront vraisemblablement les plus gravement affectées.

La modélisation des cultures est un outil majeur pour fournir des informations dans ce domaine. En combinaison avec des modèles de circulation générale et des mécanismes de coordination régionale, elle fournit des informations sur le développement des cultures dans des conditions climatiques spécifiques, réelles ou simulées. C'est un moyen pour comprendre la vulnérabilité et l'adaptabilité des différentes fonctions végétales au climat, et c'est une solution irremplaçable à la gestion des cultures dans le contexte du futur changement climatique.

Conclusion

Aussi l'étude de la vulnérabilité de l'agriculture aux variations et changements climatiques peut se faire au moyen d'indices d'aridité. Ces méthodes, comme ça été indiqué dans la présente synthèse, s'avèrent à la fois efficaces et faciles d'utilisation.

Il est nécessaire pour les décideurs d'intégrer le changement climatique dans les programmes de développement et d'élever la sensibilisation de la population face au changement climatique. Plus d'activités de recherche sur le thème du changement climatique et ses impacts sur l'agriculture et la production est nécessaire, et il serait bon d'impliquer les parties prenantes à différents niveaux.

*Références
bibliographiques*

- Addiscott T (1983)** Kinetics and temperature relationships in structured soil. *J Soil Sci* 28 :554-563
- Allen R (1986)** A Penman for all seasons. *J Irri Drain Eng* 112 :348–368
- Allen R, Pereira L, Raes D, Smith M (1998)** Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome, Italy
- Anothai J, Patanothai A, Pannangpetch K, Jogloy S, Boote K, Hoogenboom G (2008)** Reduction in data collection for determination of cultivar coefficients for breeding applications. *Agric Syst* 96 :195–206
- Asseng S, Jamieson P, Kimball B, Pinter P, Sayre K, Bowden J, Owden S (2004)** Simulated wheat growth affected by rising temperature, increased water deficit and elevated atmospheric CO₂. *Field Crops Res* 85 :85-102
- Aubinet M (2009)** CO₂ flux exchanged by a 4-years crop rotation cycle, *Geophysical Research Abstracts*
- Bagnouls F, Gausson H (1953)** Saison sèche et indice xérothermique. *Bull. Soc. Hist. Nat. Toulouse* 88 : 193-239.
- Banque mondiale/IFC/AMGI (2016)** (Banque mondiale/Société financière internationale/Agence multilatérale de garantie des investissements). World Bank Group Climate Change Action Plan 2016-2020. Washington, D.C., Banque mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/24451
- Boogaard H, Van Diepen C, Roetter R, Cabrera J, Laar H (1998)** WOFOST 7.1: user's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5. Technical document 52, DLO Winand Staring Center, Wageningen, Netherlands
- Bregaglio S (2015)** « New multi-model approach gives good estimations of wheat yield under semi-arid climate in Morocco », *Agronomy for Sustainable Development*, 35(1), p. 157-167. doi: 10.1007/s13593-014-0225-6.
- Brisson N, Mary B, Ripoche D, Jeuffroy M, Ruget F, Gate P, Deviennebarret F, Antonioletti R, Durr C, Nicoulaud B, Richard G, Beaudoin N, Recous S, Tayot X, Plenet D, Cellier P, Machet J, Meynard J, Délecolle 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.
- Bucchignani E, Mercogliano P, Panitz H, Montesarchio M (2018)** Climate change

- projections for the Middle East–North Africa domain with COSMO-CLM at different spatial resolutions. *Adv Clim Change Res* 9: 66–80. DOI: 10.1016/j.accre.2018.01.004.
- Burroughs W (2007)** Climate change a multi disciplinary approach. Cambridge university (eds), Second Edition. UK, Cambridge, pp344
- Camille P (2020)** Choix des graminées fourragères sur les fermes laitières québécoises dans un contexte de changements climatiques
- Challinor A, Wheeler T, Craufurd P, Slingo J (2005)** Simulation of the impact of high temperature stress on annual crop yields. *Agric For Met* 135 :180–189. doi: 10.1016/j.agrformet.2005.11.015
- Chourghal N (2016)** thèse de doctorat ‘Impacts des changements climatiques sur la culture du blé dur en Algérie’ ENSA-Alger- p7/p10 /p14 /p35-38
- Chourghal N, Hartani (2020)** Quelle stratégie de semis du blé dur en Algérie pour s’adapter au changement climatique ? *Cah. Agric.* 29 : 22.
- Christensen J, Krishna Kumar K, Aldrian E (2013)** Climate phenomena and their relevance for future regional climate change. In: Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM, eds. *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge : Cambridge University Press, pp. 1217–1310.
- CNRS (2020)** Centre National De La Recherche Scientifique
- Cramer W (2018)** Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. *Nature Climate Change*, 8, 972-980
- Daget P (1977)** Le bioclimat Méditerranéen : Caractères généraux, modes de caractérisation. *Vegetatio* : 1-20
- Delogu E (2011)** Modélisation de la respiration du sol dans les agroécosystèmes. *Sciences de la Terre.* Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2013. Français. Fftel-00953712f.
- Doorenbos J, Kassam A (1979)** Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 33.
- Easterling W, Apps M (2005)** Assessing the consequences of climate change for food and forest resources: a view from the IPCC. *Clim Change* 70:165–189. 10.1007/1-4020-4166-7-8
- El Hassani T, Persoons E (1994)** Bases physiologiques et agronomiques de la production végétale. (Hatier, Ed.), *Agronomie moderne.* Paris.

- Emberger L (1955)** Une classification biogéographique des climats. Rec. Trav. Lab. Bot. Zool. Fac. Sc de Montpellier 7: 3-43
- Engvild K (2003)** A review of the risks of sudden global cooling and its effects on agriculture. Agric For Meteorol 115 : 129–139. doi :10.1016/S0168-1923(02)00253-8
- Farah A (2014)** « Changement climatique ou variabilité climatique dans l'Est algérien » Thèse Magistère en écologie et environnement, Université Constantine 1
- Forzieri G (2014)** Ensemble projections of future streamflow droughts in Europe. Hydrology and Earth System Sciences, 18, 85-108
- Gate P (1995)** Ecophysiologie du blé : de la plante à la culture. (Tec&Doc Lavoisier, Ed.). Paris.
- Godwin D, Singh U (1998)** Cereal growth, development and yield. In: Tsuji GY, Hoogenboom G, Thornton PK (eds) Understanding options for agricultural production. Kluwer, Dordrecht, the Netherlands Netherlands
- Havens K, et Paerl H (2015)** « Climate change at a crossroad for control of harmful algal blooms ». Environmental Science and Technology, Vol. 49, n° 21, pp. 12605–12606. doi.org/10.1021/acs.est.5b03990
- Horton R, Gornitz V, Bowman M (2010)** Climate observations and projections. In: Repor Meira Filho [Callendar BA, Harris N, Kattenberg A, Maskell K (eds.)]. Annals of the New York Academy of Sciences, New York City Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp 41-62
- IPCC (2001)** Climate Change 2001: The Scientific Basis [Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, van der Linden PJ, Dai X, Maskell K, Johnson CA (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, UK, 881 p
- IPCC (2013)** Annex I: Atlas of Global and Regional Climate Projections [van Oldenborgh GJ et al. (eds.)]. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker TF et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- IPCC (2013)** Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

- IPCC (2014)** Summary for Policymakers, Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (Eds.)]. Geneva, Switzerland. doi: 10.1017/CBO9781107415324.
- Kardol P, Campany C, Souza L, Norby R, Weltzin J et Classen A (2010)** Climate change effects on plant biomass alter dominance patterns and community evenness in an experimental old-field ecosystem. *Global Change Biology* 16(10):2676–2687. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02162.x>.
- Kosmas C, Gerontidis S, Detsis V, Zafiriou T, Marathianou M (1999)** Application of the MEDALUS methodology for defining ESAs in the Lesvos island. *European Commission*
- Lavalle C, Micale F, Houston TD, Camia A, Hiederer R, Lazar C, Conte C, Amatulli G, Genovese G (2009)** Climate change in Europe. 3. Impact on agriculture and forestry. A review. *Agron Sustain Dev* 29: 433–446. doi:10.1051/agro/2008068
- Lebourgeois F, Piedallu C (2005)** Appréhender le niveau de sécheresse dans le cadre des études stationnelles et de la gestion forestière à partir d'indices bioclimatiques. *Rev. For. Fr.* LVII – 4 : 331- 356.
- Lefèvre R (2014)** The impact of climate change on slow degradation of monuments in opposition to extreme events, in *Climate Change as a Threat to Peace, Impacts on Cultural Heritage and Cultural Diversity*, von Schorlemer, S., Maus, S., Eds., Dresden Papers on Law and Policy of the United Nations, Band 19, 83-100.
- Lhomme J, Mougou R, Mansour M (2009)** Potential impact of climate change on durum wheat cropping in Tunisia. *Climate Change*, 96 : 549-564. doi: 10.1007/s10584-009-9571-9
- Lobell D, Burke M, Tebaldi C (2008)** Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030. *Science*, 319 : 607-610.
- Lockwood J (1999)** Is potential evapotranspiration and its relationship with actual evapotranspiration sensitive to elevated atmospheric CO₂ levels? *Climatic Change* 41(2) :193–212. <https://doi.org/10.1023/A:1005469416067>.
- Matthews R (2002)** Crop-soil simulation models: Applications in developing countries. In [Matthews R, Stephens W (eds.)]. CABI Publishing, Wallingford, UK
- Mavi H, Tupper G (2004)** *Agrometeorology Principles and Applications of Climate Studies in Agriculture*. Food Products Press, New York, 364p
- MedECC (2019)** au rapport de sur l'État de l'environnement et du développement en Méditerranée

- Mokhtari N, Mrabet R, Lebailly P, Bock L (2013)** Spatialisation des bioclimats, de l'aridité et des étages de végétation du Maroc
- Monteith J (1977)** Climate and the efficiency of crop production in Britain. Philosophical Transactions of the Royal Society 281 : 277-294. doi: 10.1098/rstb.1977.0140
- Monteith J, Unsworth M (1990)** Principles of environmental physics. Edward Arnold, London, 291 p
- Mougou R, Mansour M, Iglesias A, Chebbi R, Battaglini A (2010)** Climate change and agricultural vulnerability: a case study of rain-fed wheat in Kairouan, Central Tunisia
- Moureaux C, Bodson B, Aubinet M (2008)** Mesure des flux de CO₂ et bilan carboné de grandes
- Munk W, Dzieciuch M, Jayne S (2002)** Millennial climate variability: Is there a tidal connection?. J of Climate 15 : 370-385
- Nefzi A (2012)** Evaluation économique de l'impact du changement climatique sur l'agriculture : étude théorique et application au cas de la Tunisie. Thèse de doctorat, AgroParitec, 278pp.
- Nelson G, Rosegrant M, Koo J, Robertson R, Sulser T, Zhu T, Ringler C, Msangi S, Palazzo A, Batka M, Magalhaes M, Valmonte-Santos R, Ewing M, Lee D (2009)** Changement climatique : Impact sur l'agriculture et coût d'adaptation. Institut international de recherche sur les politiques alimentaires (IFPRI), Washington D.C., 19p.
- Newman T (2016)** Tracking the release of IPCC AR5 on Twitter: Users, comments, and sources following the release of the Working Group I Summary for Policy makers. Public Understanding of Science, 0963662516628477.
- Norby R, Luo Y (2004)** Evaluating ecosystem responses to rising atmospheric CO₂ and global warming in multi-factor world. New Phytol 162 : 281-293. doi: 10.1111/j.1469-8137.2004.01047.x
- Parry M, Rosenzweig C, Iglesias A, Livermore M, Fisher G (2004)** Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. Glob Environ Change 14 : 53-67. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2003.10.008
- Porter J, Semenov M (2005)** Crop responses to climatic variation. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 360(1463):2021-2035. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1752>.
- Prévot L (2012)** Introduction à la modélisation des cultures. Notes du cours « Eau et production végétale ». SUPAGRO, LISAH, 28 p

- Quezel P (1979)** La Région Méditerranéenne française et ses essences forestières. Signification écologique dans le contexte circum-méditerranéen. *Font Medit.* 1 (1): 7-18
- Rauff O, Bello R (2015)** A Review of CropGrowth Simulation Models as Tools for Agricultural Meteorology. *Agricultural Sciences*, (September), 1098–1105. <https://doi.org/10.4236/as.2015.69105>
- Ritchie J (1998)** Soil water balance and plant water stress. In: *Understanding options for agricultural production* [Tsuji GY, Hoogenboom G, Thornton PK (eds)]. Kluwer, Dordrecht, the Netherlands, pp 41–54
- Saadi S (2015)** Climate change and Mediterranean agriculture : Impacts on winter wheat and tomato crop evapotranspiration, irrigation requirements and yield. *Agricultural Water Management*, 147, 103-115
- Sanabria J, Lhomme J (2013)** Climate change and potatocropping in the Peruvian Altiplano. *TheorApplClimatol*112 : 683-695. doi :10.1007/s00704-012-0764-1
- Sandaña P, Pinochet D (2011)** Ecophysiological determinants of biomass and grain yield of wheat under P deficiency. *FieldCropsResearch*12:311-319. doi:10.1016/j.fcr.2010.11.005
- Schilling J, Freier K, Hertig E, Scheffran J (2012)** Climate change, vulnerability and adaptation in North Africa with focus on Morocco. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 156 : 12-26. doi: 10.1016/agee.2012.04.021
- Schilling J, Hertig E, Trambly Y, Scheffran J (2020)** Climate change vulnerability, water resources and social implications in North Africa. *Reg Environ Change* 20: 15. DOI: 10.1007/s10113-020- 01597-7
- Seguin B (2010)** « Le changement climatique : conséquences pour les végétaux », *Quaderni Open Edition*, (71), p. 27-40. doi : 10.4000/quaderni.525..
- Shao J, Jiang Y, Wang Z, Peng L, Luo S, Gu J, Li R (2014)** « Interactions between algicidal bacteria and the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*: Lytic characteristics and physiological responses in the cyanobacteria ». *International Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 11, n° 2, pp. 469–476. doi.org/10.1007/s13762-013-0205-4
- Sirotenko O (1999)** The global greenhouse effect, agroecosystems and future of agriculture. Paper presented at the International Workshop Agro meteorology in the 21st Century, Needs and Perspectives, Accra, Ghana
- Smith J, Anderson D, Moore, R (2012)** « Social Capital, Place Meanings, and Perceived cultures : état de la question et méthodologie. Gembloux.

- Smith M (1992)** CROPWAT, a computer program for irrigation planning and management. Irrigation and Drainage. Roma : FAO
- Sollyet Al, Appl J, Sci, Envir, Stud (2020)** 3 (2), pp. 117-131
- Soltner D (1987)** Les bases de la production végétale. Le sol- le climat- la plante. Tome II. Le climat : Météorologie-Pédologie- Bioclimatologie. Ed. Sciences et techniques agricoles.
- Sommer A, Glazirina R, Yuldasheva T, Otarov A, Ibraev M, Martynov L, Bekenov M, Kholov B, Ibragimov N, Kobilov R, Karaev S, Sultonov M, Khasanov F, Esanbekov M, Mavlyanov D, Isaev S, Abdurahimov S, Ikramov R, Shezdyukov L, de Pauwa E (2013)** Impact of climate change on wheat productivity in Central Asia. Agriculture, Ecosys Environ 178 :78– 99
- Stockle C, Donatelli M, Nelson R (2003)** CropSyst, a cropping systems simulation model. European Journal of Agronomy, 18, 289-307.
- Tabet Slimane (2008)** le changement climatique en algerie orientale et ses consequences sur la vegetation forestiere'', mémoire magistère. université mentouri constantine. faculte des sciences de la nature et de la vie departement de biologie et d'ecologie. Année de soutenance 2008
- Tao F, Yokozawa M, Zhang Z, Hayashi Y, Grassl H, Fu CB (2004)** Variability in climatology and agricultural production in China in association with the East Asian summer monsoon and El Niño Southern Oscillation. Clim Res 28 (1) : 23–30.
- Teka O, Houessou GL, Oumorou M, Vogt J, Sinsin B (2013)** An assessment of climate variation risks on agricultural production: perceptions and adaptation options in Benin. International Journal of Climate Change Strategies and Management 5(2):166-180.
- Unesco, Pnue, (2015)** « Guide sur le changement climatique et les modes de vie » Paris, France.
- Van Ypersele, J.-P (2017)** Climate Change: from Global to Local
- Ventrella D, Charfeddine M, Moriondo M, Rinaldi M, Bindi M (2012)** Agronomic adaptation strategies under climate change for winter durum wheat and tomato in southern Italy: irrigation and nitrogen fertilization. Reg Environ Chang 3 :204-219. doi :10.1007/s10113-011-0256-3
- Vicente-Serrano SM (2014)** Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe. Environmental Research Letters, 9(4), 044001
- Viner D, Morison J, Wallace C (2006)** Recent and future climate change and their implications for plant growth In Plant Growth and Climate Change. Blackwell

Publishing, UK, 213p

Wheeler T, Craufurd P, Ellis R, Porter J, Prasad P (2000) Temperature variability and the yield of annual crops. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 82(1–3) :159-167.

[https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00224-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00224-3).

White J, Hoogenboom G (2010) Crop Response to climate: Ecophysiological Models. In *Climate change and food security*. Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 197p

White J, Hoogenboom G (2010) Crop Response to Climate: Ecophysiological Models. In *Climate Change and Food Security* (Ed. D Lobell • Marshall Burke). Pp196

White S, Cahill J, Bork E (2014) Implications of Precipitation, Warming, and Clipping for Grazing Resources in Canadian Prairies. *Agronomy Journal* 106(1) :33– 42.

<https://doi.org/10.2134/agronj2013.0085>.

Williams J, Jones C, Dyke P (1984) A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Transactions of the ASAE*, 27, pp : 129-144.

WMO/GAW (1998) World Meteorological Organization/Global Atmosphere Watch 116. Expert Meeting on Chemistry of Aerosols, Clouds and Atmospheric Precipitation in the former USSR, St. Petersburg, Russia

Zongo B, Diarra A, Bruno B, Malicki Z, Karambiri H, Ouédraogo S, Toé P, Hamma Y, Dogo T (2019) Évaluation ex ante de l'irrigation de complément dans un contexte sahélien : couplage d'un modèle biophysique à un modèle économique d'exploitation agricole

Sites web:

Aquastat (2010) Global Water Withdrawal. Site Web d'AQUASTAT. Rome, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO).
www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use/image/WithTimeNoEvap_eng.pdf

2014. Infographie. Site Web d'AQUASTAT. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO).
www.fao.org/nr/water/aquastat/didyouknow/index2.stm

Bergé J (2019)« ROB HOPKINS : LE POUVOIR DE L'IMAGINATION POUR UN MONDE EN TRANSITION », Färm. 2 octobre 2019. [En ligne]
<https://www.farm.coop/rob-hopkins-le-pouvoir-de-limagination-pour-un-monde-entransition/>

Climat.be (2019) « Climat et météo ». [En ligne]
<https://climat.be/changementsclimatiques/causes/climat-et>

IRD (2016) The Mediterranean Region under Climate Change, A scientific update. Voir [en ligne]
<http://www.editions.ird.fr/produit/433/9782709922210/The%20Mediterranean%20Region%20under%20Climate%20Change>

OCDE (2012) (Organisation De Coopération Et De Développement Economiques) Environmental Outlook to 2050 : The Consequences of Inaction. Paris, Editions OCDE.
www.oecd-ilibrary.org/docserver/9789264122246-en.pdf

Oms/Unicef (2017) (Organisation mondiale de la Santé/Fonds des Nations Unies pour l'enfance). Progrès en matière d'eau, d'assainissement et d'hygiène : mise à jour 2017 et évaluation des ODD. Genève/New York, OMS/UNICEF.
www.unicef.org/french/publications/index_96611.html

ONU-Eau (2013) What is Water Security? Infographie. Site Web d'ONU-Eau.
www.unwater.org/publications/water-security-infographic/ _____.

Zandaryaa S, Mateo-Sagasta J (2018)« Organic matter, pathogens and emerging pollutants ». Mateo-Sagasta, J., Marjani Zadeh, S. et Turrall, H. (eds), More People, More Food, Worse Water? A Global Review of Water Pollution from Agriculture. Rome/Colombo, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture/Institut international de gestion des ressources en eau (FAO/IWMI), pp. 125–138.
www.fao.org/3/ca0146en/CA0146EN.pdf

Résumé :

Dans ce travail nous avons traité le thème du changement climatique en zone méditerranéenne et méthodes d'estimation de la vulnérabilité des cultures par le biais de la modélisation et des indices d'aridité, dont l'objectif d'aboutir à collecter un maximum d'informations concernant les caractéristiques du climat futur en zone méditerranéenne, ses impacts sur l'agriculture et les méthodes d'étude de la vulnérabilité de l'agriculture dans le contexte du changement climatique. Dans la zone méditerranéenne, la variabilité climatique interannuelle entraîne des impacts graves sur l'agriculture à travers de longs épisodes de sécheresses, ces impacts devraient augmenter en raison du changement climatique prévu. Les modèles climatiques ainsi que les indices d'aridité peuvent être très utiles dans ce cadre et permettent d'estimer la vulnérabilité des cultures au changement climatique.

Mots clés : changement climatique, vulnérabilité de l'agriculture, modélisation, indice d'aridité, zone méditerranéenne.

الملخص:

في هذا العمل تناولنا موضوع تغير المناخ في منطقة البحر الأبيض المتوسط وطرق تقدير قابلية تعرض المحاصيل للتضرر من خلال مؤشرات النمذجة والجفاف ، والتي تهدف إلى جمع أقصى قدر من المعلومات المتعلقة بخصائص المناخ المستقبلي في منطقة البحر الأبيض المتوسط ، آثارها على الزراعة وطرق دراسة قابلية تأثر الزراعة في سياق تغير المناخ. في منطقة البحر الأبيض المتوسط ، يتسبب تقلب المناخ بين السنوات في تأثيرات شديدة على الزراعة من خلال فترات طويلة من الجفاف ، ومن المتوقع أن تزداد هذه الآثار بسبب تغير المناخ المتوقع. يمكن أن تكون النماذج المناخية وكذلك مؤشرات الجفاف مفيدة للغاية في هذا السياق وتمكن من تقدير مدى تأثر المحاصيل بتغير المناخ.

الكلمات المفتاحية: تغير المناخ ، الضعف الزراعي ، النمذجة ، مؤشر الجفاف ، منطقة البحر الأبيض المتوسط.

Abstract:

In this work we have dealt with the theme of climate change in the Mediterranean area and methods of estimating the vulnerability of crops through modelling and aridity indices, the objective of which is to collect as much information as possible concerning the characteristics of the future climate in the Mediterranean area, its impacts on the Mediterranean. Agriculture and methods of studying the vulnerability of agriculture in the context of climate change. In the Mediterranean area, internal climate variability causes severe impacts on agriculture through long episodes of droughts; these impacts are expected to increase due to predicted climate change. Climate models as well as aridity indices can be very useful in this context and make it possible to estimate the vulnerability of crops to climate change.

Keywords: climate change, vulnerability of agriculture, modelization, aridity index, the Mediterranean area.