

– ةي ح الفلدا مول عدل ي موقلا ده عمل ا – INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE EL – HARRACH ALGER

ري ازجلا – شارحلا

Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de magister en sciences agronomiques

Département : Génie Rural

Spécialité : Hydraulique Agricole

*Cinétique de quelques paramètres physiologiques du blé dur triticum durum (variété vitron) sous contrainte hydrique dans la plaine de la Mitidja*

**Présentée par : Mme ZITOUNI ZAHIDA épouse BENFLIS**

Directeur de thèse : M. AÏDAOUI Abdellah Professeur, INA Alger

Année universitaire : 2005 – 2006

Jury : Président : M. ABDELKRIM Hassan Professeur, INA Alger Codirecteur de thèse : M. SELLAM Fouad Chargé de Cours, INA Alger Examineurs : M<sup>me</sup> MEKLICHE Leila Professeur, INA Alger M. MOUHOUCHE Brahim Maître de conférence à l'INA.



# Table des matières

..	1
Remerciements . .	3
Résumé .	5
Abstract . .	7
ص غ ل م . .	9
Liste des symbols .	11
Introduction . .	13
Partie I : Bibliographie .	15
I.- La culture du blé et son importance . .	15
I.1.- Importance des céréales dans l'alimentation humaine . .	15
I.2.- La production des céréales dans le monde . .	16
I.3.- Situation de la culture du blé en Algérie . .	18
I.4.- Caractéristiques du blé dur . .	20
I.5.- Différentes phases de développement du blé dur . .	23
I.6.- Impact de la sécheresse sur le développement de la culture et ses composantes du rendement . .	26
II.- Le stress hydrique et ses indicateurs .	27
II.1.- Qu'est ce qu'un stress hydrique .	27
II.2.- Importance de la détection d'un stress hydrique . .	27
II.3.- Les outils de détection du stress hydrique . .	28
II.4.- Les indices de végétation associés au stress hydrique .	29
II.5.- La température du couvert végétal comme indicateur de l'état hydrique .	30
II.6.- Les indices spectraux IRT de détection du stress hydrique . .	34
II.7.- La teneur en eau relative RWC . .	42
II.8.- Le potentiel foliaire .	43
III.- Outils de pilotage des irrigations .	44

III.1.- Bref aperçu du bilan hydrique . .	44
III.2.- Pilotage des irrigations par la température du couvert .	45
III.3.- Pilotage des irrigations par le potentiel foliaire . .	46
<b>Partie II : Matériels et méthodes .</b>	<b>49</b>
I.- Présentation de la zone d'étude .	49
I.1.- Localisation du site expérimental . .	49
I.2.- Caractéristiques climatiques du site d'essai . .	50
I.3.- Caractéristiques pédologiques du site expérimental . .	61
II.- Le matériel végétal . .	63
II.1.- Caractéristiques morphologiques . .	63
II.2.- Caractéristiques agronomiques . .	63
II.3.- Aspects techniques . .	64
III.- Les protocoles expérimentaux .	64
III.1.- Objectifs des essais . .	64
III.2.- Protocoles expérimentaux . .	65
IV.- Paramètres mesures .	70
IV.1.- L'état hydrique du sol .	71
IV.2.- Les Paramètres physiologiques . .	71
IV.3.- Composantes de rendement . .	75
IV.4.- Mesures climatiques .	77
<b>Partie III : Resultats et interpretations .</b>	<b>79</b>
I.- Introduction . .	79
II.- Etat de la reserve en eau du sol . .	79
II.1.- Traitement ETM .	81
II.2.- Traitement PLU .	82
II.3.- Traitement MOD . .	83
II.4.- Traitement SEV .	84
III.- Paramètres physiologiques . .	85
III.1.- Température du couvert végétal . .	85

<b>III.2.- Indice foliaire "LAI" .</b>	104
<b>III.3.- Potentiel foliaire .</b>	109
<b>III.4.- Teneur en eau relative "RWC" .</b>	112
<b>III.5.- Proline et sucres . .</b>	116
<b>IV. Composantes de rendements .</b>	120
<b>IV .1.- Evolution générale et effet du traitement hydrique .</b>	120
<b>IV .2.- Rendements et consommations en eau du blé .</b>	124
<b>IV .3.- Efficience de l'eau . .</b>	125
<b>Conclusion générale .</b>	129
<b>Références bibliographiques .</b>	133
<b>Annexes . .</b>	137
Annexe 1 : Fichier de données climatiques (essai 2000) .	137
Annexe 2 : Fichier de données climatiques (essai 2001) .	141
Annexe 3 : Temperatures du couvert (°C) - essai 2000 .	145
Annexe 4 : Temperatures du couvert (°C) - essai 2001 .	147
Annexe 5 : Teneur relative en eau RWC (%)- essai 2000 .	148
Annexe 6 : Teneur relative en eau RWC (%) - essai 2001 . .	155
Annexe 7 : Indice foliaire lai - essai 2000 .	161
Annexe 8 : Indice foliaire lai - essai 2001 .	163
Annexe 9 : Hauteur de tige (cm) - essai 2000 . .	165
Annexe 10 : Hauteur de tige (cm) - essai 2001 . .	167
Annexe 11 : Potentiel foliaire (Bar) - essai 2001 . .	168
Annexe 12 : Glucose et proline - essai 2001 .	168
Annexe 13 : Composantes de rendements - essai 2000 .	170
Annexe 14 : Composantes de rendement- essai 2001 . .	171



---

*Dédicace Je dédie ce travail : A mon Papa et ma Maman , les êtres les plus merveilleux sur cette terre , que Dieu les bénisse . A mes grands parents, Pakadi et Zahora qui ont tout mon amour. A la mémoire de ma chère Keltoum adorée. A Walid et à Amine qui sont une partie de moi. A mon cher frère Ryad. A mon cher beau frère Djamel. A mes merveilleuses sœurs Dalila et Amel. A ma cousine Nawel. Sans oublier ma Hanouna. Zahida*





## Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord mon promoteur Monsieur AIDAOUI , pour tous les conseils dont j'ai bénéficié durant toute la période de thèse afin de mener à bien ce travail .

Je remercie vivement Monsieur SELLAM pour toute l'aide et la peine qu'il s'est données afin d'accomplir au mieux ce travail.

Mes sincères remerciements vont aussi à :

Monsieur ABDELKRIM de m'avoir fait l'honneur de présider ce jury.

Madame MEKLICHE et Monsieur MOUHOUCHE pour avoir accepté de juger mon travail.

Mes sincères remerciements s'adressent aussi à :

Malika, Amar, Hichem et Naima avec qui j'ai fait mes expérimentations ainsi que Hammadi pour sa précieuse aide de terrain.

Enfin, je remercie toute personne qui a contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Zahida



## Résumé

Une expérience a été conduite en plein champs pendant deux campagnes successives (1999/2000 et 2000/2001) à la station expérimentale de l'Institut National Agronomique d'El Harrach.

Quatre régimes d'irrigation ont été appliqués afin d'étudier la croissance et le comportement physiologique du blé dur face à une contrainte hydrique. Pour cela, il fut procédé aux suivis de certains paramètres physiologiques tels que la température du couvert végétal, la teneur en eau relative, le LAI, le potentiel foliaire. La température du couvert a permis d'analyser certains indices de stress tels que le Stress Degree Day et le Crop Water Stress Index afin de tester leur aptitude à pouvoir détecter un stress hydrique et donc être utilisé comme outil de pilotage des irrigations.

A ce titre, certaines corrélations ont été testées entre le CWSI, le rapport ETR/ETM et le taux d'épuisement de la réserve en eau du sol.

Un deuxième volet du travail a consisté en l'analyse des effets des stress hydriques sur les rendements et composantes de rendements ainsi que les efficacités de l'eau.

Mots Clés : Régime d'irrigation, contrainte hydrique, stress hydrique, teneur en eau relative, LAI, potentiel foliaire, SDD, CWSI, pilotage, efficacité de l'eau.



## Abstract

An experiment with winter wheat was conducted during two campaigns (1999/2000 and 2000/2001) at the experimental station of the National Institute of Agronomy in Algiers ,

Four irrigation regimes was used to study drought effects on wheat growth and physiology . So physiological parameters as canopy temperature, relative water content , leaf area index et leaf water potential was measured all over the two experiments.

The canopy temperature was used to analyze drought indeces as Stress Degree Day and Crop Water Stress Index. The objective of this analyze was to study their aptitude to detect a drought stress and then the possibility to be used in irrigations scheduling.

In this way, correlations between CWSI, ETR/ETM ratio and soil water depletion were established.

In a second part, statistical analysis were used to analyze the effects of different irrigation regimes on wheat yield, its components and water efficiency.

Key Words : Irrigation regime, drought stress, relative water content, leaf area index, leaf water potential, SDD, CWSI, scheduling, water efficiency.



## ص خ لم

قمنا بتحديثين من 1999 إلى 2000 في المعهد الوطني للعلوم الزراعية بالبحرين تتضمن دراسة تأثير أنظمة السقي على نمو و مردود الحبوب.

استعملت أربعة أنظمة السقي مختلفة من أجل دراسة تأثير النقص المائي على فيزيولوجية النباتات، و من أجل ذلك، قمنا بقياس درجة الحرارة على مستوى سطح أوراق النبات، و كمية الرطوبة في الأوراق و سماكتها.

استعملت درجة حرارة الأوراق لدراسة بعض مؤشرات النقص المائي مثل SDD و CWSI و كيفية استعمالها في تنبيه السقي. و في هذا المجال قمنا بربط هذا المؤشر CWSI مع المعامل ETR / ETM

و تمسح انخفاض رطوبة الأرض.

و من جهة أخرى، قمنا بدراسة تأثير الأنظمة المائية على مردود الحبوب و سكانها.

**كلمات المفتاح:**

نظام السقي، النقص المائي، رطوبة، درجة الحرارة، تنبيه السقي، مساحة الأوراق،









# Introduction

L'eau est l'élément de base indispensable à la vie. Plus que jamais la gestion environnementale de l'eau est à l'ordre du jour compte tenu de son poids dans l'économie et en particulier de son poids dans l'évolution des écosystèmes et des agro systèmes dont dépend l'élaboration et production agricole.

L'eau constitue l'élément le plus important de la surface du globe. Elle représente un stock imposant d'environ  $1,45 \cdot 10^9$  km<sup>3</sup> ; ce stock repartit en :

Océans 97,4 %

Glaces 2 %

Réserves fossiles de profondeur 0,6 %

Eau de surfaces dont les mers intérieures, les lacs et les rivières 0,016 %

L'atmosphère 0,001 %

Le rôle énergétique et climatique de ces eaux de surface est considérable, et pourtant il demeure pour la biosphère continentale un élément souvent rare et mal repartit dans l'espace et dans le temps, ce qui rend nécessaire l'optimisation de son utilisation.

En Algérie plus d'un million d'hectares sont consacrés pour le blé dur dans les régions semi-aride et notamment dans l'haut - plateaux, qui se caractérise par une faiblesse et une forte irrégularité des précipitations et de fortes températures sur une grande partie de l'année.

Le blé dur qui est un aliment de base de la majeure partie de la population

---

Algérienne, semble subir les plus grands dommages de ce désagrément météorologique qu'est la sécheresse, ce qui se traduit par des importations massives, d'année en année, en raison des besoins croissant de la population.

Dans ce but le pilotage d'irrigation est une option de taille pour augmenter les rendements et optimiser la qualité des produits récoltés. Pour ceci la caractérisation d'état de stress hydrique servira d'indicateur pour le pilotage des irrigations.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre étude dans le cadre d'un projet de recherche de coopération interuniversitaires entre l'institut nationale agronomique de Paris Grignon (INAPG) et l'institut nationale agronomique d'Alger (INAA).

Cette recherche porte sur l'étude d'une stratégie de gestion de l'irrigation de complément des céréales en conditions de ressources en eau limitée, cas du blé dur *Triticum durum* Desf variété vitron dans la Mitidja.

Une expérimentation menée sur deux campagnes 2000/2001 et 2001/2002 à la station expérimentale de l'institut national agronomique d'Alger.

L'objectif de notre étude est la caractérisation d'un stress hydrique, sa position dans le cycle végétatif du blé, son intensité et sa durée. Ainsi une caractérisation agro morphologique, physiologique de la culture sous cette contrainte.

On termine notre étude par une conclusion générale suivie de quelques propositions et perspectives des travaux qui pourront suivre dans le but d'apporter une amélioration éventuelle de la production céréalière nationale.

# Partie I : Bibliographie

## I.- La culture du blé et son importance

### I.1.- Importance des céréales dans l'alimentation humaine

---

Les céréales demeurent l'aliment de base des régimes alimentaire dans le monde, leurs productions sont plus importantes dans les pays développés.

Le blé est la première céréale consommée au monde. Ses deux principales formes d'utilisation sont la fabrication de pain et de pâtes.

Les rendements mondiaux du blé ont évolué rapidement durant la deuxième moitié du XX<sup>ème</sup> siècle. Principalement sous l'impulsion des progrès techniques et des innovations apportées au niveau des méthodes de production (automatisation, engrais, ...).

La culture céréalière promet donc de rester une branche importante de l'agriculture au cours du prochain millénaire.

Le blé est un terme générique qui désigne plusieurs céréales appartenant au genre *triticum*. Ce sont des plantes annuelles de la famille des graminées ou poacées, cultivées

dans de très nombreux pays.

**Tableau N° I.1 : Classification scientifique du blé (Soltner, 1999)**

<u>Règne</u>	<u>Plantae</u>
<u>Division :</u>	<u>Magnoliophyta</u>
<u>Classe :</u>	<u>Liliopsida</u>
<u>Ordre :</u>	<u>Cyperales</u>
<u>Famille :</u>	<u>Poaceae</u>
<u>Genre :</u>	<u>Triticum</u>

## **I.2.- La production des céréales dans le monde**

---

La production mondiale du blé s'est élevée à 557 millions de tonnes en 2003 (source FAO).

En volume de production, c'est la 4ème culture mondiale derrière la canne à sucre, le maïs et le riz.

<b>Production en milliers de tonnes. Chiffres 2003</b> Données de FAOSTAT (FAO)		
<u>Chine</u>	85 100 250	16%
<u>Inde</u>	65 129 300	12%
<u>Etats Unis d'Amérique</u>	63 889 820	12%
<u>Fédération de Russie</u>	34 062 260	6%
<u>France</u>	30 552 000	6%
<u>Australie</u>	24 900 000	5%
<u>Canada</u>	23 652 000	4%
<u>Allemagne</u>	19 296 100	4%
<u>Pakistan</u>	19 210 200	3%
<u>Turquie</u>	19 000 000	3%
<u>Argentine</u>	14 530 000	3%
<u>Royaume-Uni</u>	14 288 000	3%
<u>Iran</u>	12 900 000	2%
<u>Kozakhs tan</u>	11 210 500	2%
<u>Pologne</u>	7 868 160	1%
<u>Espagne</u>	6 290 100	1%
<u>Italie</u>	6 243 390	1%
<u>Egypte</u>	6 150 000	1%
<u>Brésil</u>	5 899 800	1%
<u>Ouzbékistan</u>	5 331 000	1%
<u>Autres pays</u>	7 400 247	1,4%

**Tableau N° 1.2 : Les pays producteurs (Faostat, 2003)**

Le tableau suivant illustre les superficies cultivées ainsi que les rendements obtenus par pays producteurs :

Principaux pays producteurs			
2003	Superficie cultivée millions d'hectares	Rendement Qx/ha	Production millions de tonnes
<b>Monde</b>	208,53	26,74	557,50
<u>Chine</u>	22,00	39,32	86,49
<u>Inde</u>	24,88	26,17	65,13
<u>Etats-Unis</u>	21,47	29,72	63,81
<u>Russie</u>	20,00	17,10	34,06
<u>France</u>	4,87	62,50	30,47
<u>Australie</u>	12,40	20,10	24,92
<u>Canada</u>	10,47	22,50	23,55
<u>Allemagne</u>	2,97	64,90	19,26
<u>Pakistan</u>	8,03	23,90	19,18
<u>Turquie</u>	9,40	20,21	19,00
<u>Argentine</u>	7,00	20,76	14,53
<u>Royaume-Uni</u>	1,84	77,78	14,29
<u>Iran</u>	6,50	20,77	13,50
<u>Argentine</u>	5,49	22,59	12,40
<u>Kazakhstan</u>	11,26	10,23	11,52

**Tableau N° I.3 : Superficies et rendements du blé dur (Faostat, 2003)**

Sept pays assurent les trois quarts des exportations mondiales qui s'élèvent à 121.3 millions de tonnes (2002). Ce sont dans l'ordre : les États-Unis (20 %), l'Australie (12.1 %), la France (11.3 %), le Canada (10.1 %), puis l'Argentine, la Russie et l'Ukraine.

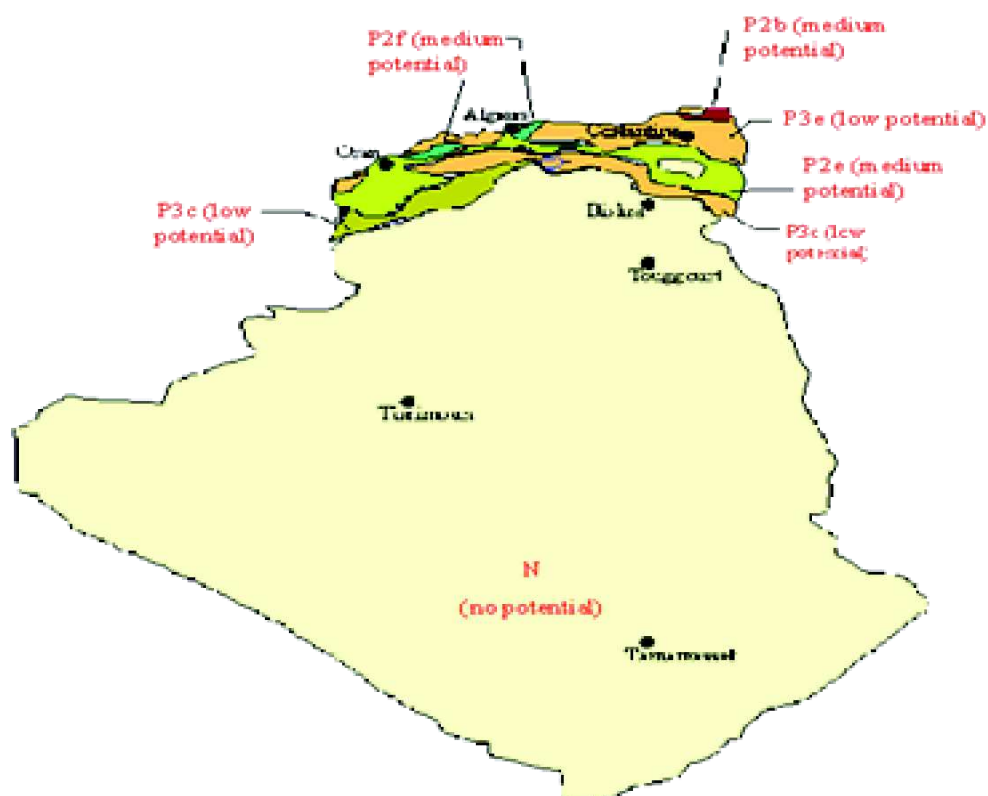
Les importations mondiales représentaient en 2002 119.4 millions de tonnes (source FAO). 32 pays importent plus de 1 Mt annuellement et représentent 80 % du total. Parmi ces pays, 12 réalisent 50 % du total, ce sont dans l'ordre décroissant : Italie (6.5 %), Brésil (5.5 %), Espagne (5.3 %), Algérie (5.0 %), Japon (4.9 %), Égypte, Indonésie, Iran, Corée du Sud, Pays-Bas, Belgique, Maroc.

### I.3.- Situation de la culture du blé en Algérie

Le potentiel de production du blé en Algérie est soumis aux conditions pluviométriques vu la faiblesse des surfaces irriguées actuellement. Les zones du nord de l'Algérie, recevant plus de 400 mm de pluies, permettent d'obtenir bon an mal an un potentiel de production moyen à élevé. Les zones du sud de l'Algérie, avec moins de 250 mm de pluies, ne sont pas convenables à des cultures pluviales.

La carte suivante montre les zones de production du blé en Algérie.





**Figure N° I.1 : Zones d'Algérie à vocation céréalière**

Le tableau N°I.4 suivant montre la situation de la culture du blé en Algérie :

**Tableau N°I.4: Statistiques du blé dur en Algérie (1980 – 2000)**

BLE	1980	1985	1990	1995	2000
Production (tonnes)	1511426	1478018	750080	1499920	800000
Surface emblavée (ha)	2071250	1667990	1187820	1680720	1592000
Rendement (Kg/ha)	730	886	631	892	502
Importation (tonnes)	1695917	3029525	2611940	3504679	5367044
Exportations (tonnes)	-	-	-	-	-
Consommation (Kg/hab/an)	181.5	172.0	194.2	196.4	189.3

**Source :** Statistiques FAO, 2000

La figure N° I.2 suivante montre l'évolution de la production et la consommation du blé dur en Algérie de 1991 à 2001.

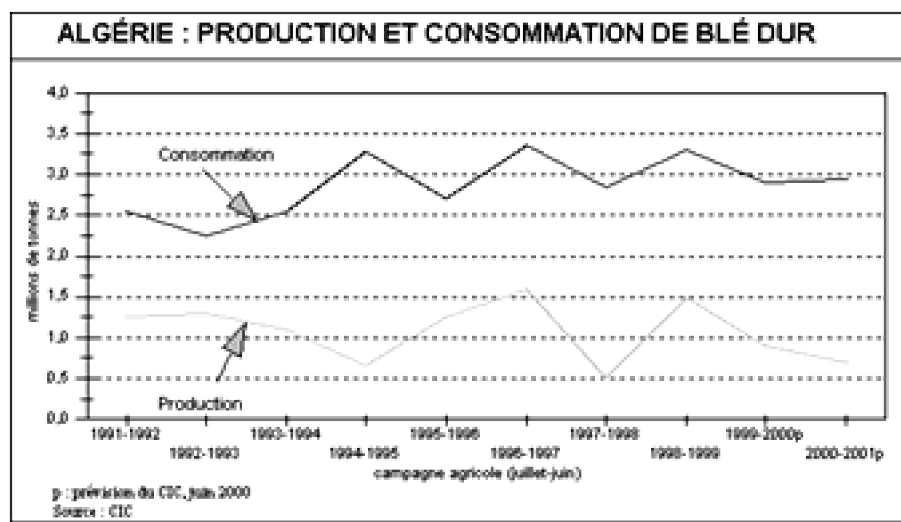


Figure N° I.2 : Production et consommation du blé dur en Algérie

Pour illustrer l'importance des importations du blé dur en Algérie, nous présentons en figure N° I.3 leur évolution de 1991 à 2001.

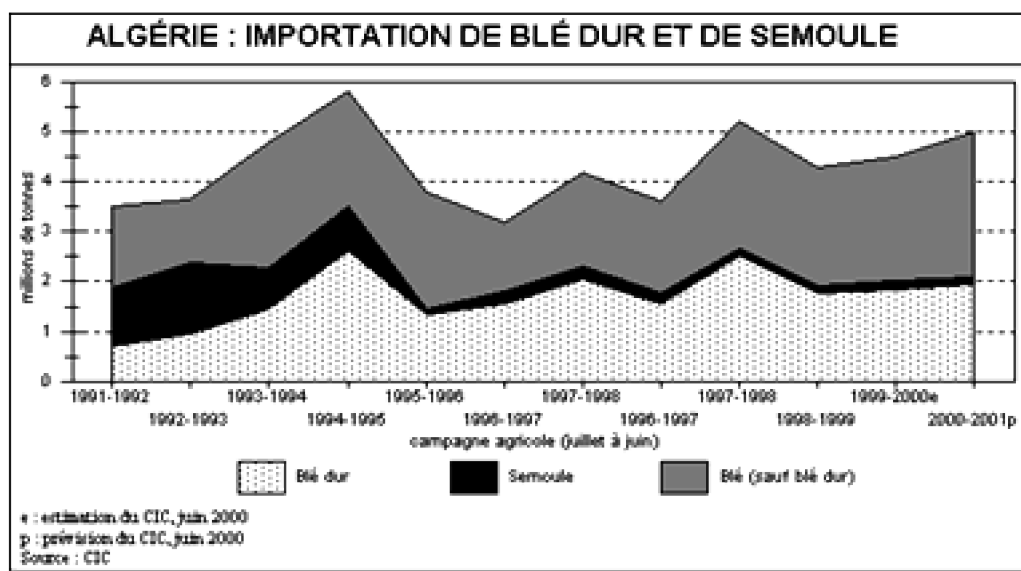


Figure N° I.3 : Importation du blé dur en Algérie

## I.4.- Caractéristiques du blé dur

### I.4.1.- Description de la plante

Les blés sont des plantes herbacées annuelles, monocotylédones, à feuilles alternes, formées d'un chaume portant un épi constitué de deux rangées d'épillets sessiles et aplatis. Les fleurs sont nombreuses, petites et peu visibles. Elles sont groupées en épis situés à l'extrémité des chaumes.

Les tiges sont des chaumes, cylindriques, souvent creux par résorption de la moelle

centrale. Ils se présentent comme des tubes cannelés, avec de longs et nombreux faisceaux conducteurs de sève. Ces faisceaux sont régulièrement entrecroisés et renferment des fibres à parois épaisses, assurant la solidité de la structure. Les chaumes sont interrompus par des nœuds qui sont une succession de zones d'où émerge une longue feuille, qui d'abord engaine la tige puis s'allonge en un limbe étroit à nervures parallèles.

Parmi les autres caractères de cet appareil végétatif, il existe dans l'épiderme une concentration de multiples amas de silice microscopiques mais très durs. Ils rendent les organes tranchants. Ce fait permet de reconnaître les outils préhistoriques ayant servi aux moissons, car ils présentent de fines rayures.

L'épi de blé est formé de deux rangées d'épillets situés de part et d'autre de l'axe. Un épillet regroupe trois fleurs à l'intérieur de deux glumes. Chaque fleur est dépourvue de pétales, et est entourée de deux glumelles (pièces écailleuses non colorées). Elle contient trois étamines (pièces mâles), un ovaire surmonté de deux styles plumeux (les pièces femelles). La fleur du blé est dite cléistogame, c'est-à-dire que, le plus souvent, le pollen est relâché avant que les étamines ne sortent de la fleur. Il s'attache alors au stigma, où peut se produire la fécondation.

À cause du caractère cléistogame de la fleur, l'autofécondation est le mode de reproduction le plus fréquent chez les blés : ce sont les spermatozoïdes issus du pollen d'une fleur qui fécondent l'oosphère et la cellule centrale du sac embryonnaire de l'ovaire de cette même fleur (les cellules sexuelles femelles sont protégées dans un sac embryonnaire fermé au sein d'un ovule).

Après fécondation, l'ovaire donnera le grain de blé. Dans le cas du blé, le grain est à la fois le fruit et la graine. En effet, Les enveloppes du fruit sont soudées à celles de la graine. On appelle ce type de fruit un caryopse.

Au moment du battage, les glumes et les glumelles sont perdues. Ses réserves sont contenues dans l'albumen (on dit que la graine est albuminée) composé à 70 % d'amidon et 15 % de gluten (une protéine). L'embryon n'a qu'un cotylédon (le blé est une monocotylédone).

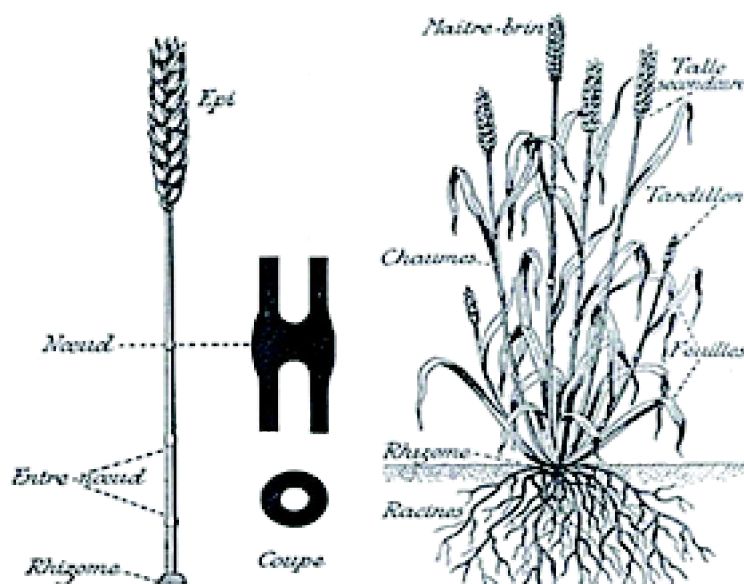


Figure N° 1.4 : Coupe transversale d'un plant de blé

Source : Yves Henry et al., 2000

#### 1.4.2.- Les deux types de blé dur

Les systèmes de cultures ont favorisé des types divers de blé :

- Le blé d'hiver est semé à l'automne. Il caractérise les régions méditerranéennes et tempérées
- Le blé de printemps est semé au printemps et signale les pays à hiver trop rude. La différence principale avec le blé d'hiver est que le blé de printemps supporte assez difficilement les températures basses. C'est grâce à lui que la Sibérie occidentale et le Canada sont devenus de gros producteurs.

#### 1.4.3.- Principaux caractères des espèces de blé

Les principaux caractères des espèces de blé que l'homme a cherché à sélectionner sont :

La robustesse de l'axe de l'épi (qui ne doit pas se casser lors de la récolte), la séparation facile des enveloppes du grain, la grande taille des grains et la compacité des épis (plus maniable que l'épi lâche).

#### 1.4.4.- La sélection génétique du blé

La sélection d'une plante cultivée se base sur le pool de gènes existant dans l'espèce considérée, ce qui justifie l'intérêt de la préservation de la biodiversité. Pour certaines propriétés désirées, telles que la résistance aux maladies fongiques ou virales, la diversité au sein du pool de gènes du blé n'est pas suffisante.

Pour cette raison, le pool a été complété par de nouveaux gènes. Un croisement

entre le blé et ces herbes ne se fait pas naturellement.

Par conséquent, des techniques de culture tissulaire et de cytogénétique (mais pas de génie génétique) doivent être employées pour introduire du matériel génétique exogène dans le génome du blé.

La création et l'utilisation de variétés transgéniques (voir aussi OGM) sont techniquement possibles. Cependant, cette technique n'a pas été utilisée à grande échelle pour le blé.

## **I.5.- Différentes phases de développement du blé dur**

---

### **I.5.1.- Le semis**

Le blé est une plante annuelle cultivée dans les régions semi-arides et notamment dans les hauts plateaux. Le blé d'hiver est le seul type de blé qui existe en Algérie, il est semé à l'automne entre octobre et décembre.

Avant le semis, le sol doit d'abord être aéré et labouré, puis désherbé. Des épandages d'engrais de fond l'enrichissent et le préparent à recevoir les semences. Il faut enfin y passer la herse pour émietter les mottes de terre (2 cm constitue une bonne taille de mottes).

Il existe en gros trois types de préparation de sol avant le semis :

- Lors du labour, la terre est profondément retournée par un premier outil, puis émiettée par un second. Cette technique tend à déstructurer les sols, à parfois les tasser et créer ce qu'on appelle une croûte de battance ;
- La technique du faux semis consiste à faire lever les adventices durant l'interculture (août par exemple) puis à les détruire, ensuite, avec le passage d'un déchaumeur ;
- Dans le cas du semis direct, un seul outil assure la création de la rainure de semis, le dépôt puis le recouvrement de la graine. Cette technique est de plus en plus utilisée car elle est plus respectueuse de la structure et de la vie du sol. Elle limite par exemple les phénomènes d'érosion des sols.

### **I.5.2.- La levée**

Phase germination – levée :

Au début de la germination, la semence de blé est sèche. Après humidification, le grain de blé absorbe jusqu'à 40 – 50 % de son poids d'eau (anonyme, 2002), il sort une radicule (première petite racine), puis un coléoptile.

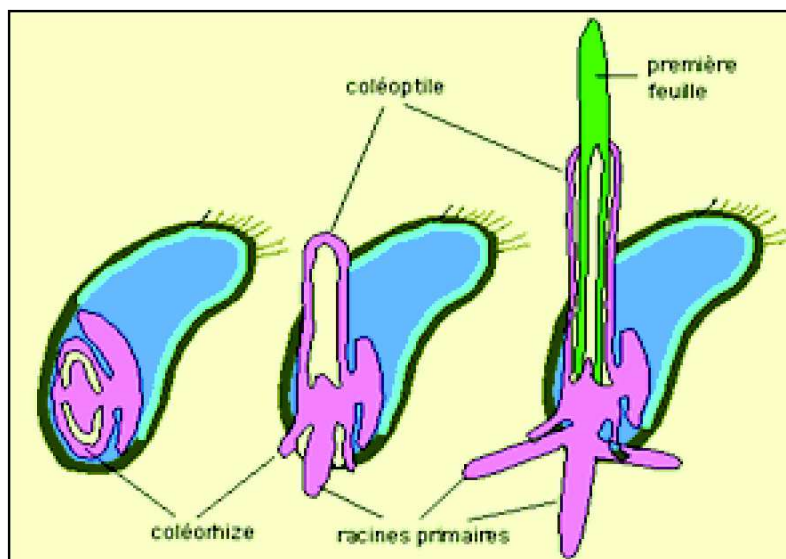
Une première feuille paraît au sommet du coléoptile.

La germination est uniquement déterminée par une somme de température 30 °C base 0 °C. Il s'agit de la température moyenne quotidienne cumulée.

Il faut en moyenne 30 °C pour la germination, soit trois jours à 10 °C ou 10 jours à 3

°C par exemple.

L'axe portant le bourgeon terminal se développe en un rhizome (tige souterraine) dont la croissance s'arrête à 2 cm en dessous de la surface du sol. Il apparaît un renflement dans la partie supérieure du rhizome qui grossit et forme le plateau de tallage.



**Figure N° I.5 : Germination du grain de blé**

**Source :** M.Mosinia et al.2001

#### **Phase levée – tallage :**

La levée commence quand la plantule sort de terre et que la première feuille pointe au grand jour son limbe. Un désherbage peut être pratiqué en pré semis (juste avant le semis) ou en post-semis prélevée (entre le semis et la levée).

Le rythme d'émission des feuilles est réglé par des facteurs externes comme la durée du jour et le rayonnement au moment de la levée. On exprime le nombre de feuilles en fonction des cumuls de températures depuis le semis. (Voir aussi phyllotherm). Le phyllotherme est la durée exprimée en somme de température séparant l'apparition de deux feuilles successives. Il est estimé à 100 °C en base 0 °C et varie entre 80 °C (semis tardif) à 110 °C (semis précoce). La période « quelques feuilles » peut être le moment de désherber et parfois de traiter contre les insectes (larves de taupins, tipules).

#### **Le stade « 3 feuilles » :**

Le stade « 3 feuilles » est une phase repère pour le développement du blé. Des bourgeons se forment à l'aisselle des feuilles et donnent des pousses ou talles. Chaque thalle primaire donne des thalles secondaires. Apparaissent alors, à partir de la base du plateau de tallage, des racines secondaires, qui seront à l'origine de l'augmentation du nombre d'épis.

### **1.5.3.- Le tallage**

Le tallage commence à la fin de l'hiver et se poursuit jusqu'à la reprise du printemps. Il est marqué par l'apparition d'une tige secondaire, une talle, à la base de la première feuille.

Les autres feuilles poussent elles aussi leurs talles vertes. Au moment du plein tallage, la plante est étalée ou a un port retombant.

À l'intérieur de la tige, on peut trouver ce qu'on appelle la pointe de croissance. Elle commence à ressembler à un épi de blé. Initialement, la pointe est sous terre, et au fur et à mesure qu'elle se développe, la pointe de croissance va s'élever dans la talle (tige).

#### **I.5.4.- La montaison**

Au sommet du bourgeon terminal se produit le début du développement de l'épi. Parallèlement, on assiste à l'allongement des entrenœuds.

La montaison se manifeste à partir du stade épi à 1cm du plateau de tallage qui se caractérise par une croissance active des talles.

Le plant de blé a besoin, durant cette phase, d'un important apport d'azote.

À la fin de la montaison apparaît la F1. Ce terme désigne la dernière feuille sortie. Cette feuille est essentielle car elle va à elle seule contribuer à 75 % du rendement (et donc au remplissage du grain). Lorsque les maladies causent des dommages à cette feuille, le rendement a de fortes chances d'être réduit.

#### **I.5.5.- L'épiaison**

Quand la gaine éclatée laisse entrevoir l'épi qui va s'en dégager peu à peu (On parle de gonflement).C'est le moment où apparaissent les extrémités des barbes à la base de la ligule de la dernière feuille. Avant l'apparition de l'épi, on peut voir un gonflement de la gaine.

À ce stade, le nombre total d'épis est défini, de même que le nombre total de fleurs par épi. Chaque fleur peut potentiellement donner un grain (par exemple 25 grains par épi), mais il est possible que certaines fleurs ne donnent jamais d'épi, en raison de déficit de fécondation par exemple.

#### **I.5.6.- La floraison**

La floraison s'observe à partir du moment où quelques étamines sont visibles dans le tiers moyen de l'épi, en dehors des glumelles. Quand les anthères apparaissent, elles sont jaunes ; après exposition au soleil, elles deviennent blanches. À la fin de la floraison, quelques étamines séchées subsistent sur l'épi.

Environ 15 jours après la floraison, le blé commence à changer de couleur : il perd sa couleur verte pour tourner au jaune/doré/bronze.

#### **I.5.7.- Formation du grain**

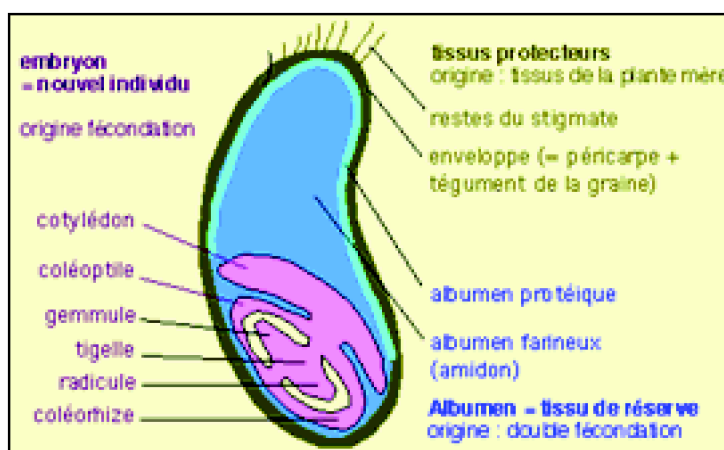
Le cycle s'achève par la maturation qui dure en moyenne 45 jours. Les grains vont progressivement se remplir et passer par différents stades tels que les stades laiteux, puis pâteux, au cours desquels la teneur en amidon augmente et le taux d'humidité diminue. Durant cette phase, les réserves migrent depuis les parties vertes jusqu'aux grains.

Quand le blé est mûr, le végétal est sec et les graines des épis sont chargées de réserves.

La formation du grain se fait quand les grains du tiers moyen de l'épi parviennent à la moitié de leur développement. Ils se développent en deux stades :

- Le stade laiteux où le grain vert clair, d'un contenu laiteux, atteint sa dimension définitive ;
- Le stade pâteux où le grain, d'un vert jaune, s'écrase facilement.
- Les glumes et les glumelles sont jaunes striées de vert, les feuilles sèches et les nœuds de la tige encore verts.

Puis le grain mûrit : brillant, durci, il prend une couleur jaune. À maturité complète, le grain a la couleur typique de la variété et la plante est sèche. À sur maturité, le grain est mat et tombe tout seul de l'épi.



**Figure N° 1.6 : Coupe transversale de l'embryon du grain de blé**

Source : M.Mosinia et al. 2001

## **1.6.- Impact de la sécheresse sur le développement de la culture et ses composantes du rendement**

---

En générale une plante réagit en dehors de la diminutions des composantes du rendement par l'écourte ment de son cycle végétatif lorsqu'elle subit un stress et ce pour garder la pérennité de l'espèce.

Le stress hydrique constitue un important facteur limitant pour la production des céréales puisqu'il affecte tous les aspects de croissance. En effet plusieurs modifications se produisent au niveau de la plante lors d'un déficit hydrique (Monneveux et Belhassen, 1997). L'accumulation d'osmotocums, tel que la proline, la glycine bêtaïne et les sucres, à fin de garder le potentiel de turgescence aussi élevé que possible, reste la modification la plus importante lors d'un stress hydrique (Wang et al, 2003). En plus de ce phénomène d'osmorégulation, le déficit hydrique a un effet sur l'inhibition de la synthèse de certaines protéines et l'activation d'autres (Bewley et Larsen, 1980), tel que les protéines de choc



thermique et les protéines LEA,

Les effets du déficit hydrique ne dépendent pas seulement de l'humidité du sol mais aussi de la durée du stress et du stade de développement de la plante. Le stress hydrique a essentiellement des effets sur l'accroissement des feuilles et l'élongation des racines, sur la croissance relative des parties aériennes et racinaires, ainsi que sur l'activité photosynthétique des feuilles et leurs sénescence.

Ainsi des études sur quatre variétés de blé dur ont démontré que ces variétés "Tomouh, Karim, 1809 MCH et 1804 FD" ont répondu aux conditions de stress hydrique par une hausse dans le niveau de protéines totales et l'accumulation de la proline libre. Cette augmentation a été très remarquable au niveau des racines par rapport aux coléoptiles. (W. ZERRAD 1, S. HILALI 2, S. EL ANTRI & A. HMYENEE1.)

## **II.- Le stress hydrique et ses indicateurs**

### **II.1.- Qu'est ce qu'un stress hydrique**

---

L'état de la végétation représente un indicateur du degré de stress exprimé par les plantes dans leur environnement. Si le terme " stress " est difficile à définir d'un point de vue physiologique, il est communément utilisé pour expliquer une quelconque contrainte affectant négativement la croissance des cultures (Jackson et al. 1981). Il représente le moment où l'état des cellules et tissus végétaux est en dessous de la pleine turgescence. Ceci a lieu quand les pertes d'eau par transpiration excèdent le taux d'absorption hydrique (Kramer, 1969). Ces conditions peuvent survenir lorsque la disponibilité de l'humidité du sol est insuffisante et empêche un bon approvisionnement d'eau par les racines des plantes. Ceci peut aussi arriver quand la température et le rayonnement de l'environnement dans lequel pousse la plante sont élevés, causant ainsi une demande évaporatrice importante. Une telle situation de stress survient pendant une période de la saison où la réserve en eau du sol est fortement épuisée.

### **II.2.- Importance de la détection d'un stress hydrique**

---

La croissance des plantes est influencée par leurs caractéristiques génétiques ainsi que les facteurs environnementaux. Dans le but d'obtenir une production optimale, des efforts ont été déployés pour optimiser les facteurs environnementaux tels que la température, l'humidité, le rayonnement et la concentration en dioxyde de carbone qui influencent directement la croissance et la qualité des produits .

Lorsque un stress hydrique survient, la plupart des processus relatifs à la croissance végétale sont affectés. Cette influence varie selon le degré et la durée du stress ainsi que le stade végétatif de la plante. En général, le potentiel hydrique des feuilles augmente pendant un stress. Cette augmentation du potentiel foliaire entraîne la fermeture des

stomates, la diminution de la transpiration et par conséquent l'augmentation de la température à la surface des feuilles. Cette augmentation de température entraîne une réduction des processus biochimiques.

Un stress sévère affecte l'accumulation de la biomasse, limite la productivité de la plante et le rendement en réduisant la photosynthèse et la croissance des feuilles.

Le recours à des irrigations aux moments opportuns peut empêcher l'installation de stress hydrique irréversible et entraîner une augmentation substantielle des rendements. Tenant compte du coût d'énergie requis pour le pompage de l'eau d'irrigation et de l'état de la ressource en eau et de sa durabilité, il faudra donc veiller à rentabiliser au maximum les quantités d'eau d'irrigation. C'est pour cela que la détection des stress hydriques revêt une importance particulière dans la conduite des cultures, plus particulièrement celles qui en sont très sensibles.

### **II.3.- Les outils de détection du stress hydrique**

---

Les paramètres biophysiques et physiologiques de la plante (photosynthèse, conductance stomatique, teneur en chlorophylle, potentiel hydrique, etc.), du fait de leur relation avec le statut hydrique de celle-ci, peuvent être utilisés comme des indicateurs de son état hydrique. Des appareils existants permettent de mesurer directement ces paramètres dans la culture tel que le psychromètre, afin d'estimer ses besoins en eau et d'effectuer des prévisions de rendement. Cependant à l'échelle des champs, ces mesures sont coûteuses en temps et délicates à mettre en œuvre (Luquet, 2002).

Plusieurs des paramètres biophysiques de la végétation sont estimables par télédétection ( Tableau N° 1.5 ). La contrainte hydrique va conduire la plante à une adaptation de sa morphologie, ce qui va affecter plusieurs variables biophysiques. Les déficits hydriques longs se traduisent par des changements progressifs dans la structure de la plante, qui visent à réduire sa surface transpirante (surface foliaire ou LAI). Le LAI (Leaf Area Index) est la variable de structure la plus importante. Elle caractérise la taille des surfaces d'échange (rayonnement, eau, carbone, etc.) avec l'atmosphère. C'est la mesure de la surface totale du feuillage par unité de surface mesurée au sol (Équation 1). Le LAI affecte le spectre de réflectance de la végétation, c'est aussi un indicateur de croissance végétale (Centre Canadien de Télédétection, 2004).

$$LAI = \frac{S_F}{S_S} \dots\dots\dots(1.1)$$

Avec : -  $S_F$  = Surface foliaire

-  $S_S$  = Surface du sol

	Variables biophysiques	VIS, PIR	PIR, MIR	IRT	MOA	MOP
Structure du couvert	LAI	+++	+++	+	++	+
	Taux de couverture	++++	++++	++	++	+
	Hauteur du couvert	-	-	-	++	-
Propriété des feuilles	Contenu en chlorophylle	+++	-	-	-	-
	Contenu en eau	-	+++	-	+++	+++
	Température	-	-	++++	-	++

"++++" précis et robuste ; "-" non estimable par télédétection ; VIS : visible ; PIR : proche infrarouge ; MIR : moyen infrarouge ; IRT : infrarouge thermique ; MOA : micro-ondes active ; MOP : micro-ondes passives.

**Tableau N° 1.5:** Variables biophysiques estimables par télédétection

Sources : Adapté de Baret (1999)

## II.4.- Les indices de végétation associés au stress hydrique

Les indices de végétation ( Tableau N°1. 6) sont des mesures radiométriques de la variabilité spatiale et temporelle de l'activité photosynthétique de la végétation (Caloz and Puech, 1996), cette dernière étant en relation avec les variables biophysiques du couvert telles que l'indice de surface foliaire (LAI), la biomasse totale, la vigueur de la végétation, etc. Ces variables sont elles-mêmes en relation avec l'état hydrique de la végétation. Leur calcul est basé sur des combinaisons, linéaires ou non, de valeur de réflectance ou de luminance acquises dans plusieurs bandes spectrales. Ces variables s'appuient essentiellement sur les différences des propriétés optiques de la végétation dans le rouge (R : 600-700 nm) et le proche infrarouge (PIR : 700-1300 nm). Les réflectances dans le PIR augmentent avec la présence de la végétation, tandis que celles dans le R diminuent. Plusieurs indices ont été développés pour réduire l'effet de la fraction de sol visible ( *Soil adjusted indices* : SAVI, TSAVI, OSAVI). L'indice de végétation le plus couramment utilisé est le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). L'indice de condition de la végétation ( *VCI* , *Vegetation Condition Index*, (Kogan, 1995)) conçu pour estimer le stress hydrique est entièrement basé sur le NDVI (Équation 2).

$$VCI = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \times 100 \dots\dots\dots (I.2)$$

Avec : - NDVImin et NDVImax = Minimum et maximum du NDVI mesurés sur une période spécifique de 10 jours sur plusieurs années

NDVI = Valeurs respectives du NDVI sur les périodes de 10 jours

Indices	Références
<i>Sans compensation</i>	
$VNI = \frac{PIR}{R}$	Person et Miller, 1972
$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$	Rouse et al., 1974
<i>Avec compensation des effets du sol</i>	
$DIWI = \frac{(PIR - a_{soil}R - b_{soil})}{\sqrt{a_{soil}^2 + 1}}$	Richardson et Wiegand, 1977
$SAMI = \frac{PIR - R}{PIR + R + L} (1 + L)$	Huete, 1988
$OSAVI = \frac{PIR - R}{PIR + R + Y}$	Rondeaux, Steven et Baret, 1996
$GESAVI = \frac{PIR - BR - A}{R + Z}$	Gilabert et al., 2002
<i>Avec compensation des effets atmosphériques</i>	
$ARVI = \frac{PIR - RB}{PIR + RB}$ $RB = R - \gamma(B - R)$ $\gamma = \frac{L_{atm}(R)}{[L_{atm}(P) - L_{atm}(R)]}$	Kaufman et Tanré, 1992
<i>Avec compensation des effets du sol et de l'atmosphère</i>	
$TSARVI = \frac{a_{soil}(PIR - a_{soil}RB - b_{soil})}{RE + a_{soil}PIR - a_{soil}b_{soil} + 0.08(1 + a_{soil})}$ RB cf. ARVI	Bannari, 1996

**Tableau N° 1.6 :** Résumé d'indices de végétation définis à partir de données de télédétection

source : Adapté de (Caloz and Puech, 1996; Gilabert et al., 2002)

L'utilisation des indices de végétation pour une estimation de l'état hydrique de la végétation permettrait difficilement une détection du stress hydrique au bon moment (détection hâtive avec la fermeture des stomates). La température foliaire étant d'une part directement associée au bilan hydrique, et d'autre part mesurable par radiométrie, elle a donné lieu au développement de plusieurs indices spectraux dans l'infrarouge thermique.

## II.5.- La température du couvert végétal comme indicateur de l'état hydrique

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour estimer et mesurer la température d'un couvert végétal, cependant l'utilisation de la télédétection infrarouge thermique est celle qui semble offrir des voies prometteuses. Elle présente l'avantage de la rapidité et de la facilité d'acquisition, nécessaire pour un diagnostic hydrique. Lorsque la température d'un

corps augmente, il émet une radiation sous forme de rayonnement électromagnétique. Les capteurs infrarouges thermiques mesurent cette radiation émise dans la bande infrarouge (IR, 0.7 à 100 $\mu$ m) du spectre électromagnétique (Figure suivante) et la relie à la température du corps par la loi de Stefan-Boltzmann et la loi de Planck (Gaussorgues, 1999).

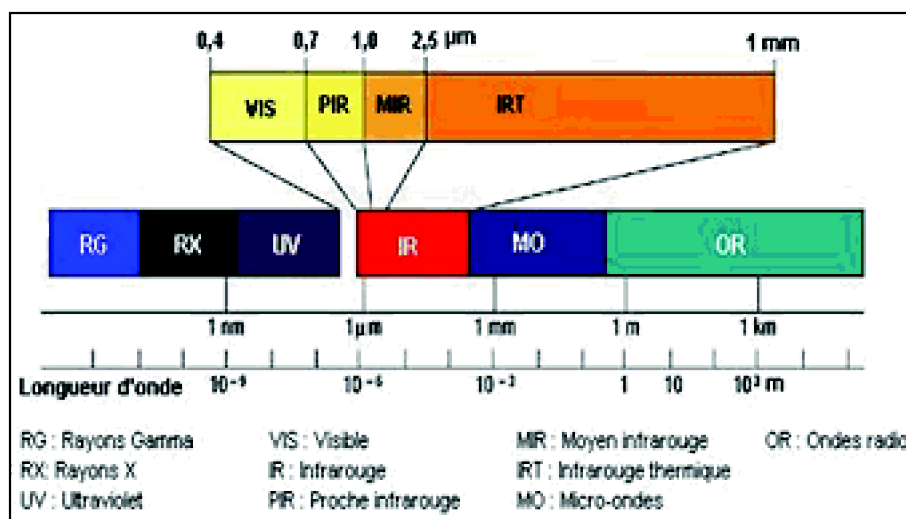


Figure N° I.7: Spectre électromagnétique

Source : (S.O. Kotchi, 2004)

### II.5.1.- Température de surface et température de couvert

Pour une meilleure compréhension de ce que mesure le radiomètre, il est nécessaire de clarifier les expressions : température de couvert végétal ( $T_c$ ), température de surface ( $T_s$ ).

La température du couvert ( $T_c$ , Canopy temperature) a été définie comme la température radiométrique mesurée dans l'infrarouge thermique (IRT) et pour laquelle la végétation est dominante dans le champ de vue du capteur (c-à-d LAI = 2), l'effet du sol étant minime (Moran, 2000).

$T_s$  est la température de surface, elle intègre tous les objets présents dans le champ de vue du capteur (sol, végétation, ou tout autre objet).

De nombreuses études ont été faites pour montrer la corrélation entre la température de surface des feuilles et son état hydrique. (Slack et al. 1981 cité par, Olufayo, 1991).

La radiométrie infrarouge n'a aucun contact avec la surface quand il mesure la température du couvert. L'appareil correspond aux longueurs d'onde du spectre électromagnétique comprise entre (8-14 $\mu$ m ou 10.5-12.50 $\mu$ m) cité par Chasseray (1984). Dans cette gamme, l'énergie solaire réfléchie est négligeable devant le rayonnement de grande longueur d'onde émis provenant des surfaces naturelles et dont la puissance, appelée émittance (quantité d'énergie émis par unité de surface et par unité de temps), est exprimée par la loi de Stefan – Boltzman :

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 = \sigma T_r^4 \dots \dots \dots (I.3)$$

Avec :

-  $\varepsilon$  = émissivité de la surface ( $0 \leq \varepsilon \leq 1$ )

-  $\sigma$  = constante de stefan Botzmann ( $5,67.10^{-8} \text{ W.m}^2.\text{°K}^{-4}$ )

-  $T_s$  = température de surface ( $\text{°K}$ )

-  $T_r$  = température radiative ( $\text{°K}$ )

Importance de la température du couvert dans le bilan énergétique surfacique :

On considère le cas général (sol nu ou cultivé), durant une journée, l'équation classique du bilan d'énergie en un temps donné est la suivante :

$$R_n = G + H + LE \dots \dots \dots (I.4)$$

Avec :

G = densité de flux conductif à la surface du sol, qui s'exprime par la formule :

$$G = k_{12}(T_1 - T_2) (\text{W.m}^{-2}) \dots \dots \dots (I.5)$$

où  $k_{12}$  est la conductivité thermique du sol ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ) entre l'horizon en profondeur à une température  $T_2$  (K) et le sol en surface à une température  $T_1$  (K) .

LE = densité de flux de chaleur latente qui s'exprime par la formule :

$$LE = \frac{\rho C_p}{\gamma} \frac{(e_s - e_a)}{r_s + r_a} (\text{W.m}^{-2}) \dots \dots \dots (I.6)$$

Où :  $\rho C_p$  est la capacité calorifique de l'air ( $1212 \text{ J.K}^{-1}.\text{m}^{-3}$ ) ;  $\gamma$  est la constante psychrométrique ( $66,1 \text{ Pa.K}^{-1}$ ) ;  $r_s$  la résistance stomatique ( $\text{s.m}^{-1}$ ) d'un couvert végétal ;  $r_a$  la résistance aérodynamique ( $\text{s.m}^{-1}$ ) de l'air ;  $e_s$  et  $e_a$  les pressions de vapeur d'eau de surface et de l'air respectivement (Pa).

- H = densité de flux de chaleur sensible, qui s'exprime par la formule suivante :

$$H = \rho C_p \frac{(T_s - T_a)}{r_a} (\text{W.m}^{-2}) \dots \dots \dots (I.7)$$

-  $R_n$  = rayonnement net qui peut s'écrire sous la forme :

$$R_n = (1 - a) R_g - \varepsilon R_a - \varepsilon \sigma T_s^4 (\text{W.m}^{-2}) \dots \dots \dots (I.8)$$

Avec :  $R_g$  = rayonnement global ;  $R_a$  = rayonnement atmosphérique ;  $a$  = albédo

En remplaçant ces différentes équations dans l'équation du bilan radiatif, on obtient l'expression générale du bilan d'énergie développé par Monteith ( 1973 ) :

$$T_s - T_a = \frac{r_a R_n}{\rho C_p} \frac{\gamma \left( 1 + \frac{r_s}{r_a} \right)}{\Delta + \gamma \left( 1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} - \frac{DPVS}{\Delta + \gamma \left( 1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \quad (^\circ\text{C}) \dots\dots\dots (I.9)$$

Où : DPVS est le déficit de pression de vapeur saturante  $e_s - e_a$  (es et ea étant les tensions de vapeur saturée et moyenne de l'air respectivement) ;  $\Delta$  est la pente de la courbe de pression de vapeur saturante ;

Lorsque le sol est totalement couvert par la végétation, alors  $T_s = T_c$  et la formule devient :

$$T_c - T_a = \frac{r_a R_n}{\rho C_p} \frac{\gamma \left( 1 + \frac{r_c}{r_a} \right)}{\Delta + \gamma \left( 1 + \frac{r_c}{r_a} \right)} - \frac{DPVS}{\Delta + \gamma \left( 1 + \frac{r_c}{r_a} \right)} \quad (^\circ\text{C}) \dots\dots\dots (I.10)$$

La plupart des surfaces naturelles, tout comme les végétaux, ont leur maximum d'émission dans l'IRT. Étant donné que la température des feuilles est directement reliée à l'état hydrique de la plante, plusieurs indices spectraux ont été développés dans l'IRT pour la détection du stress hydrique. Ces indices font appel à la température radio métrique mesurée aussi par télédétection.

S.O. Kotchi ( 2004 ) réalisa un travail ayant pour principal objectif le développement d'un indicateur de l'état hydrique de la culture, accessible par thermographie infrarouge, permettant la détection précoce et la prévention du stress hydrique. Il conclut que le déficit hydrique affecte plusieurs variables physiologiques de la plante et est synonyme de baisse de rendement et de qualité pour des végétaux de grande culture tels que la pomme de terre. Ce qui démontre que l'irrigation devient une solution préconisée et doit cependant permettre d'appliquer seulement la quantité d'eau dont la plante a besoin pour éviter le lessivage des fertilisants et pesticides pouvant contaminer la nappe phréatique.

La télédétection infrarouge thermique, utilisée depuis plus de 20 ans, a permis de développer plusieurs outils de détection du stress hydrique.

Le travail de S.O. Kotchi a consisté en des mesures de température effectuées sous serre sur deux variétés de pomme de terre. Les mesures ont concerné des plants induits en stress hydrique et des plants témoins à plusieurs stades de développement de la culture.

L'étude a montré :

Une détection hâtive du déficit hydrique par thermographie infrarouge ainsi que l'influence du stress sur les variables biophysiques (température foliaire, surface foliaire,

photosynthèse et conductance stomatique) et le rendement.

La différence de température entre le couvert végétal et l'air ( $T_c - T_a$ ) est fortement corrélée au stress hydrique.

Belkacemi K. (2002) a réalisé un travail similaire au notre sur le même site (Station expérimentale de l'INA) et avec le même dispositif d'essai (Traitements ETM, Modéré, Sévère et Pluvial) .

Les résultats qu'elle obtient ont permis de conclure que :

Pour le traitement ETM, les arrosages maintiennent les valeurs de  $T_s - T_a$  au voisinage de 0.

Pour l'ensemble des traitements, l'évolution des valeurs des écarts ( $T_s - T_a$ ) est très sensible aux apports d'eau. La diminution des écarts  $T_s - T_a$  dépend de l'importance des apports d'eau et de la durée du stress subi auparavant.

La diminution des écarts  $T_s - T_a$  n'est pas toujours immédiate, mais il existe une période de latence, cette période est plus ou moins longue suivant l'état de stress de la culture.

Les ordres de grandeurs des variations des écarts  $T_s - T_a$  observés ont été de :

- Traitement Témoin ETM :  $T_s - T_a \leq 4.10$  °C
- Traitement Modéré :  $T_s - T_a \leq 12.07$  °C
- Traitement Sévère :  $T_s - T_a \leq 14.70$  °C
- Traitement Pluvial :  $T_s - T_a \leq 14.20$  °C

## **II.6.- Les indices spectraux IRT de détection du stress hydrique**

---

La température de surface des couverts végétaux a conduit au développement de plusieurs indicateurs de stress hydrique. Le fondement théorique de ces indicateurs repose sur la relation existant entre la température des plantes et leur état hydrique.

### **II.6.1.- Canopy Temperature (CT)**

L'un des premiers indices spectraux IRT utilisé pour l'évaluation de l'état hydrique de la plante est la température du couvert (*Canopy Temperature (CT)*), (Berliner et al., 1984; Moran et al., 2000). Sa détermination nécessite uniquement la mesure de la température par radiométrie (thermomètre à infrarouge). Cet indice est fortement corrélé au statut hydrique de la plante. Cependant, faute de valeurs de référence, et étant fortement influencé par les conditions du milieu (humidité, vent, température ambiante, etc.), son utilisation pour la détection du stress hydrique et le pilotage de l'irrigation est problématique.

### **II.6.2- Temperature Stress Day (TSD)**

L'absence de valeurs de référence dans l'utilisation de CT comme indicateur de stress



hydrique a amené plusieurs auteurs à développer l'indice TSD (Jackson et al., 1983) à l'aide de plants de référence à proximité de la culture. Ces plants évoluant dans les mêmes conditions agro météorologiques que le champ sont alors bien irrigués tout au long du cycle cultural. Le TSD (Équation I.11) mesure la différence de température entre le couvert végétal de la culture et le couvert d'une parcelle témoin bien irriguée.

$$TSD = T_c - T_{ct} \dots\dots\dots(I.11)$$

Avec : -  $T_c$  = Température du couvert (°C)

-  $T_{ct}$  = Température du couvert témoin (°C)

Lorsque les besoins en eau de la culture sont suffisamment comblés, la valeur de TSD avoisine 0. Pour des valeurs de TSD supérieures à 0, l'alerte de l'irrigation est donnée.

### II.6.3- Stress Degree-Day (SDD)

Le SDD (Idso et al., 1977) repose sur la différence entre la température du couvert et la température de l'air. Il constitue le premier indicateur tenant compte de la correspondance entre l'évapotranspiration et la température de surface (Luquet, 2002). Le SDD mesure la différence cumulative entre la température du couvert et la température de l'air (Équation I.12).

$$SDD = \sum_{i=1}^n (T_c - T_a)_i \dots\dots\dots(I.12)$$

Avec :

$T_c$  = Température du couvert végétal mesurée environ 1 heure près midi solaire (°C)

$T_a$  = Température de l'air mesurée à 1.50 m au dessus du sol (°C)

n = Jour n

Le SDD permet de suivre l'état hydrique de la culture et d'effectuer des prévisions de récolte. Selon une étude effectuée sur le blé en Arizona (Kogan, 1995), lorsque la valeur de SDD devient positive, cela entraîne une perte de rendement.

L'écart entre  $T_s - T_a$  étant considéré comme un indicateur du statut hydrique de la plante, il faut toutefois préciser qu'il dépend principalement de trois sources de variabilité :

Une variabilité aléatoire due aux paramètres climatiques (rayonnement, température de l'air, vitesse du vent ...).

Une variabilité supposée contrôlée (régimes hydriques ...).

Une variabilité locale pouvant être attribuée principalement à la disposition et l'orientation des parcelles.

Sur un essai d'irrigation du blé, D.K. Das (1986 – 1987) a obtenu une bonne corrélation entre le SDD et le taux d'épuisement de la réserve en eau du sol et a conclut que les irrigations du blé peuvent être déclenchées lorsque le SDD positif soit égal ou en dessous de 10. Ce qui rejoint la conclusion de Jackson (1977).

#### II.6.4.- Temperature Condition Index (TCI)

L'indice de condition de température ou TCI (Kogan, 1995) (Équation I.13) de même que le VCI (Vegetation Condition Index, Équation I.2) sont des indices de sécheresse basés sur la radiation émise et réfléchi par la couverture végétale (Vogt et al., 2000). Ils sont utilisés pour estimer la vigueur de la végétation, et par conséquent sa condition hydrique. Ces indicateurs ont été conçus pour utiliser des mesures satellitaires comme celles du capteur AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) du satellite NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Le TCI varie dans l'intervalle [0, 100].

$$TCI = \frac{T_{smax} - T_s}{T_{smax} - T_{smin}} \times 100 \dots\dots\dots(I.13)$$

Avec :

$T_s$  = Température de surface (°C)

$T_{smax}$  et  $T_{smin}$  = Max. et Min. de  $T_s$  sur plusieurs années (°C)

#### II.6.5.- Canopy Temperature Variability (CTV)

Étant donné que le sol n'est pas homogène à l'intérieur d'un champ, le manque d'eau va entraîner une variabilité spatiale de la température du couvert. La variabilité de la température du couvert végétal à l'intérieur d'une parcelle est ainsi utilisée comme un indicateur de stress hydrique à l'intérieur de cette parcelle (Berliner et al. 1984; Bariou et al., 1985a; Penuelas et al., 1992; Moran, 2000). Le CTV est l'écart-type de la température moyenne du couvert (Équation N° I.14).

$$CTV = \sigma(T_c) \dots\dots\dots(I.14)$$

Avec :

$\sigma$  = Ecart – Type

$T_c$  = Température du couvert végétal (C)

Lorsque la valeur du CTV excède 0.7, le couvert est considéré en stress hydrique. L'un des avantages de l'indice CTV est qu'il ne nécessite pas la mesure de la température de l'air, et peut être calculé avec des valeurs de  $T_c$  acquises à partir de capteurs IRT aéroportés sans correction atmosphérique (Moran, 2000).

Les facteurs environnementaux constituant un frein à ces premiers indices précités, des modèles plus complexes, alliant la mesure de la température de surface par des capteurs IRT et la physique de l'évapotranspiration, ont été élaborés. Parmi ceux-ci, citons le Crop Water Stress Index (Wiegand et al., 1983) et le Water Deficit Index (WDI, (Moran et al., 1994)) qui sont bien connus.

#### II.6.6- Crop Water Stress Index (CWSI)

À partir du bilan d'énergie (Annexe 1), Monteith et Szeicz (1962) ont développé une expression mettant en relation la différence entre la température du couvert végétale et

celle de l'air ( $T_c - T_a$ ) et la radiation nette, la vitesse du vent, le déficit de pression de vapeur de l'air, la résistance aérodynamique et la résistance du couvert (Équation N° I.15). Cette équation est la base théorique du développement de l'indice CWSI par Jackson et ses collègues (Idso et al., 1981a) (Équation N°I.16).

$$(T_c - T_a) = \frac{r_a R_n}{C_c} \frac{\gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} - \frac{VPD}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \dots\dots\dots (I.15)$$

Avec :

$R_n$  = Rayonnement net ( $W.m^{-2}$ )

$C_c$  = Capacité volumétrique de l'air ( $J. ^\circ C^{-1}.m^{-3}$ )

$\Delta$  = Pente de la courbe de pression de vapeur saturante et de la température (kPa.  $^\circ C^{-1}$ )

VPD = Déficit de pression de vapeur de l'air (kPa)

$\gamma$  = Constante psychrométrique (kPa.  $^\circ C^{-1}$ )

$r_a$  = Résistance aérodynamique ( $s.m^{-1}$ )

$r_c$  = Résistance du couvert au transport de la vapeur ( $s.m^{-1}$ )

$$CWSI - J = 1 - \frac{\lambda E_r}{\lambda E_p} = \frac{\gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right) - \gamma^*}{\lambda + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} = 1 - \frac{ETR}{ETM} \dots\dots\dots (I.16)$$

Avec :

- $\lambda E_r$  = Flux de chaleur latente actuelle (pour  $r_c$ ) ( $W.m^{-2}$ )
- $\lambda E_p$  = Flux de chaleur latente potentielle (pour  $r_c - r_{cp}$ ) ( $W.m^{-2}$ )
- $\gamma^* = \gamma \left(1 + \frac{r_p}{r_a}\right)$  (kPa  $^\circ C^{-1}$ )
- $r_{cp}$  = résistance du couvert à l'évapotranspiration potentielle ( $s.m^{-1}$ )

Un modèle empirique du CWSI a été développé par Idso (Équation N°I.17). Son calcul fait appel à deux lignes de base : la ligne de base « non-stressée », qui représente les plants dont l'apport en eau n'est pas limité, et la ligne de base « du maximum de stress », qui représente les plants soumis à un déficit hydrique extrême ( [Figure N°I.8](#) ). Le calcul de la ligne de base fait appel à la relation linéaire qui existe entre ( $T_c - T_a$ ) et le VPD dans des conditions d'apports en eau maximales. Plusieurs études expérimentales (Idso, 1982; Jones, 1999) ont montré que la ligne de base « non-stressée » peut varier

selon le type de culture et les conditions agroclimatiques dans lesquelles celle-ci évolue.

$$CWSI\_I = 1 - \frac{\lambda E_r}{\lambda E_p} = \frac{(T_c - T_a)_I - (T_r - T_a)_r}{(T_c - T_a)_I - (T_r - T_a)_u} \dots\dots\dots (1.17)$$

Où les indices I, u et r indiquent respectivement le minimum, le maximum et la valeur mesurée de la différence de température (Tc – Ta).

Pour une végétation entièrement couvrante avec suffisamment d'eau :

$$(T_c - T_a)_I = \frac{r_a R_n}{C_p} \frac{\gamma \left(1 - \frac{r_{cl}}{r_a}\right)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_{cl}}{r_a}\right)} - \frac{VPD}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_{cl}}{r_a}\right)} \dots\dots\dots (1.18)$$

Où:  $r_{cl} = r_{cp}$

Pour une végétation entièrement couvrante avec une indisponibilité en eau :

$$(T_c - T_a)_u = \frac{r_a R_n}{C_p} \frac{\gamma \left(1 + \frac{r_{cu}}{r_a}\right)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_{cu}}{r_a}\right)} - \frac{VPD}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_{cu}}{r_a}\right)} \dots\dots\dots (1.19)$$

Où :  $r_{cu}$  = Résistance du couvert associée à une fermeture presque complète des stomates

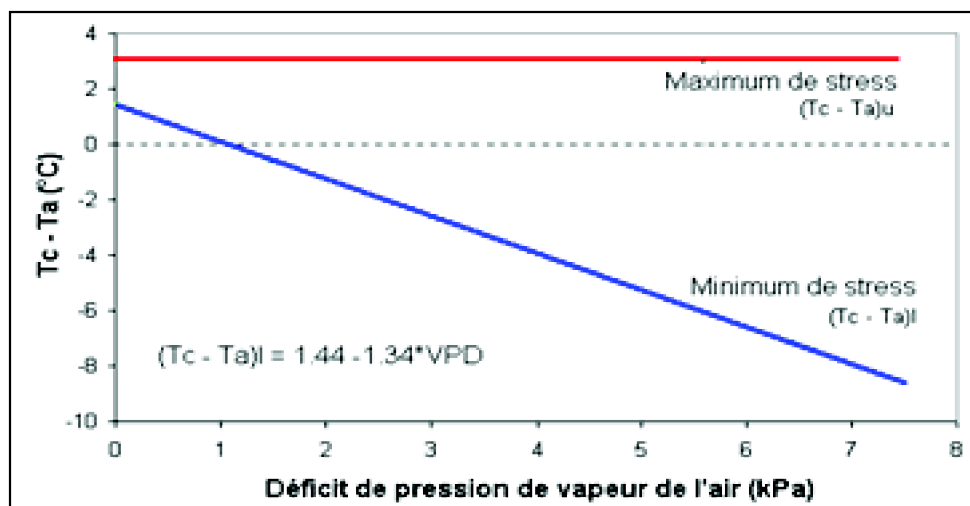
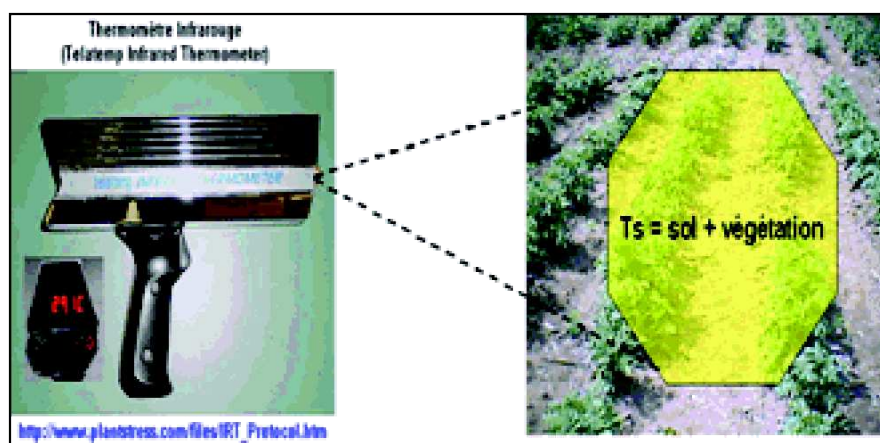


Figure N° 1.8 : Relation entre le VPD et (Ts-Ta) permettant le calcul du CWSI

Source : Adapté de USWCL (2004)

L'utilisation du CWSI a obtenu un succès assez considérable aux États-Unis (Luquet, 2002) et a conduit à la commercialisation d'instruments de mesures du CWSI au champ. C'est le cas du radiothermomètre *Everest Interscience Model 100.3ZL* (Everest

Interscience Inc., AZ, USA). Un des avantages du CWSI est sa relation avec le rendement de la culture. Son application à l'échelle locale et régionale est cependant entravée par la difficulté de mesurer la température des couverts hétérogènes. La plupart des capteurs infrarouges au sol, aéroportés ou satellitaires mesurent une température composite du sol et de la végétation ( Figure N°1.9 ). Quand la végétation est clairsemée, la température du sol domine la température de surface mesurée par le capteur IRT et biaisée l'interprétation du CWSI. À cet effet, Jackson et al. (1983) cités par Moran et al. (1994), ont émis cet avertissement : « il est important que le sol n'apparaisse pas dans le champ de vue du thermomètre infrarouge. La température du sol peut être grandement différente de celle de la végétation et sa présence dans la mesure peut entraîner des erreurs importantes dans le CWSI ». Selon Moran et al. (1994), une approche de solution serait de combiner aux mesures de thermographie infrarouge des indices de végétation pour corriger la fraction de sol visible par le capteur, ou de circonscrire les mesures IRT à l'échelle de la feuille.



**Figure N° 1.9 :** Mise en évidence de la température composite mesurée par radiothermométrie.

Jackson, Idso, Reginato et Pinter (1981) ont calculé le CWSI pour quatre parcelles à partir du 72<sup>ème</sup> JAS et 145<sup>ème</sup> JAS. Il concluent que le CWSI augmente avec le temps pour atteindre la valeur de 0.67°C , puis après une irrigation le CWSI n'atteint pas immédiatement la valeur 0 mais reste 5 à 6 jours pour atteindre la valeur minimale ( temps d'adaptation de la plante aux modifications des conditions hydriques ). Des résultats similaires ont été trouvés sur coton par Ehler (1973) et sur sorgho par Idso et Ehler (1976).

En 1990, Olufayo en mesurant les CWSI sur Sorgho, remarqua qu'il est très fortement influencé par les irrigations. En effet, les valeurs des CWSI obtenus pour les parcelles irriguées et stressées ont été respectivement de 0 et proche de 1. La même constatation a été observée par Mebrek (2002).

O'tools et Hatfield (1982) étudièrent l'effet du vent sur CWSI pour trois types de cultures

(Maïs, Sorgho et Coton) et trouvèrent que le CWSI diminue lorsque la vitesse du vent augmente.

Les travaux de D.K. Das (1986 – 1987) ont montré que lorsque le CWSI atteint la valeur de 0.3, une réduction de la croissance devient imminente. Si le CWSI atteint 0.5, la croissance diminue : Il conclut donc que les irrigations doivent être appliquées entre ces deux valeurs seuils de CWSI (0.3 à 0.5), valeurs proposées aussi par Jackson (1983).

### II.6.7- Water Deficit Index (WDI)

Le concept du trapèze, combinant les indices de végétation spectraux ( Tableau N°1.6 ) et la température des couverts hétérogènes, est proposé pour permettre une application du CWSI à la végétation partiellement couvrante. Suivant cette approche, un nouvel indice, le WDI, a été développé par Moran et al. (1994), pour évaluer le taux d'évaporation des végétations entièrement et partiellement couvrantes. Le calcul du WDI fait appel à la température et à la réflectance (rouge et proche infrarouge) du couvert, ainsi qu'à un nombre de données météorologiques du site (la radiation nette, le déficit de pression de vapeur de l'air, la vitesse du vent et la température de l'air).

Luquet (2002) décrit le calcul du WDI, basé sur la construction, expérimentale ou théorique, d'un trapèze ( Figure N°1.10 ) dont les quatre sommets correspondent aux conditions extrêmes de la culture en termes de taux de couverture et de température. La construction de ce trapèze repose sur l'hypothèse de linéarité à ses bornes. Toutes les combinaisons entre le taux de couverture et

( $T_c - T_a$ ) sont supposées contenues dans le trapèze, permettant alors de calculer le WDI (Équation N° 1.24 à Équation N° 1.26) de façon similaire au CWSI, mais pour un taux de couverture donné. Les valeurs des sommets du trapèze sont calculées (Équation 1.20 à Équation 1.25) à l'aide de l'équation du bilan d'énergie.

$$(T_c - T_a)_1 = \frac{r_a (R_n - G)}{C_v} \frac{\gamma \left(1 + \frac{r_a}{r_s}\right)}{\Delta - \gamma \left(1 + \frac{r_a}{r_s}\right)} - \frac{VPD}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_a}{r_s}\right)} \dots \dots \dots (1.20)$$

Avec :  $G$  = Flux de chaleur dans le sol ( $W.m^{-2}$ ) ;  $C_v$  = Capacité volumique de l'air ( $J.^{\circ}C^{-1}.m^{-3}$ )

$$(T_c - T_a)_2 = \frac{r_a (R_n - G)}{C_v} \frac{\gamma \left(1 - \frac{r_a}{r_s}\right)}{\Delta + \gamma \left(1 - \frac{r_a}{r_s}\right)} - \frac{VPD}{\Delta - \gamma \left(1 + \frac{r_a}{r_s}\right)} \dots \dots \dots (1.21)$$

Avec :  $r_{cx}$  = Résistance de couvert maximale.

$$(T_c - T_a)_3 = \frac{r_a (R_n - G)}{C_v} \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} - \frac{VPD}{\Delta + \gamma} \dots \dots \dots (1.22)$$

$$(T_s - T_a)_4 = \frac{r_a (R_n - G)}{C_v} \dots\dots\dots (I.23)$$

$$WDI = \frac{(T_s - T_a) - (T_s - T_a)_{L13}}{(T_s - T_a)_{L24} - (T_s - T_a)_{L13}} \dots\dots\dots (I.24)$$

Avec :

$T_s - T_a$  = Ecart  $T_s - T_a$  pour un pourcentage de couvert donné

$(T_s - T_a)_{L13}$  = Ecart  $T_s - T_a$  sur la ligne 1,3 (très irriguée)

$(T_s - T_a)_{L24}$  = Ecart  $T_s - T_a$  sur la ligne 2,4 (très sèche)

Graphiquement, la valeur de l'indice WDI est définie par le rapport de distances AC/AB :

$$WDI = \frac{AC}{AB} \dots\dots\dots (I.25)$$

Le rapport de l'évapotranspiration réelle et potentielle équivaut au rapport de distances CB/AB, d'où :

$$WDI = 1 - \frac{\lambda E_r}{\lambda E_p} \dots\dots\dots (I.26)$$

Figure N° I.10 : Illustration du WDI calculé par la méthode du trapèze

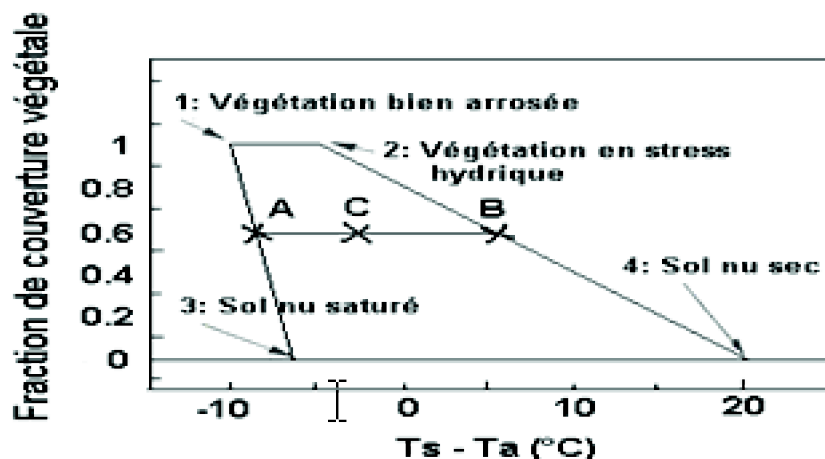


Figure N° I.10 : Illustration du WDI calculé par la méthode du trapèze

Source : Adapté de Moran et al. (1994)

Le calcul du WDI nécessite de connaître le taux de couverture de la végétation estimable par télédétection à partir des indices de végétation tels que le NDVI et le SAVI ( [Tableau N°1.6](#) ). La méthode a été développée afin d'utiliser des mesures satellitaires ou aéroportées. Cependant, la résolution temporelle et spatiale des mesures satellitaires n'offrent pas actuellement un suivi rigoureux de l'état hydrique de la culture à l'échelle de la parcelle. Dans les régions arides et semi-arides, la thermométrie infrarouge est un bon

indicateur du stress hydrique des végétaux, cependant elle est confrontée à une sévère limitation en climat humide et pour des régions soumises à de fortes variations climatiques (Hippis et al., 1985). En plus de la dimension temporelle et des contraintes météorologiques, le WDI présente des faiblesses dans le cas de couverts fortement hétérogènes où les effets d'ombrage peuvent être déterminant dans la caractérisation de la température de surface (Luquet et al., 2004).

Les limites constatées avec les indicateurs de stress ont conduit au développement de méthodes 3D qui offrent la possibilité d'étudier la représentativité de l'information thermique au niveau de la feuille, de la plante et du couvert. Ces approches 3D ont été développées afin de mieux considérer la complexité des échanges thermiques au sein du système SVAT (sol-végétation-atmosphère), pour une meilleure évaluation de l'intensité du stress subi par la culture, sa représentativité dans le couvert et sa signification en terme de réduction de la transpiration (Luquet et al. 2001; Luquet, 2002). Cependant si cette méthode s'avère réaliste, elle pose le problème de lourdeur des mesures architecturales couplées à une digitalisation 3D, qui demande un équipement onéreux et un personnel qualifié (Luquet, 2002).

Une solution pour palier à la faiblesse des capteurs utilisant la spectroradiométrie infrarouge thermique dans la mesure de la température des couverts hétérogènes est de faire appel à des capteurs imageurs. Ces capteurs restituent l'aspect spatial de la mesure, et permettent d'identifier la végétation sur la scène mesurée. Les caméras de thermographie infrarouge, de plus en plus utilisées dans l'industrie et le milieu médical, apportent cette solution.

## **II.7.- La teneur en eau relative RWC**

---

La teneur en eau relative (RWC) est un paramètre approprié pour décrire l'état hydrique des plantes en termes de conséquence physiologique due à un déficit hydrique.

La teneur en eau relative exprime la teneur en eau actuelle dans les feuilles par rapport à la teneur en eau maximale en cas de turgescence. Elle mesure le déficit hydrique dans les feuilles.

$$RWC = \frac{PF - PS}{PT - PS} \times 100 \dots\dots\dots(1.27)$$

Avec :

PF = Poids frais des feuilles

PS = Poids sec des feuilles

PT = Poids des feuilles à pleine turgescence

Les valeurs usuelles du RWC sont comprises entre 98 % (turgescence) à 40 % (feuilles sèches). Pour la plupart des espèces, le RWC au point de flétrissement est de l'ordre de 60 à 70 %.

P.C. Nautiyal et al. (1990) ont étudié les teneurs en eau relatives RWC pour différents traitements hydriques :



T100 : Témoin : irrigations à des intervalles de 10 j de l'émergence à la récolte.

T101: stress imposé durant la phase végétative; irrigation au 20 J.A.S.

T102: stress imposé durant la phase végétative; irrigation au 20 J.A.S .suivie de deux irrigations à 5 j d'intervalles.

En général, P.C. Nautiyal et al. (1990) trouvèrent des valeurs de RWC relativement basses avec une diminution des RWC pour les traitements stressés (voir tableau N°1.7) :

**Tableau N°1.7 : Teneur en eau relative RWC (P.C. Nautiyal et al. 1990)**

Traitement	RWC (%)
T100 T101 Ecart Type	87.00 71.00 0.69
T100 T102 Ecart Type	86.00 73.00 0.70

De même, les valeurs des RWC obtenus par I.R.Palomo et al. (2004) Pour deux traitements hydriques irrigué et sec montrent qu'il y a une tendance générale vers une diminution des RWC pour le traitement sec quoique les comparaisons statistiques n'ont pas montré de différences significatives :

**Tableau N° 1.8 : Teneur en eau relative (I.R.Palomo et al. 2004)**

Date	Irrigué	Sec
Oct 28	85.0	75.9
Nov 04	91.2	86.6
Nov 17	93.3	83.9
Nov 24	88.6	84.8
Dec 12	81.9	78.6
Nov 19	85.4	77.2

Les mesures effectuées sur la teneur en eau relative RWC ( Belkacemi K., 2002 ) ont montré que les différences observées entre les traitements ETM ( témoin irrigué ) , Stress Modéré , Stress Sévère et Pluvial ( témoin non irrigué ) ont été statistiquement significatives (  $p = 0.0432$  ) et ont donné lieu aux groupes homogènes suivants :

Traitement	Groupe homogène
ETM	A
Modéré et Pluvial	AB
Sévère	B

Les variations des teneurs en eau relatives ont été :

## II.8.- Le potentiel foliaire

Le potentiel foliaire traduit l'état de liaison de l'eau à l'intérieur des tissus végétaux. Lorsque sa valeur absolue est faible (de 1 à 5 bars), la plante transpire sans difficulté. Lorsqu'il s'élève (au-delà de 10 bars), des mécanismes de régulation provoquent la

fermeture des stomates. Sa mesure s'opère dans une chambre de pression, où l'on introduit la feuille fraîchement coupée avec l'extrémité de son pétiole arrivant à l'air libre à travers un joint d'étanchéité. Il suffit d'observer la pression à exercer pour voir apparaître une gouttelette à la surface sectionnée du pétiole. La pression nécessaire à cette exsudation donne le potentiel hydrique de la feuille prélevée. La mesure du potentiel hydrique est un outil simple de mesure de l'état de l'eau dans la plante, son utilisation a permis de comprendre les mouvements de l'eau dans celle-ci et de repérer son niveau de confort hydrique. De nos jours, les efforts de recherche visent à proposer de nouveaux indicateurs physiologiques, analogues au potentiel hydrique, qui peuvent fournir automatiquement et sans aggraver la plante une information précise et fiable sur le besoin d'irrigation.

### **III.- Outils de pilotage des irrigations**

Comme nous l'avons déjà cité plus haut l'Algérie est face à un problème de dépendance céréalière mondiale. La production nationale demeure faible et les rendements oscillent au gré des aléas climatiques entre 8 et 10 quintaux à l'hectare. Les variations climatiques défavorables, marquées particulièrement par un déficit hydrique sévère et régulier souvent accompagné par de fortes chaleurs en fin de cycle, sont souvent un frein à toute action d'amélioration.

Les variations de la disponibilité en eau sont donc à l'origine des plus importantes irrégularités des rendements. Le recours à l'irrigation de complément pour sécuriser et accroître les rendements est devenue une nécessité, son but est donc de maintenir en moins le rendement à un niveau correct.

Il existe plusieurs méthodes de pilotage des irrigations :

- Méthodes liés au sol (notamment le bilan hydrique)
- Méthodes basées sur les indicateurs d'état du végétal (notamment la température du couvert, le potentiel hydrique foliaire, etc...)

#### **III.1.- Bref aperçu du bilan hydrique**

---

L'équation générale du bilan hydrique peut être écrite sous la forme suivante :

$$R(t) = R(t - 1) + P + I - ETR - D - R_c - R_{uis} \dots\dots\dots (1.28)$$

Où R représente la réserve en eau du sol sur la profondeur maximale racinaire  $P_x$ , t le temps (en général les simulations des réserves prennent en compte un pas de temps journalier), P et I les pluies et irrigations respectivement, D l'eau perdue par drainage au-delà de la profondeur racinaire,  $R_c$  les remontées capillaires,  $R_{uis}$  le ruissellement et ETR l'évapotranspiration réelle.

En cas d'une culture conduite sans restriction hydrique et en l'absence d'une nappe

phréatique au voisinage des racines, le terme  $R_c$  est négligée. Le terme  $R_{uis}$  peut aussi être négligée dans le cas des parcelles planes (sans pente remarquable).

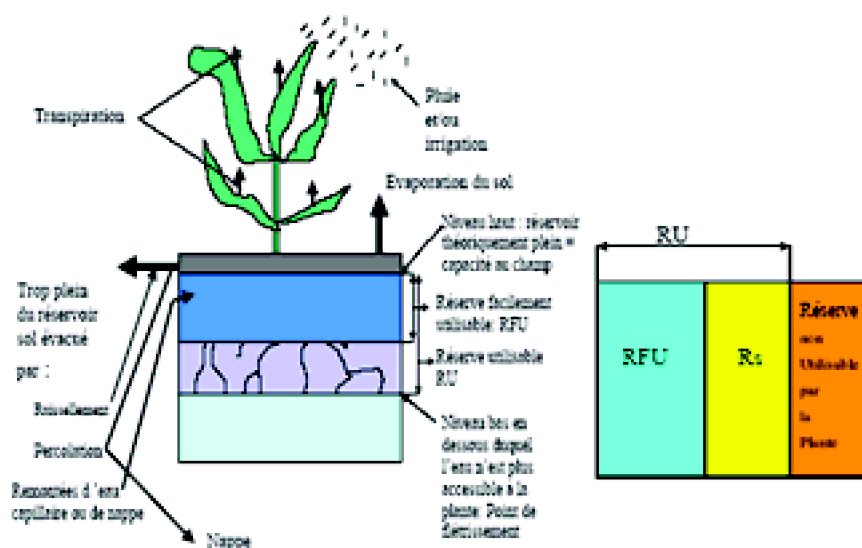
La connaissance de la variation de stock d'eau peut être accessible moyennant des mesures intensives par humidimètre à neutrons ou, le cas échéant, la gravimétrie.

Ainsi, l'équation du bilan peut être utilisée pour estimer les ETR au pas de temps journalier.

L'équation N° I.28 est à la base de la plupart de modèles de bilan hydrique de type Pilote élaboré par J.C. Mailhol (Cemagref, Montpellier) que nous avons utilisée pour simuler les réserves en eau du sol. En général, ces modèles reposent tous sur le concept de réservoir ( voir Figure N° I.11 ) dont la capacité  $R_{max}$  est égale au produit de la réserve utile du sol  $R_U$  ( mm/m ) par la profondeur explorée par les racines :

$$R_{max} = R_U \times P_x \dots\dots\dots(1.29)$$

Il faut rappeler que la réserve utile  $R_U$  est définie comme étant la différence entre la teneur en eau du sol à la capacité au champs ( $h_{cc}$ ) et celle au point de flétrissement permanent (  $h_{pf}$  ).



**Figure N° I.11 :** Représentation du bilan hydrique selon le concept de réservoir

**Source:** (J.C. Mailhol, 2003)

Le sol est alors géré comme un réservoir dans lequel la plante s'alimente. En cas de fortes pluies, le réservoir déborde et  $R(t) - R_{max} = D$  et à la fin du pas de temps on pose  $R(t) = R_{max}$ .

Remarque : Sur une parcelle en pente, la difficulté réside dans l'estimation de  $R_{uis}$ . On définit alors un concept agro - climatique, la RFU (réserve facilement utilisable) qui est en général égale à 2/3 de la  $R_U$  ( Dorembos et Kassam, 1979 ) . Ce concept permet de définir une réserve de survie  $R_s = R_U - RFU$ .

### III.2.- Pilotage des irrigations par la température du couvert

Cette méthode consiste à suivre quotidiennement l'écart entre la température du couvert végétal  $T_s$  et la température de l'air  $T_a$ . Les écarts positifs sont cumulés et on considère que ce cumul est représentatif du déficit hydrique de la plante lorsqu'il atteint une valeur seuil estimée entre 4.0 à et 5.0 °C, variable selon les cultures. Au-delà, le rendement est pénalisé et il faut déclencher l'irrigation. Cette méthode est contraignante puisqu'elle nécessite un suivi quotidien des températures aux environs du midi solaire, les mesures étant de plus perturbées en cas de vent ou de passage nuageux. Cependant elle offre des avantages en ce sens qu'elles fournissent une information sur l'état physiologique de la plante pouvant être répétée en n'importe quel endroit de la parcelle. Cette une méthode rapide et non destructive.

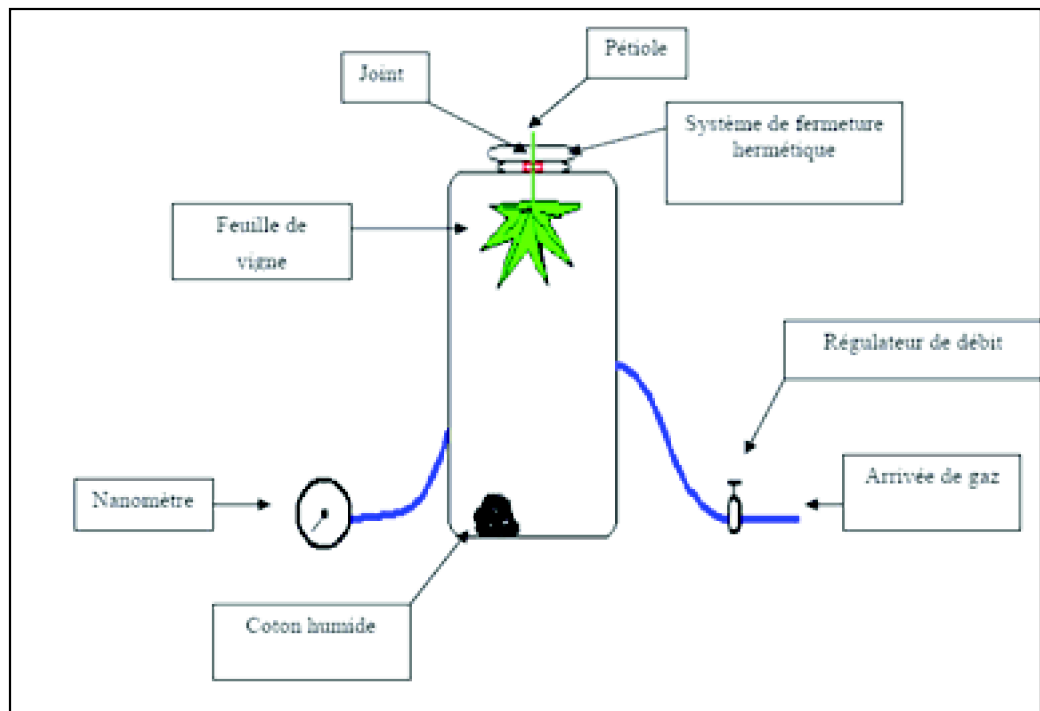
### **III.3.- Pilotage des irrigations par le potentiel foliaire**

---

Cette une technique moins utilisée que les deux autres méthodes car elle présente l'inconvénient d'être laborieuse et délicate (parfois incertaine).

Le principe consiste à mesurer la pression de l'eau dans les feuilles grâce à une chambre à pression appelée " chambre de Scholander " dont le principe de mesure est présenté en figure N° I.12.

La mesure du potentiel foliaire s'effectue le jour sur une feuille fraîchement cueillie. On insère la feuille dans la chambre à pression en ne laissant sortir qu'une partie du pétiole. La mesure est d'autant plus précise que la portion sortante du pétiole est faible ( J.M. Enixon, 2004 ) . Lorsque la pression à l'intérieur de la chambre (pression réalisée à l'aide de l'azote) compense la dépression interne à la feuille, ce qui représente son potentiel foliaire, on observe la sève brute remonter à travers les faisceaux du xylème sur la portion du pétiole hors chambre. La valeur obtenue reflète l'énergie avec laquelle l'eau est retenue dans le limbe.



*Figure N° I.12 : Schéma de la chambre à pression*



## Partie II : Matériels et méthodes

Dans cette deuxième partie de notre présente étude, nous présenterons les caractéristiques pédoclimatiques et le protocole expérimental, d'une part et les principes des méthodes de mesures d'autre part.

### I.- Présentation de la zone d'étude

#### I.1.- Localisation du site expérimental

---

Notre étude s'est déroulée à la station expérimentale de l'institut national agronomique d'El-harrach.

La superficie que nous avons utilisé est d'environ 0.6 ha. Les coordonnées géographiques de la station sont :

- Altitude 48m
- Latitude 30° 43' nord
- Longitude 3° 08' est

(Source : station météorologique de l'INA 2001)

## I.2.- Caractéristiques climatiques du site d'essai

La figure N°II.1, représente le diagramme ombrothermique de la région d'El-Harrach établi pour une période allant de 1952 à 2004 (54 années de données climatiques).

Le climat de cette localité est de type méditerranéen avec deux saisons bien contrastées :

L'une chaude et sèche s'étalant sur environ 6 mois (Mai à Octobre)

L'autre froide et humide allant du mois de Janvier jusqu'à début Mai, puis de fin Octobre à fin Décembre.

La température moyenne maximale est observée au mois d'août avec une valeur de 25°C et une température minimale au mois de Janvier avec une valeur 11°C.

La pluviométrie moyenne maximale pour cette période est de 104 mm enregistrée pendant le mois de Décembre.

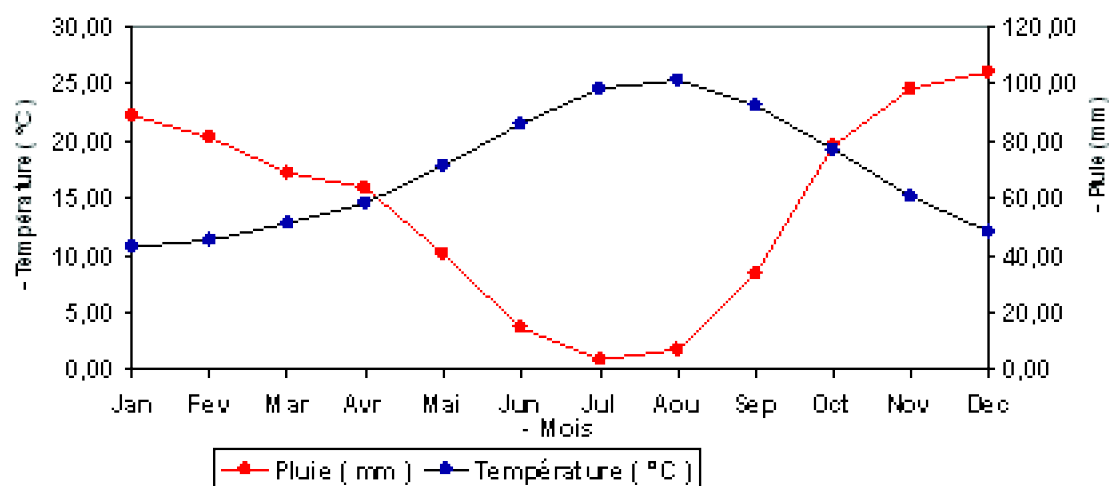
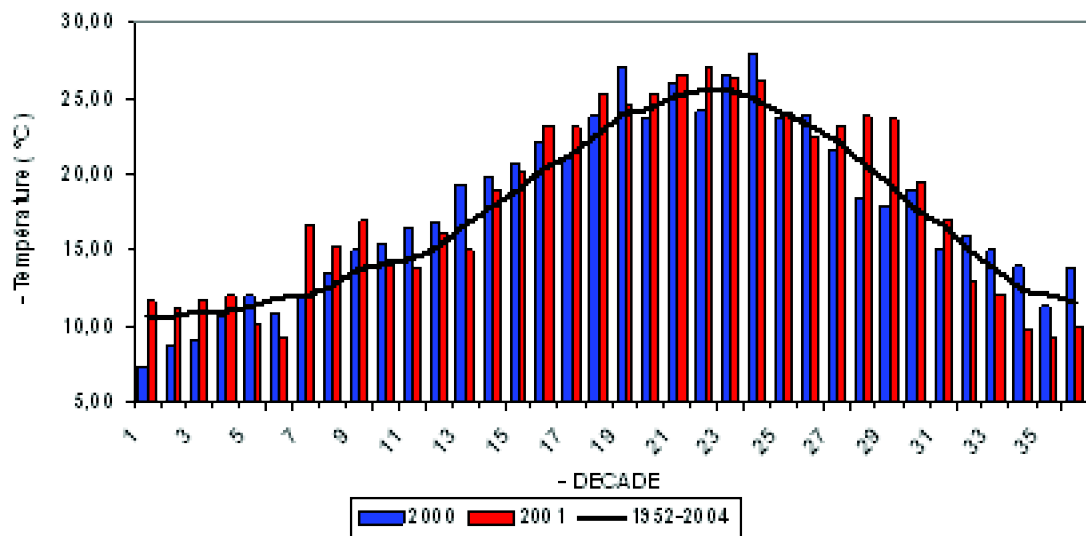


Figure N° II.1 : Diagramme ombrothermique

### I.2.1.- La température de l'air

La figure N°II.2 suivante montre les températures de l'air moyennes décadaires observées durant les années expérimentales 2000 et 2001 en comparaison avec celles déduites de la série climatique 1952-2004





**Figure N° II.2 : Température de l'air**

Les températures des deux années expérimentales semblent s'accorder dans l'ensemble avec celles de la série climatique avec cependant des écarts importants pour les mois les plus froids (Janvier, Mars et Avril). Notons aussi que les températures de l'année 2000 semblent relativement plus élevées que celles de 2001 avec des valeurs extrêmes de :

**Température minimale :**

Année 2000 : 7.3 °C dans la première décade de Janvier.

Année 2001 : 9.3 °C dans la deuxième décade de Décembre.

**Température maximale :**

Année 2000 : 27.9 °C dans la troisième décade d'Août.

Année 2001 : 27.1 °C dans la première décade d'Août.

### I.2.2.- Le rayonnement global

La figure N°II.3 suivante montre le rayonnement global moyen décadaire calculé par le modèle Pilote pour les années expérimentales 2000 et 2001 en comparaison avec ceux déduits de la série climatique 1952-2004 :

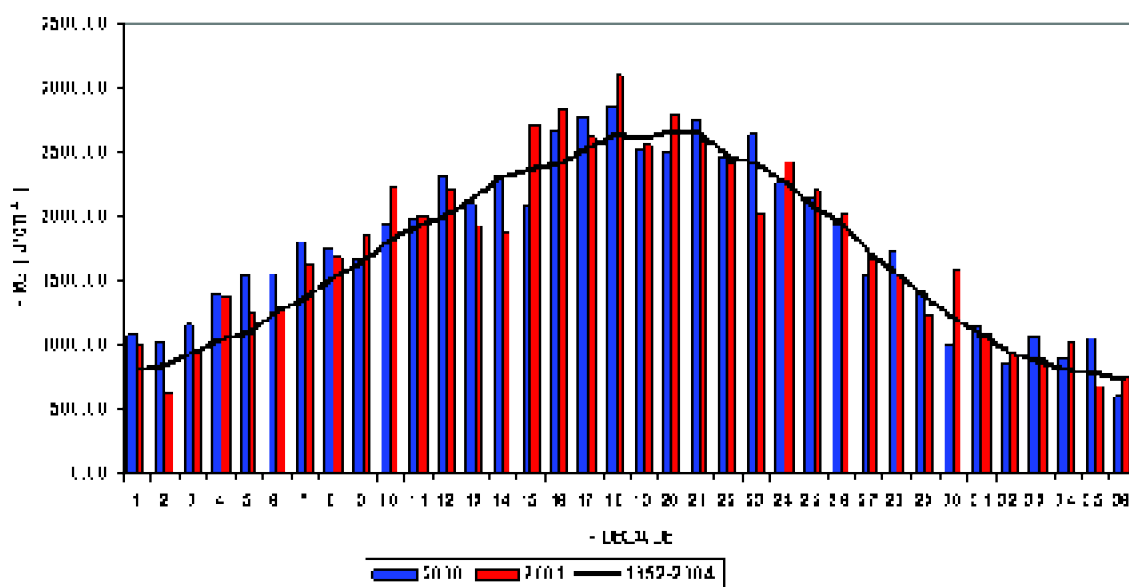


Figure N° II.3 : Rayonnement global

Le rayonnement global moyen décadaire des deux années expérimentales semblent s'accorder dans l'ensemble avec celui de la série climatique avec cependant des écarts importants sur pratiquement toute l'année et ce pour les deux essais. Notons aussi que le rayonnement de l'année 2000 semble relativement plus élevées que celui de 2001 avec des valeurs extrêmes de :

**Le rayonnement minimal :**

Année 2000 : 608.0 J/cm<sup>2</sup> dans la troisième décade de Décembre.

Année 2001 : 627.0 J/cm<sup>2</sup> dans la deuxième décade de Janvier.

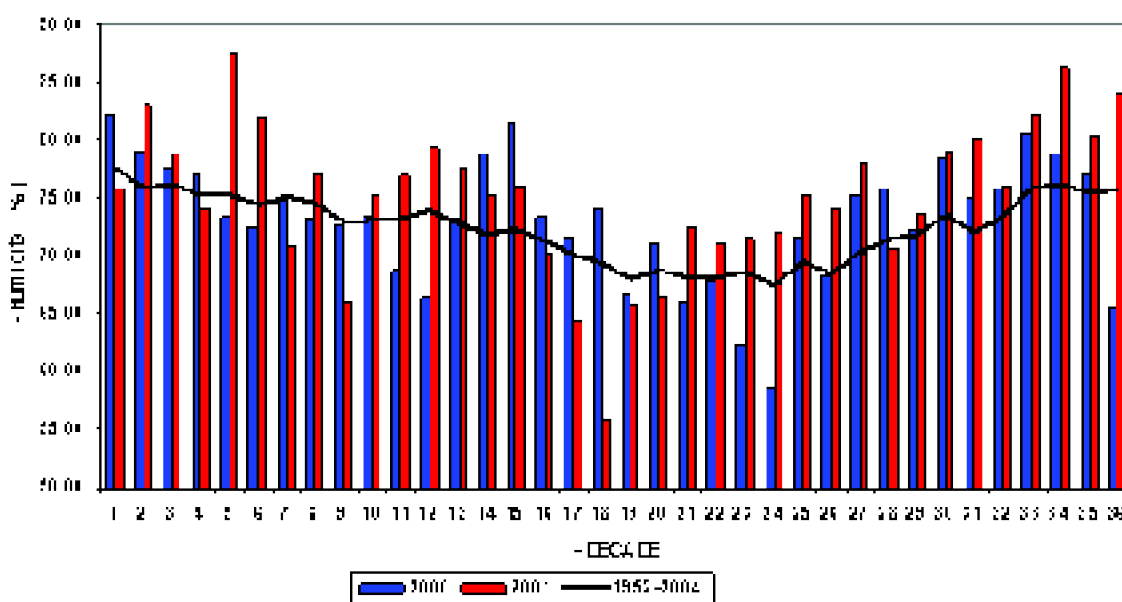
**Le rayonnement maximal :**

Année 2000 : 2844.0 J/cm<sup>2</sup> dans la troisième décade de Juin.

Année 2001 : 3101.0 J/cm<sup>2</sup> dans la troisième décade de Juin.

**I.2.3.- L'humidité de l'air**

La figure N°II.4 suivante montre les humidités de l'air moyennes décadaires observées durant les années expérimentales 2000 et 2001 en comparaison avec celles déduites de la série climatique 1952-2004 :



**Figure N° II.4 : Humidité relative de l'air**

Les humidités de l'air moyennes décadaires observées durant les années expérimentales 2000 et 2001 semblent évoluer dans le même sens que la courbe de la série climatique avec cependant des écarts d'une amplitude assez importante entre les deux années.

Les valeurs extrêmes de l'humidité de l'air sont :

- minimales :

Année 2000 : 59 % dans la troisième décennie d'août.

Année 2001 : 56 % dans la troisième décennie de juin.

- maximales :

Année 2000 : 82 % dans la première décennie de janvier.

Année 2001 : 87 % dans la deuxième décennie de février.

#### **I.2.4.- La durée d'insolation**

La figure N°II.5 suivante montre les durées d'insolation moyennes décadaires observées durant les années expérimentales 2000 et 2001 en comparaison avec celles déduites de la série climatique 1952-2004 :

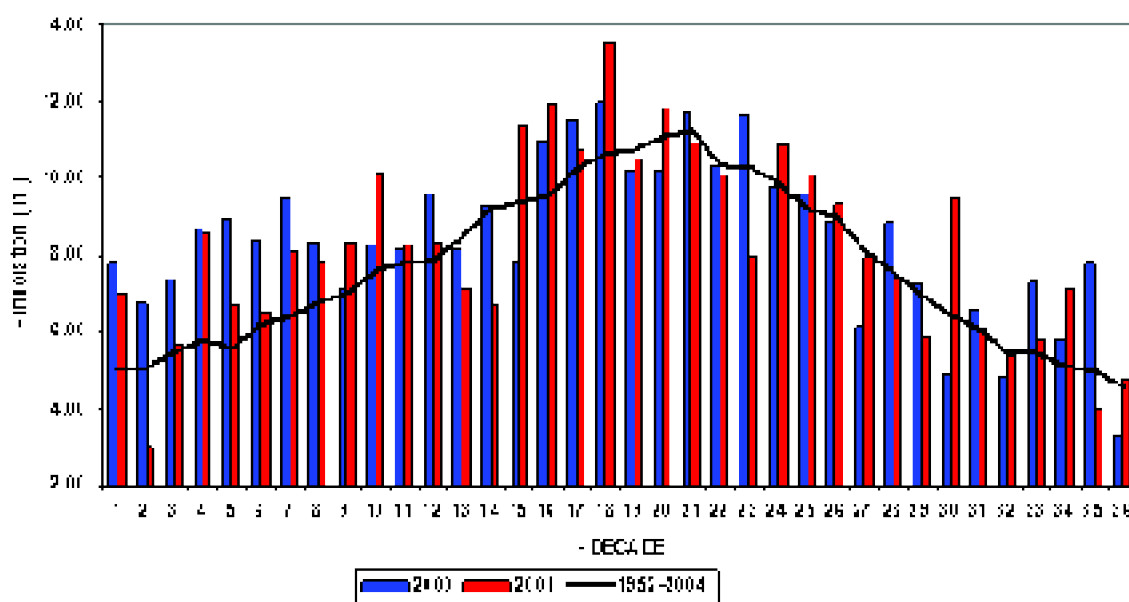


Figure N° II.5 : Durée d'insolation

On note ici une importante variabilité des valeurs des insolation entre les deux années 2000 et 2001 quoique leurs évolutions dans le temps soient pratiquement identiques. Les valeurs extrêmes des insolation moyennes décadaires sont :

- minimales :

Année 2000 : 3.0 h dans la troisième décennie de Décembre.

Année 2001 : 3.0 h dans la deuxième décennie de Janvier.

- maximales :

Année 2000 : 12.0 h dans la troisième décennie de Juin.

Année 2001 : 14.0 h dans la troisième décennie de Juin.

### I.2.5.- La vitesse du vent

La figure N°II.6 suivante montre les vitesses du vent moyennes décadaires observées durant les années expérimentales 2000 et 2001 en comparaison avec celles déduites de la série climatique 1952-2004 :

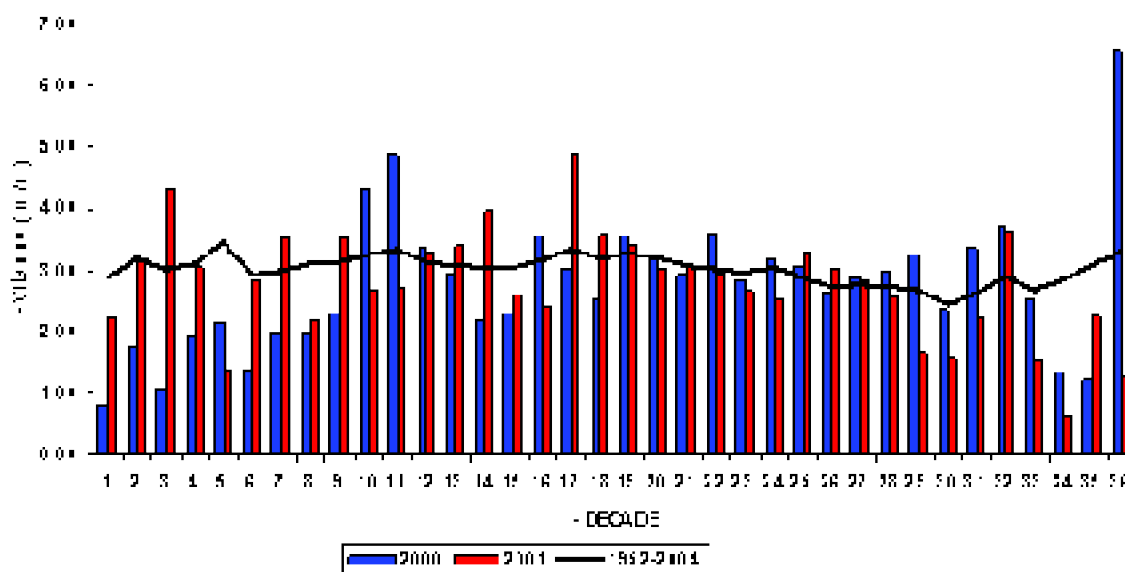


Figure N° II.6 : Vitesse du vent

Le graphique montre une grande variabilité de la vitesse du vent dans le temps avec des écarts importants entre les deux années expérimentales. La courbe moyenne 1952-2004 ne s'accorde pas totalement avec les deux autres courbes sauf peut être pour les décades 19 à 30 . Les valeurs extrêmes de la vitesse du vent sont :

Année 2000 : 1.0 m/s dans la première décade de Janvier.

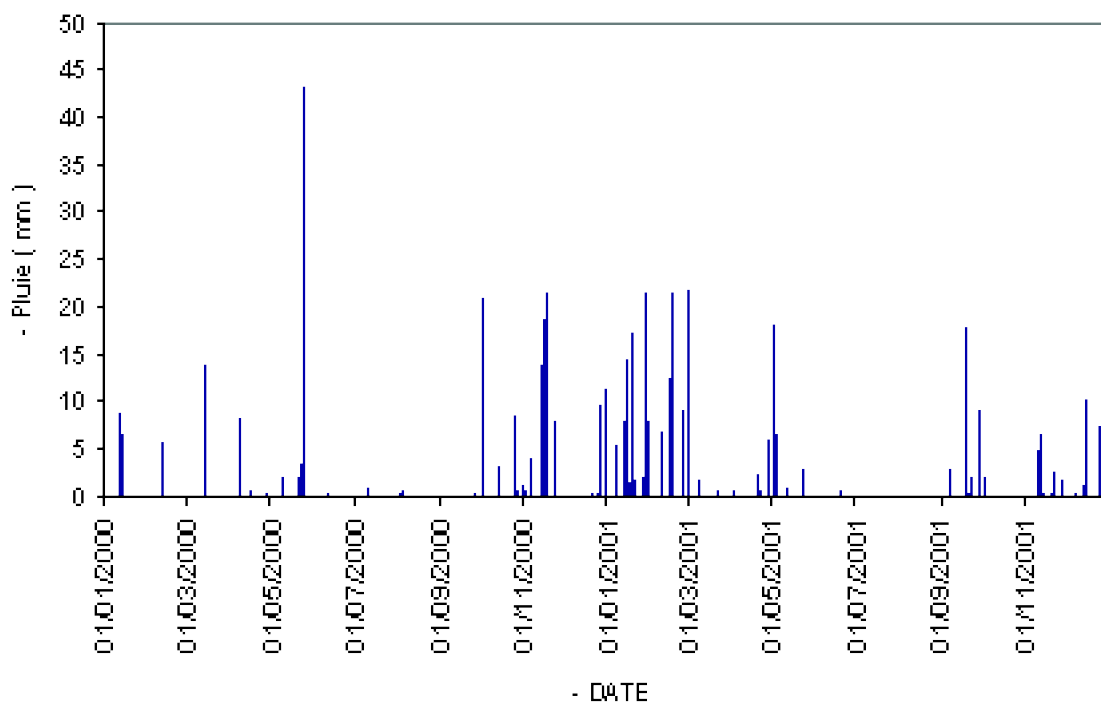
Année 2001 : 1.0 m/s dans la première décade de Décembre.

Année 2000 : 7.0 m/s dans la troisième décade de Décembre.

Année 2001 : 5.0 m/s dans la deuxième décade de Juin.

### I.2.6.- Les Précipitations

Le graphique N°II.7 suivant montre les précipitations journalières enregistrées pendant les deux années expérimentales 2000 et 2001 :



**Figure N° II.7 : Précipitations journalières 2000 et 2001**

Cette figure N°II.7 montre une grande variabilité des précipitations des deux années 2000 et 2001 avec une amplitude plus importante et une irrégularité dans le temps des précipitations de l'année 2000. L'année 2001 semble beaucoup plus arrosée que l'année 2000.

Dans un but d'analyse des années expérimentales par rapport à des tendances données par une longue série climatique (1952 – 2004), nous présentons dans les figures N°II.8 et N°II.9 suivantes les précipitations mensuelles ainsi que leurs valeurs cumulées observées pendant les années 2000 et 2001 relativement par rapport à celles obtenues à partir d'une étude fréquentielle à l'aide du logiciel Rainbow. Nous n'indiquons ici que les pluies correspondant aux périodes de retour de 2.5 et 10 ans :

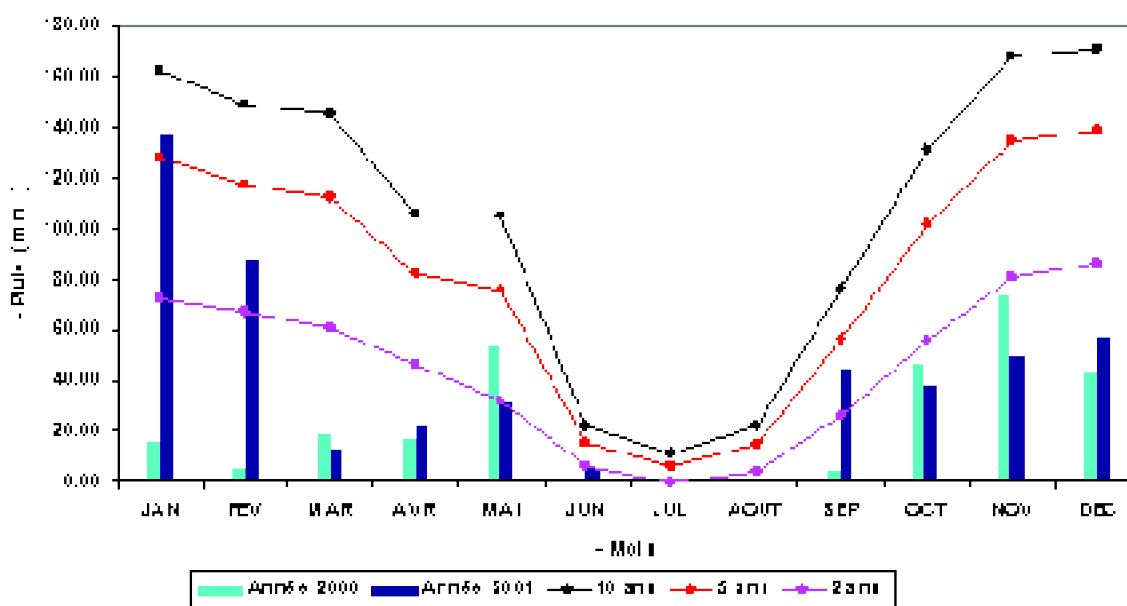


Figure N° II.8 : Analyse fréquentielle des précipitations

Le graphique semble montrer que les précipitations mensuelles des années 2000 et 2001 se rapprochent plus ou moins de celles correspondant à une période de retour de 2 ans.

On note aussi une grande variabilité des précipitations des deux années avec des amplitudes plus importantes pour l'année 2001.

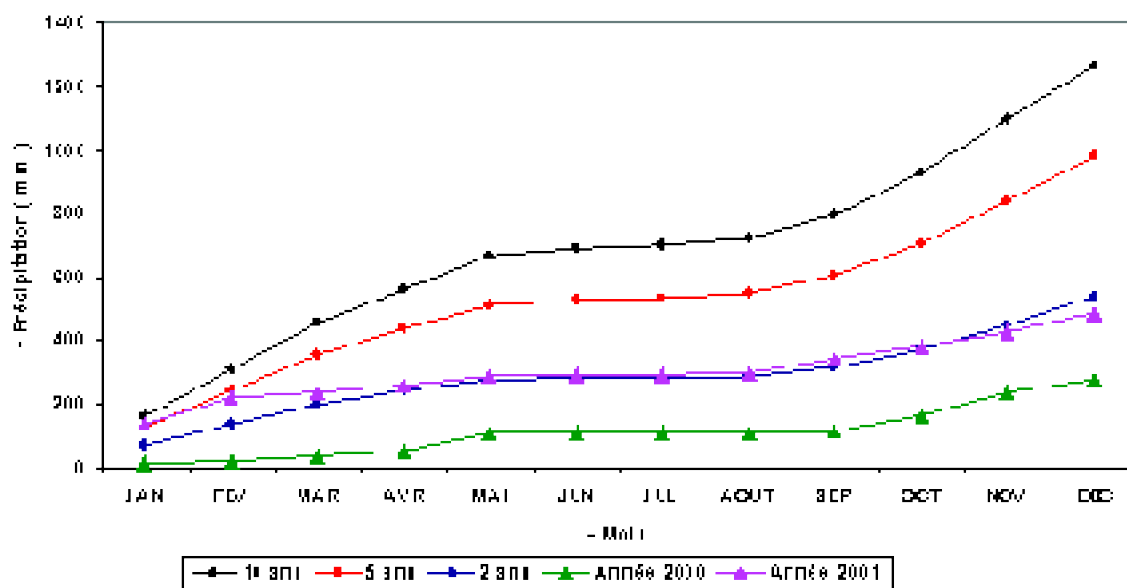


Figure N° II.9 : Précipitations cumulées

Le graphique de la figure N°II.9 des valeurs cumulées montre clairement que les précipitations de l'année 2001 se rapprochent de celles correspondant à une période de retour de 2 ans, ce qui confirme l'observation du graphique précédent.

Les valeurs cumulées des précipitations pour l'année 2000 sont nettement plus faibles que les autres courbes, ce qui permet de conclure qu'il s'agit d'une année sèche.

En effet les valeurs totales des précipitations obtenues dans ce graphique sont :

- Période de retour = 10 ans : 1268.5 mm.
- Période de retour = 5 ans : 982.6 mm.
- Période de retour = 2 ans : 539.0 mm.
- Année 2000 : 281.0 mm.
- Année 2001 : 489.0 mm.

### I.2.7.- La demande climatique «ETo»

Le graphique N°II.10 suivant présente les évolutions des valeurs journalières des ETo obtenues pour les deux années 2000 et 2001. Nous noterons que les calculs des ETo (Penman Monteith) ont été calculées à l'aide du logiciel Pilote (J.C. Mailhol, Cemagref – Montpellier).

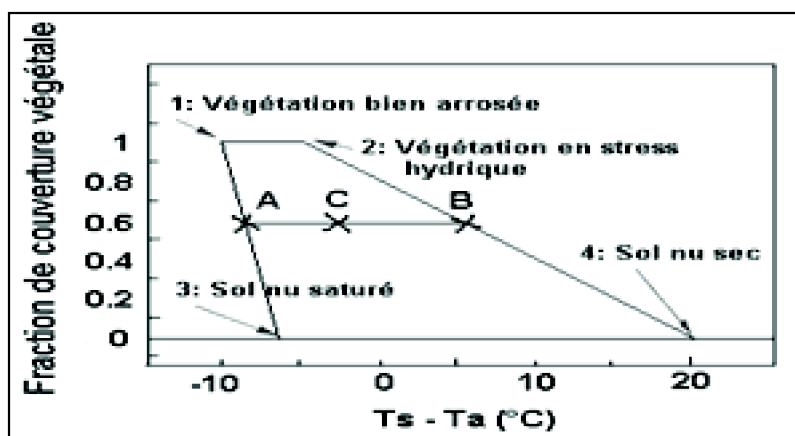
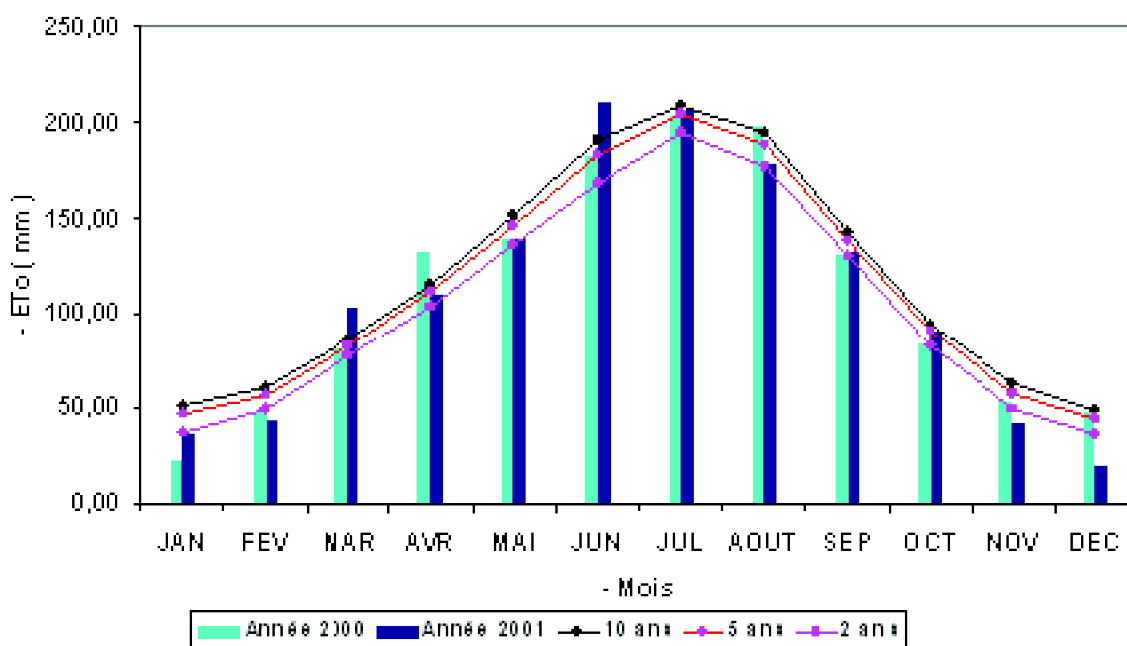


Figure N° II.10 : ETo journalières 2000 et 2001

Les ETo présentent de grandes amplitudes mais leurs évolutions dans le temps semblent identiques pour les deux années 2000 et 2001. Les valeurs maximales sont atteintes le 25/08/2000 (9.0 mm) et le 24/06/2001 (10.0 mm).

Nous présentons dans ce qui suit (Fig. N°II.11 et Fig. N°II.12) les mêmes graphiques d'analyse que ceux des précipitations :

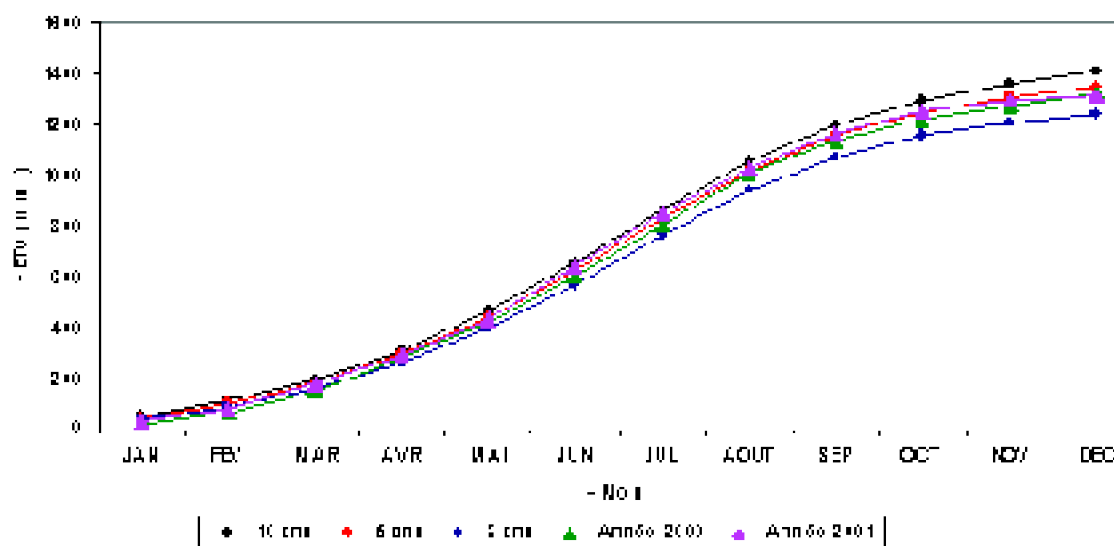




**Figure N° II.11 : Analyse fréquentielle des ETo**

Le graphique semble montrer que les valeurs journalières des ETo des années 2000 et 2001 se rapprochent plus ou moins de celles correspondant aux périodes de retour de 2.5 et 10 ans.

On note aussi qu'il n'existe pas une grande variabilité des valeurs journalières des ETo des deux années expérimentales. Les valeurs maximales des ETo sont obtenues aux mois de Juin, Juillet et Août.



**Figure N° II.12 : ETo cumulées**

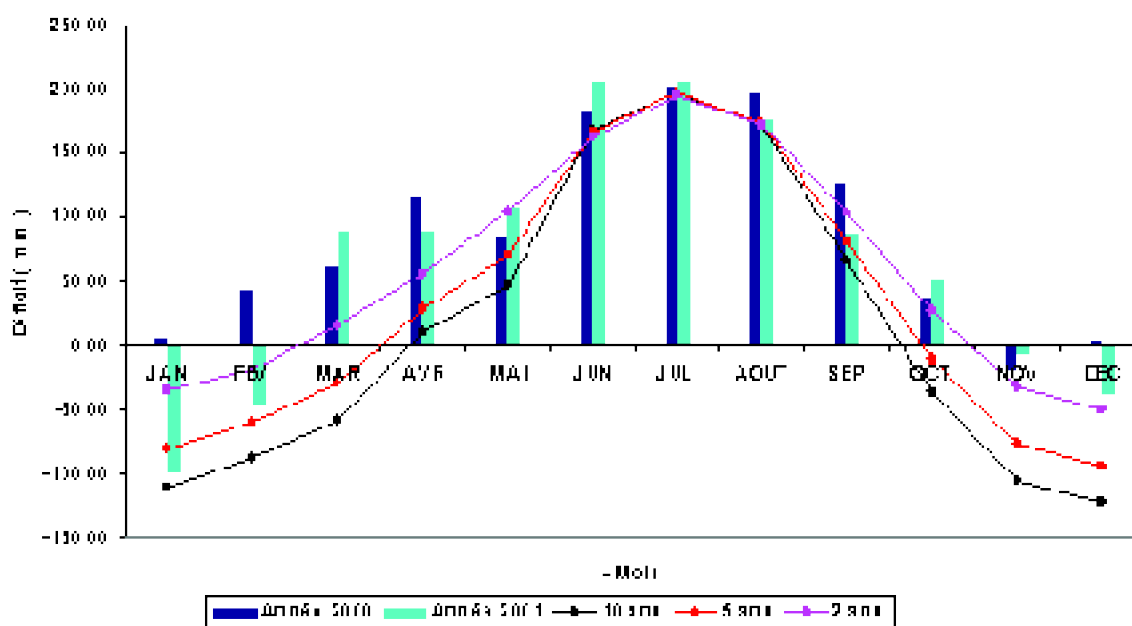
Toutes les courbes évoluent de la même façon avec des écarts pas trop importants avec cependant une similitude presque parfaite des valeurs des ETo pour les années 2000 et 2001 avec les ETo correspondant à la période de retour de 5 ans .Les valeurs des ETo totales obtenues sont :

**Cinétique de quelques paramètres physiologiques du blé dur *triticum durum* (variété vitron) sous contrainte hydrique dans la plaine de la Mitidja**

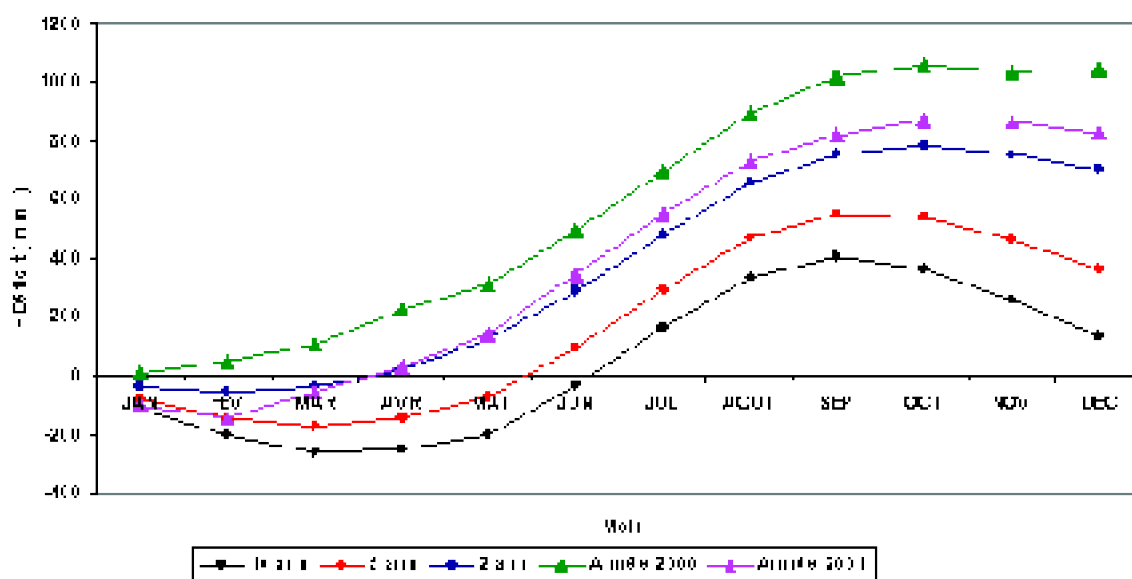
- Période de retour = 10 ans : 1408.6 mm
- Période de retour = 5 ans : 1349.7 mm
- Période de retour = 2 ans : 1241.6 mm
- Année 2000 : 1323.4 mm
- Année 2001 : 1315.8 mm

**I.2.8.- Le déficit pluviométrique «ETo-P»**

Nous présentons dans ce qui suit (Figure N°II.13 et N° II.14) les mêmes graphiques d'analyse que ceux des précipitations :



**Figure N° II.13 : Analyse fréquentielle des déficits pluviométriques ETo - P**



**Figure N° II.14 : Déficits pluviométriques ETo – P cumulés**

Le graphique N°II.13 montre que les mois non déficitaires sont Janvier, Février, Mars, Octobre, Novembre et Décembre.

Le graphique N°II.14 des valeurs cumulées montrent que les ETo des années 200 et 2001 sont nettement plus importants que ceux des périodes de retour 2.5 et 10 ans . Les ETo de l'année 2000 sont plus importants que ceux de l'année 2001.

Les valeurs totales obtenues sont résumées dans ce qui suit :

- Période de retour = 10 ans : 140.0 mm.
- Période de retour = 5 ans : 367.0mm.
- Période de retour = 2 ans : 703.0 mm.
- Année 2000 : 1042.5 mm.
- Année 2001 : 827.0 mm.

### **I.3.- Caractéristiques pédologiques du site expérimental**

---

#### **I.3.1.- Essai 2000**

Selon l'étude menée par le binôme (Abib et Haddad., 1994), la parcelle sur laquelle a été mené l'essai se caractérise par trois types de sols nommés arbitrairement (A, B, C).

**Sol A** : Il occupe près du tiers de la parcelle, constitué de 3 horizons, c'est un rouge fersiallitique, lessivé, hydromorphe, avec réserve calcique, dont les caractéristiques granulométriques sont présentées dans le tableau suivant :

**Sol B** : Il se situe à l'extrémité sud-est de la parcelle, constitué de 3 horizons, c'est un sol fersiallitique, lessivés caractérisé par sa profondeur de 185 cm avec réserve calcique, hydromorphe, présentant une charge caillouteuse et encroûtement calcaire. La granulométrie est donnée dans le tableau ci-après :

**Sol C** : Il se situe à l'extrémité Nord-est de la parcelle, constitué de 3 horizons, c'est un sol rouge fersiallitique, très peu lessivés, à caractère hydromorphe avec réserve calcique, très profond, et une absence totale de calcaire. La granulométrie est donnée dans le tableau ci-après :

**Tableau N°II.1 : Granulométrie des trois types de sols (essai 2000):**

**Cinétique de quelques paramètres physiologiques du blé dur *triticum durum* (variété vitron) sous contrainte hydrique dans la plaine de la Mitidja**

Types de sols	Profondeurs (cm)	% Argile	% Limon fin	% Limon grossier	% Sable fin	% Sable grossier	Densité apparente
A	00-15	33.7	13.9	7.6	15.0	24.6	1.8
	15-55	62.1	8.77	4.13	11.0	17.35	1.78
	>90	26.0	5.7	15.2	18.5	28.5	1.34
B	0-25	25.16	26.44	16.2	12.86	13.92	1.28
	25-60	15.0	33.0	15.77	14.75	15.85	1.44
	60-185	59.74	4.25	15.6	10.4	15.8	-
C	0-20	23.20	15.60	7.2	20.8	27.43	1.70
	20-55	10.70	22.40	14.91	19.23	27.50	1.59
	55-160	12.16	28.04	5.14	18.57	30.80	1.59

### I.3.2.- Essai 2001

Notre parcelle d'étude renferme trois types de sols différents (voir figure N°II.15).

Dans le tableau n°4, sont résumées les caractéristiques de chaque type de sol jusqu'à une profondeur moyenne de 0.75m.

**Tableau N°II.2 : Granulométrie des trois types de sols (Abib et Haddad, 1994)**

Types de sols	Profondeurs ( cm )	% Argile	% Limon fin	% Limon grossier	% Sable fin	% Sable grossier	Densité apparente
4	0-45	11.25	17.15	5.90	17.15	44.89	1.69
	45-75	21.95	18.80	7.00	15.83	29.12	1.79
	>75	38.85	22.15	4.30	12.61	19.60	1.63
5	00-20	23.00	17.90	19.77	16.40	21.87	1.39
	20-65	15.84	32.66	14.25	14.67	22.93	1.76
	>100	43.71	19.04	3.65	12.83	18.53	1.44
6	00-15	19.10	18.65	14.32	18.00	26.17	1.42
	15-55	18.77	25.35	9.95	16.28	23.81	1.72
	>55	34.58	18.62	14.67	11.34	16.09	1.60

Remarque : L'horizon de surface (45 cm) est un remblai artificiel, pour le sol 4 ; et on note la présence d'éléments grossiers (gravier 3%) dans le sol 5.

Nous pouvons dire, d'après le tableau N°II.2, que la parcelle est plus ou moins homogène, avec une pente d'environ 0.5 %, un drainage relativement bon, un pH légèrement alcalin et une texture limoneuse.

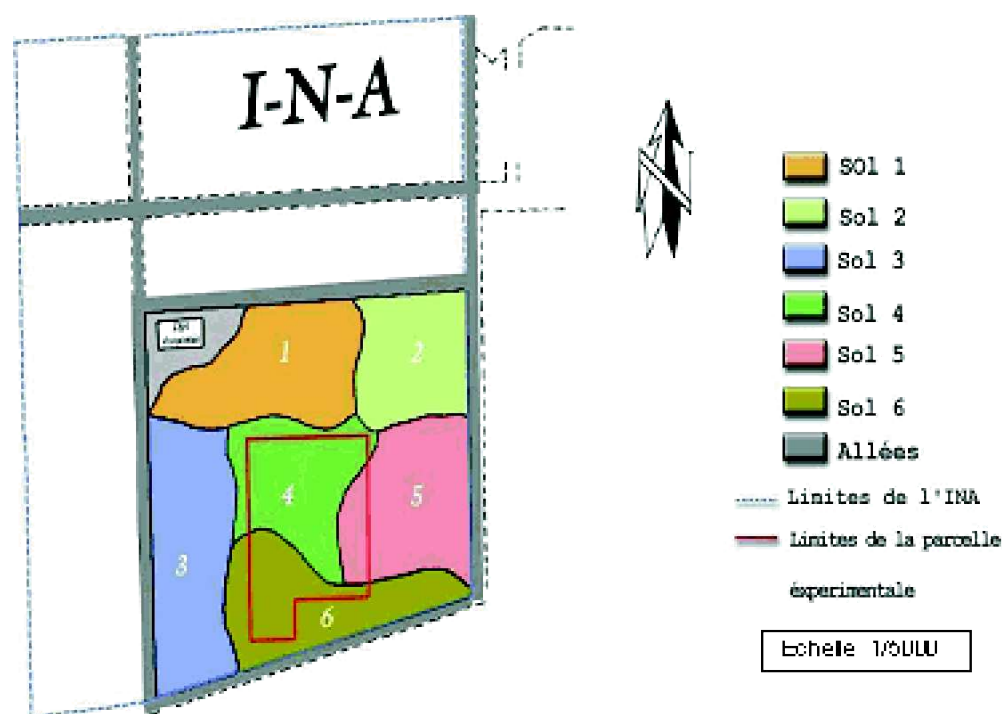


Figure N° II.15 : Carte des sols de l'INA

## II.- Le matériel végétal

La culture qui a fait l'objet de notre étude, est le blé dur (*Triticum durum*), variété Vitron appelée aussi HOGGAR. C'est une céréale d'hiver issue du CIMMYT (Mexique), elle a été introduite en Algérie à partir d'Espagne en 1986 et a été sélectionnée à la ferme expérimentale de l'ITGC de Tiaret.

### II.1.- Caractéristiques morphologiques

La variété Vitron est une céréale à paille demi-pleine, courte, soit 90 à 100 cm ; son épi est blanc, compact avec des barbes de couleur brune à noire, présentent sur tout l'épi. Son grain est roux et moyen.

### II.2.- Caractéristiques agronomiques

**Type :** La variété Vitron est un blé de printemps, destiné pour le semis d'hiver. Elle n'exige pas de vernalisation pour épier.

**Cycle végétatif :** Vitron est semi précoce, de même ou un légèrement plus tardive que la variété Waha. Semée en novembre, la variété Vitron épie la première décade d'avril dans les zones littorales et la fin avril dans les hautes plaines. Vitron est caractérisée par un tallage moyen et une fertilité légèrement plus élevée que Waha ; elle

compte en moyenne 50 à 60 grains/épi.

**Tolérance** : Vitron est peu sensible à l'helminthosporiose et modérément tolérante aux rouilles. Elle présente une bonne tolérance à la verse.

**Productivité** : La variété Vitron est productive, soit 50 à 60 q/ha en culture sèche, de plus, elle est caractérisée par un PMG (poids de mille grains) élevé.

## II.3.- Aspects techniques

---

**Zone de culture** : La variété Vitron s'adapte dans toutes les zones céréalières où la pluviométrie annuelle moyenne est supérieure à 400 mm.

**Période de semis** : Elle varie de la mi-novembre à la fin décembre, selon les régions. Dans les zones à hautes altitudes (plus de 700 mm), le semis se fait tôt (novembre) et il se fait plus tard (décembre) dans les zones littorales.

**Densité de semis** : Elle varie de 120 à 150 Kg/ha, tout en tenant compte de l'état du lit de semence, de la date et le mode de semis. Le peuplement recherché à la levée est de 150 à 200 plants/m<sup>2</sup>, ce qui correspond à un peuplement épis de 350 à 400 épis/m<sup>2</sup>.

**Mode et profondeur de semis** : Le semis en lignes est recommandé. La profondeur de semis ne doit pas dépasser 4 cm en zones favorables et peut atteindre 6 cm en zones sèches.

**Fertilisation** : Il est recommandé d'apporter 90 unités/ha de phosphore en culture sèche et 50 à 70 unités/ha d'azote fractionnées en 2 ou 3 apports (Semis, tallage et montaison).

**Désherbage** : Vitron est sensible à la compétition des adventices. Il est conseillé de cultiver cette variété sur une parcelle propre à précédent jachère travaillée ou culture sarclée. Une lutte chimique précoce est recommandée avant le fin tallage.

(Anonyme, 1998)

## III.- Les protocoles expérimentaux

### III.1.- Objectifs des essais

---

Les essais que nous avons réalisés s'inscrivent dans le cadre d'un projet de recherche sur la stratégie de gestion des irrigations de complément des céréales, entre l'INA d'Alger et l'INA Paris Grignon. Les objectifs principaux des essais réalisés étaient de rechercher une stratégie des irrigations de complément du blé dur dans la Mitidja à travers les analyses des bilans hydriques et de la pertinence de quelques paramètres physiologiques liés au stress hydrique.

## III.2.- Protocoles expérimentaux

### III.2.1.- Facteur d'étude

Notons que les essais ont fait l'objet de dispositifs comprenant un facteur " différencié " en l'occurrence le " traitement hydrique " représentant différentes stratégies d'irrigation. L'objectif étant d'en analyser les conséquences sur différents paramètres (réserve en eau du sol, rendements, etc....).

L'idée principale était de considérer deux traitements " témoins " (l'un soumis à des irrigations intensives, l'autre soumis aux seuls apports pluviométriques) et deux autres traitements intermédiaires avec des irrigations " ponctuelles " à des périodes bien précises de la croissance de la culture.

Les dispositifs choisis (pour leur simplicité) sont de type " Blocs Aléatoires Complets " avec un ensemble de trois et quatre blocs respectivement pour les années 2000 et 2001. Ce qui a conduit à un nombre parcelles élémentaires de 12 et 16 respectivement pour les années 2000 et 2001 (voir schémas des dispositifs).

Nous signalons en outre que des contraintes matérielles (systèmes d'irrigation ...) ont quelques peu perturbé le bon déroulement des protocoles expérimentaux.

Le traitement « ETM » : Il s'agit là du traitement non soumis à des restrictions hydriques pendant toute la période de la croissance de la plante avec des irrigations définies comme suit : 1.

Le traitement pluvial « PLU » : Ce traitement n'a pas été irrigué et a été soumis uniquement aux conditions naturelles (précipitations). Il a servi comme témoin non irrigué. 2.

Le traitement modéré « MOD » : Traitement ayant reçu deux doses d'irrigation de 40 mm aux stades montaison et floraison. 3.

Le traitement modéré « SEV » : Traitement ayant reçu une seule dose d'irrigation de 40 mm au stade gonflement. 4.

Remarque : Les doses réellement apportées diffèrent des doses prévues en raison de certaines contraintes matérielles liées au système d'irrigation. Ainsi, le tableau N°II.3 suivant résume les dates d'irrigation pour l'essai 2000 :

**Tableau N°II.3 : Dates et doses d'irrigations (mm) – Essai 2000**

**Cinétique de quelques paramètres physiologiques du blé dur triticum durum (variété vitron) sous contrainte hydrique dans la plaine de la Mitidja**

DATE	J.A.S	ETM	PLU	SEV	MOD
20/02/00	54	27	27	27	27
07/03/00	70	11			47
22/03/00	85	15			
28/03/00	91			40	
29/03/00	92	17			
08/04/00	102	26			
15/04/00	109	16			
22/04/00	116	36			40
30/04/00	124	35			
06/05/00	130	29			
13/05/00	137	25			
	TOTAL	237	27	67	114

La figure N°II.16 suivante montre le dispositif expérimental de l'essai 2000 :

<b>ETM1</b>		<b>SEV2</b>		<b>MOD3</b>
<b>SEV1</b>		<b>ETM2</b>		<b>PLU3</b>
<b>MOD1</b>		<b>MOD3</b>		<b>ETM3</b>
<b>PLU1</b>		<b>PLU2</b>		<b>SEV3</b>
<b>BLOC1</b>		<b>BLOC2</b>		<b>BLOC3</b>

**Figure N° II.16 : Dispositif Expérimental 2000**

Le traitement « ETM » : Il s'agit pratiquement du même traitement que celui de l'an 1. 2000 sauf que les irrigations ont été définies autrement :

$$ETM = K_c ETo \dots\dots\dots(II.1)$$

ETM = Evapotranspiration maximale représentant la dose d'irrigation.

$K_c$  = Coefficient cultural de la culture du blé dur.

$ETo$  = Evapotranspiration de référence calculée selon Penman – Monteith.

**Remarque** : Ne pouvant pas gérer cette formule en " temps réel " (indisponibilité de la vitesse du vent à la station météorologique de l'INA), nous avons eu recours aux valeurs décadaires des ETo obtenues par une analyse fréquentielle réalisé par le logiciel RAINBOW ( Windows version 1.1, mars 2000) sur une série climatique ONM Dar El Beida s'étalant sur 29 années d'observations . Pour le calcul des doses d'irrigations, nous avons choisi les valeurs des ETo décadaires correspondant à une fréquence de 80 %.

Le traitement pluvial « PLU » : Ce traitement n'a pas été irrigué et a été soumis 1. uniquement aux conditions naturelles (précipitations)

Le traitement « stress modéré » (MOD) : C'est un traitement qui n'a reçu qu'une seule2.



dose d'irrigation au stade épiaison. Cette dose a été estimée de la même manière que celle à l'ETM en se basant sur les valeurs cumulées des ETo jusqu'à la date de l'apport.

Le traitement « stress sévère » (SEV) : Comme le montre la figure N°II.17 ci-dessous, ce traitement a été couvert avec une bâche en plastique (film plastique stabilisé) de l'épiaison jusqu'à la floraison afin que la dose d'irrigation qui a été apportée à ce stade soit l'unique apport d'eau pour ce traitement.



**Figure N° II.17 : Traitements « SEV » couverts avec un film plastique stabilisé**

Les dates et doses d'irrigation de cet essai sont résumées dans le tableau N°II.4 suivant :

**Tableau N°II.4 : Dates et doses d'irrigations – Essai 2001**

DATE	J.A.S	ETM	MOD	SEV
10/03/01	81	23		
20/03/01	91	17		
30/03/01	101	25	55	
10/04/01	112	30		85
21/04/01	123	20		
	TOTAL	115	55	85

La figure N°II.18 suivante montre le dispositif expérimental de l'essai 2001 :

	ETM b1	MOD b1	PLU b1	SEV b1		ETM b2	PLU b2	MOD b2	SEV b2
	MOD b3	ETM b3	SEV b3	PLU b3		PLU b4	SEV b4	ETM b4	MOD b4

**Figure N° II.18 : Dispositif Expérimental 2001**

### III.2.2.- Système d'irrigation

Le système d'irrigation qui a été utilisé dans notre expérimentation est l'aspersion, qui consiste en un apport d'eau artificiel sous forme de pluie (figure N°II.19).



**Figure N° II.19 : Le système d'irrigation par aspersion**

Le système d'irrigation par aspersion que nous avons utilisé pour notre essai comprenait :

- Une station de pompage ;
- Une vanne principale d'alimentation ;
- Une pompe centrifuge monocellulaire type FB 8 T ;
- Un moteur électrique 9.19 CV (2900 trs / mn) ;
- Un manomètre (10 bars) ;
- Une vanne de distribution ;
- Un bassin de réserve (dépannage) (6 m<sup>3</sup>) ;
- Une conduite principale (diamètre : 80 mm) ;
- Des conduites secondaires (diamètre : 60 mm) ;
- Des rampes porte - asperseurs (diamètre : 60 mm) ;
- Des asperseurs (ANABIB).

La pression de service pendant les irrigations était de 4 bars, pour une pluviométrie horaire d'environ 8 mm.

La figure N°II.20 suivante illustre le dispositif d'irrigation de l'essai 2001 :

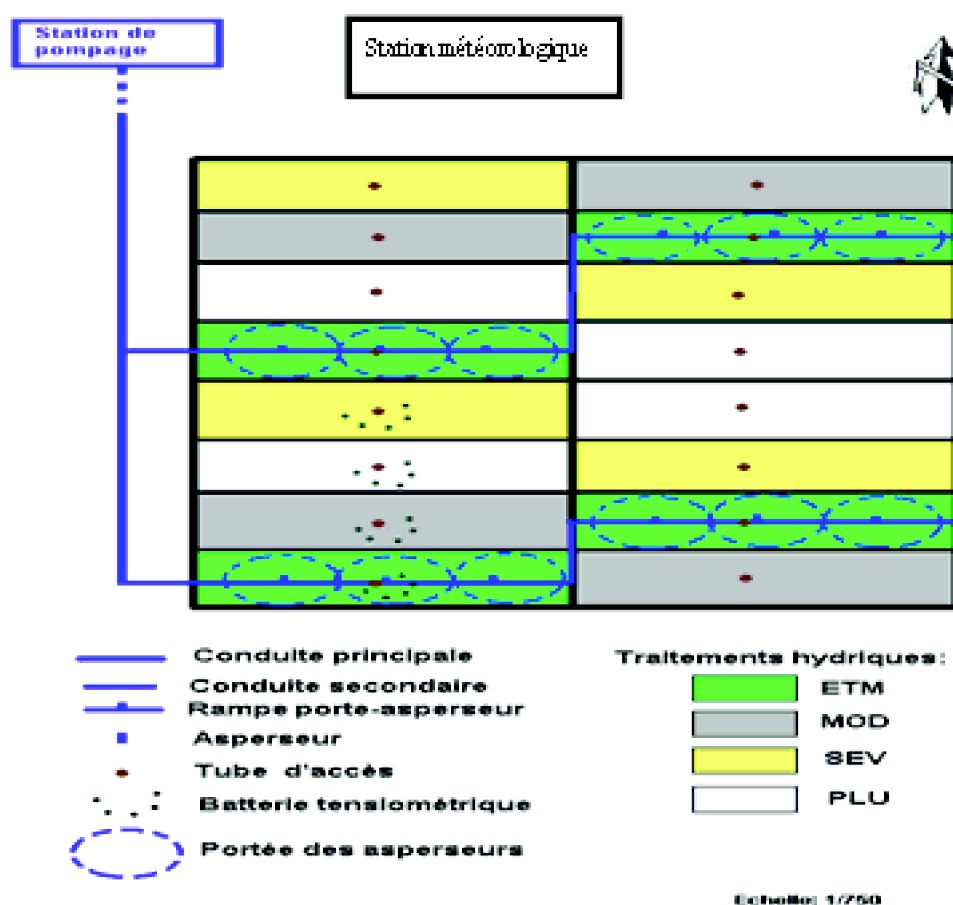


Figure N° II.20 : Dispositif d'irrigation (Essai 2001)

### III.2.3.- La qualité de l'eau d'irrigation

L'eau d'irrigation que nous avons utilisé, provient du forage d'eau potable de l' Institut National Agronomique (El-Harrach). Elle était stockée dans la piscine pendant plusieurs jours, voire plusieurs semaines, avant son utilisation.

L'analyse physico-chimique de cette eau donne les résultats suivants :

Cette eau, selon la classification internationale, est bonne pour l'irrigation de la plupart des cultures sur la plupart des sols.

### III.2.4.- Le travail du sol

#### a.- Essai 2000 :

Le travail du sol a consisté en un pseudo labour avec le Chisel et les travaux superficiels avec le cultivateur à dents.

#### b.- Essai 2001 :

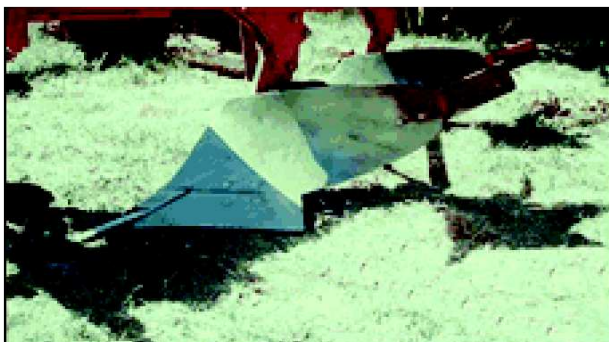
En plus des traitements hydriques, nous avons inclus un deuxième facteur d'étude représenté par deux types de travail du sol :

**Chaîne de travail n°1 (COV) :** C'est la succession des outils de travail du sol

suivants : Charrue à socs, Cover - Crop et Rouleau.

**Chaîne de travail n°2 (CLT) :** C'est la succession des outils de travail du sol suivants : Charrue à socs, Cultivateur à dents et Rouleau.

La Figure N°II.21 montre les différents outils de travail du sol utilisés lors de notre essai.



**Figure N° II.21 :** les différents outils de travail du sol (labour et pseudo - labour)

Charrue à socs.



Cover-crop



Cultivateur à dents (Canadien).

## **IV.- Paramètres mesures**

## IV.1.- L'état hydrique du sol

Nous avons mesuré dans les deux protocoles les paramètres liés au sol suivants :

La teneur en eau à l'aide de la gravimétrie ou la sonde à neutrons

Les tensions de l'eau dans le sol à l'aide des tensiomètres Watermak

Ces mesures ont fait l'objet d'autres travaux en collaboration. En ce qui nous concerne, nous nous limiterons seulement aux réserves en eau du sol simulées par le Logiciel Pilote (J.C. Mailhol, Cemagref ) que nous essayerons de comparer avec les autres indicateurs de stress tels que les températures du couvert.

Il s'agit d'un modèle utilisant le concept de LAI afin de simuler la réserve en eau du sol, le bilan hydrique ainsi que les rendements. Il permet le pilotage en temps réel des irrigations

C'est un modèle à réservoir, comme le montre la figure N°II.22 suivante, dont le fonctionnement est décrit ci-dessous :

Le modèle PILOTE régit les transferts d'eau au pas de temps journalier (j) au moyen de trois réservoirs. Le paramètre fondamental de ce modèle est la réserve utile exprimée en mm/m définie comme la différence entre le stock en eau du sol à la capacité au champ ( état du sol après arrêt du drainage ) et le stock en eau au point de flétrissement permanent .

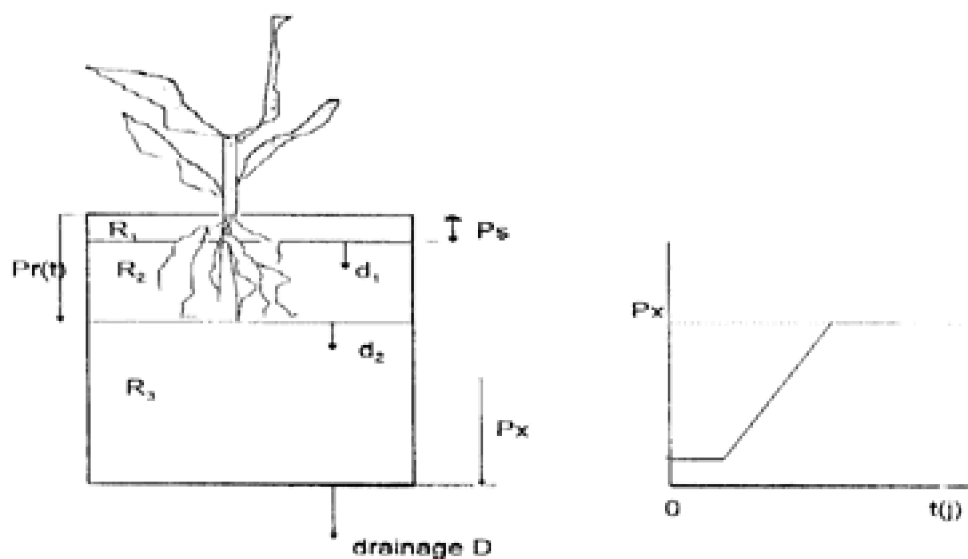


Figure N° II.22 : Fonctionnement du modèle Pilote (J.C. Mailhol, 2001)

## IV.2.- Les Paramètres physiologiques

### IV.2.1.- Les stades phénologiques et densité de peuplement

Nous avons suivi tout au long du cycle de la culture, l'évolution de la croissance végétale.

Les dates des différents stades phénologiques, ont été notées, ainsi que l'évolution de la profondeur racinaire pour les traitements « ETM » et « PLU ».

La densité de peuplement a été calculée par la méthode de l'échantillonnage linéaire qui consiste en le dénombrement des plants sur une longueur de 1 m, pour deux lignes parallèles et ce à trois endroits différents de la parcelle élémentaire :

$$DP = \frac{\sum N_p}{6 \times \Delta L} \dots\dots\dots(II.2)$$

DP : Densité de peuplement (plants / m<sup>2</sup>)

N<sub>p</sub> : Nombre de plants par ligne

ΔL = Ecartement entre lignes

Le tableau N°II.5 suivant résume, pour les deux essais, le calendrier des stades phénologiques :

**Tableau N°II.5 : Calendrier des stades phénologiques (Essais 2000 et 2001)**

Stades	Dates J.A.S.	
	Essai 2000	Essai 2001
Semis	28/12/1999	19/12/2000
1 feuille	12	18
2 feuilles	22	25
3 feuilles	28	32
Début tallage	34	42
Plein tallage	50	55
Montaison	68	74
Gonflement	91 PLU – SEV	91
	95 MOD – ETM	
	99 PLU – SEV	101
Epiaison	105 MOD – ETM	
	108 PLU – SEV	
	112 MOD	109
Floraison	123 ETM	
	114 PLU – SEV	
	116 MOD	123
Grain Laiteux	127 ETM	
	128 PLU – SEV	
	129 MOD	131
Grain Pâteux	142 ETM	
	139 PLU – SEV	
	151 MOD	153
Maturation	163 ETM	
	140 PLU – SEV	
	152 MOD	162
Récolte	164 ETM	



*Figure N° II.23 : Stade végétatif « 3 feuilles » (commencement des mesures).*

#### **IV.2.2.- La température du couvert végétal**

La température foliaire au niveau de chaque parcelle élémentaire a été mesurée par le thermomètre infrarouge type IRTec P800 à midi solaire en absence de vent et de nuage.



Figure N° II.24: Thermomètre infrarouge

#### IV.2.3.- La teneur relative en eau

La mesure de RWC a été réalisée pour chaque stade ainsi qu'avant et après chaque apports (pluie ou irrigation). Les échantillons (dernière feuille) sont immédiatement pesés à l'aide d'une balance de précision pour obtenir la masse de la matière fraîche (MF) puis placés dans des boîtes de pétri contenant de l'eau distillée pendant 24 heures. On mesure ensuite la masse réhydratée (MR) ainsi que la matière sèche (MS) après passage à l'étuve des échantillons à 80°C pendant 48 heures.

La teneur en eau relative ( RWC ) est alors calculée par la formule suivante :

$$RWC = \frac{MF - MS}{MR - MS} \dots\dots\dots(II.3)$$

La figure N°II.25 suivante résume le procédé de mesure de RWC :

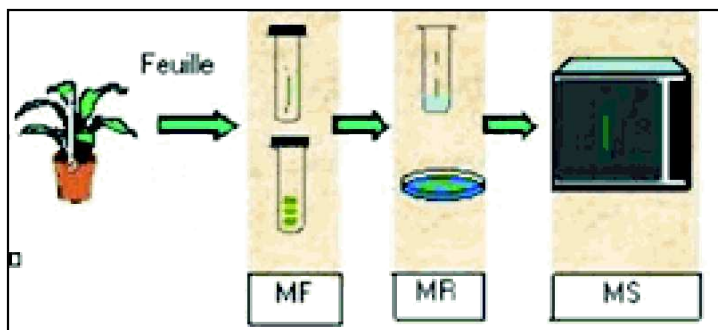


Figure N° II.25 : Méthode de mesure de la teneur relative en eau ( RWC )

#### IV.2.4.- Le Leaf Area Index (LAI)

Le suivi de l'indice de surface foliaire commence lorsque la culture couvre complètement le sol au moment où le LAI avoisine la valeur 2.

Pour les deux essais 2000 et 2001 Les mesures des LAI ont été effectuées pour chaque traitement au rythme d'une fois par semaine.

La méthode utilisée consiste à prélever un échantillon, le peser au laboratoire puis déterminer en premier temps les différents types de feuilles:

- Les feuilles produites : apparition de la petite feuille verte.



- Les feuilles vertes : feuilles en pleine activité (photosynthèse ...)
- Les feuilles sénescentes : plus de la moitié de la feuille est verte
- Les feuilles mortes : plus de la moitié de la feuille est jaune

Ensuite, on réalisé les mesures des dimensions ( longueur , largeur ) de chaque feuille.

La surface foliaire verte sera déterminée comme suit :

Pour les feuilles vertes et produites :  $SF = \text{longueur} \times \text{largeur} \times a$

Pour les feuilles sénescentes :  $SF = \text{longueur} \times \text{largeur} \times a/2$

**Remarque : a** : coefficient de correction (compris entre 0.65 et 0.85), déterminé par une mesure des surfaces foliaires de la culture avec un planimètre, papier millimètre ou par pesée.

Dans nos calculs, nous avons adopté une valeur de  $a = 0.76$ .

### IV.3.- Composantes de rendement

---

A la récolte, nous avons calculé le rendement en grain pour chaque parcelle élémentaire.

La méthode de calcul du rendement consiste en un calcul du nombre moyen de talles par plant, sur un échantillon de 20 plants, puis le nombre moyen de grains par épi et enfin le poids de mille grains ; connaissant la densité du peuplement, on tire la valeur du rendement (q/ha) pour chaque parcelle élémentaire.

Les autres composantes du rendement ont été, elles aussi, mesurées sur un échantillon de 20 plants pour chaque parcelle élémentaire.

**Cinétique de quelques paramètres physiologiques du blé dur *triticum durum* (variété vitron) sous contrainte hydrique dans la plaine de la Mitidja**

Caractéristiques Traitement	Type	Dose	Date	Appareil
Fertilisation	Engrais de fond Super phosphate	300 Kg/ha	Avant semis	Epardeur d'engrais
	Fertilisation azotée (sulfates d'ammonium)	300 Kg/ha (60 unités)	11/02/00	Epardeur d'engrais
	Fertilisation foliaire -AGRIPIIOS -CFN	2.5 l/ha 2.5 l/ha	21/03/00	Pulvérisateur porté (HARDI 1000 l)
Désherbage chimique	Herbicide sélectif (APYROS)	26.5 g/ha	12/02/00	Pulvérisateur porté (HARDI 1000 l)
Désinsectisation	Insecticide total (BEST SELLER)	15 ml/100l	09/04/00	Pulvérisateur porté (200 l)

**Tableau N°II.6 : Dates et doses des traitements phytosanitaires (Essai 2000)**

Caractéristiques Traitement	Type	Dose	Date	Appareil
Fertilisation	Engrais de fond Super46(phosphate)	150 Kg/ha	12/11/00	Epandeur d'engrais
	Fertilisation azotée (sulfates d'ammonium)	300 Kg/ha (60 unités)	05/02/01	Epandeur d'engrais
	Fertilisation foliaire -AGRIPHOS -CFN	2.5 l/ha 2.5 l/ha	11/03/01	Pulvérisateur porté (HARDI 1000 l)
Désherbage chimique	Herbicide sélectif (APYROS)	26.5 g/ha	06/02/01	Pulvérisateur porté (HARDI 1000 l)
Désinsectisation	Insecticide total (BEST SELLER)	15 ml/100l	02/04/01	Pulvérisateur porté (200 l)

**Tableau N°II.7 : Dates et doses des traitements phytosanitaires (Essai 2001)**

Comme dans tout travail expérimental, il est très difficile de cerner l'ensemble des facteurs environnementaux qui pourraient perturber le bon déroulement de celui-ci.

Un désherbage chimique a été appliqué contre les adventices (Monocotylédones et dicotylédones) au stade tallage, et un insecticide total, au stade floraison, contre les pucerons.

#### IV.4.- Mesures climatiques

Les mesures climatiques concernant la pluviométrie, la température de l'air, l'humidité relative de l'air ont été effectuées quotidiennement lors de notre essai au niveau de la station météorologique de l'INA. Mais en raison d'une incohérence et d'une indisponibilité de certaines mesures INA, nous avons été amenés à utiliser les données climatiques de la station ONM de Dar El Beida qui consistent en une série climatique (données journalières) allant de 1952 à 2004 et comprenant les paramètres suivants :

- Les précipitations (mm)
- Les températures de l'air (°C)
- Les humidités de l'air (%)

## Cinétique de quelques paramètres physiologiques du blé dur *triticum durum* (variété vitron) sous contrainte hydrique dans la plaine de la Mitidja

---

- Les durées d'insolation (h)
- Les vitesses du vent (m/s)

## Partie III : Resultats et interpretations

### I.- Introduction

Cette partie sera consacrée aux discussions des résultats obtenus à l'issue des deux campagnes expérimentales et sera orientée vers deux aspects :

- Un premier volet traitant de l'état de la réserve en eau du sol pour les années 2000 et 2001.
- Un deuxième volet traitant des paramètres physiologiques du végétal et de leurs variations sous contrainte hydrique.

Nous tenterons par la suite d'établir des liens entre ces deux aspects dans le but d'évaluer les stratégies des traitements hydriques utilisés dans les deux campagnes 2000 et 2001.

### II.- Etat de la reserve en eau du sol

Notons que les résultats présentés ci – après sont obtenus à partir de simulations

---

réalisées à l'aide du Logiciel Pilote (J.C. Mailhol, Cemagref, Montpellier) avec les seuils de réserves suivantes :

Réserve à capacité au champs : 340,0 mm/m

Réserve au point de flétrissement : 140,0 mm/m

Parmi les paramètres physiologiques du blé ayant servi comme entrées du modèle Pilote pour les simulations des réserves en eau du sol, nous citerons à titre indicatif trois paramètres jugés les plus importants :

L'indice foliaire maximal LAI max du blé = 8.0

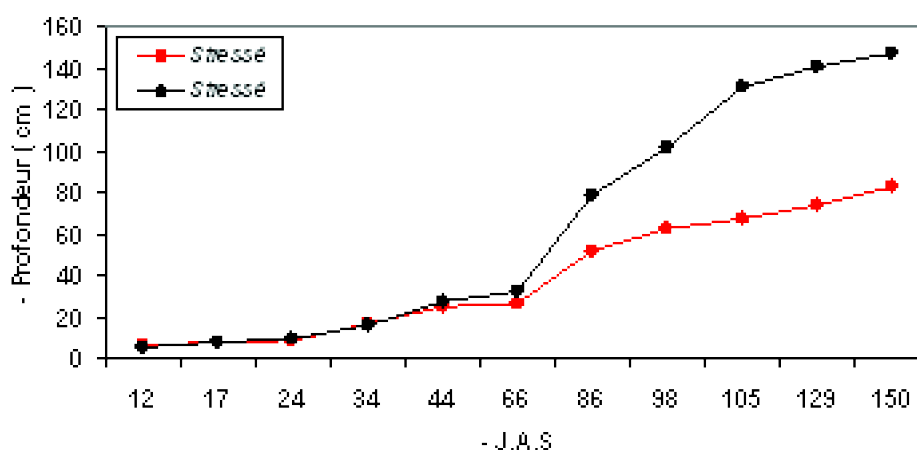
Somme des températures à maturation pour le blé = 1900 °C

Vitesse d'accroissement racinaire :

Traitement irrigué (ETM) : 0.008 m/j

Traitements stressés (PLU, MOD, SEV) : 0.013 m/j

Notons que les valeurs de LAI max et celle de la somme des températures ont été fournies par la littérature concernant la culture du blé, tandis que les vitesses de croissances des racines ont été déduites à partir de mesures sur terrain que nous présentons en figures N° III.1 et N° III.2 :



**Figure N° III.1 : Evolution de la profondeur des racines – Essai 2000**

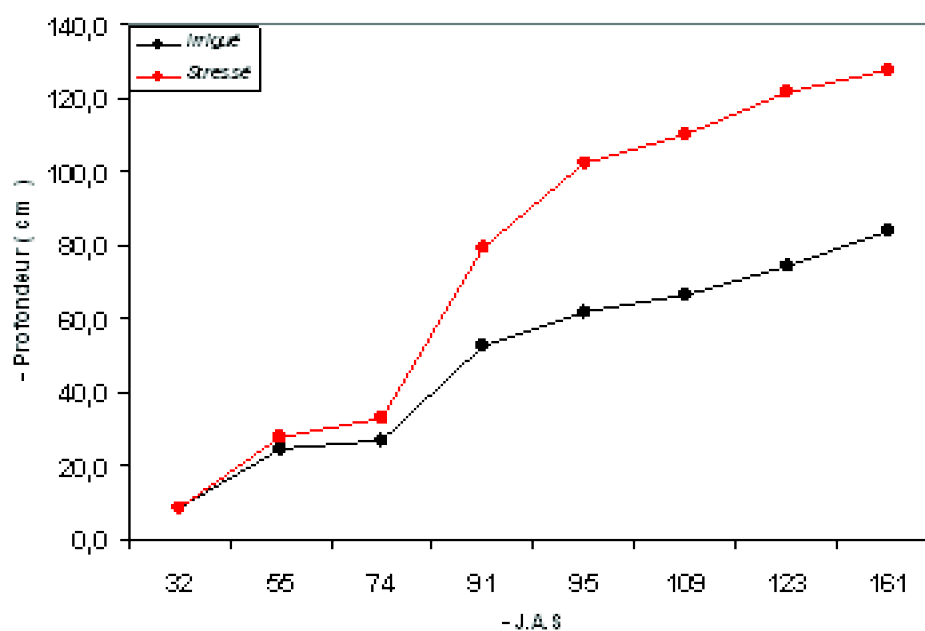


Figure N° III.2 : Evolution de la profondeur des racines – Essai 2001

## II.1.- Traitement ETM

Les graphique N° III.3 et N° III.4 suivants montre l'évolution des réserves en eau du sol pour une profondeur racinaire maximale de 1.0 m respectivement pour les années 2000 et 2001 :

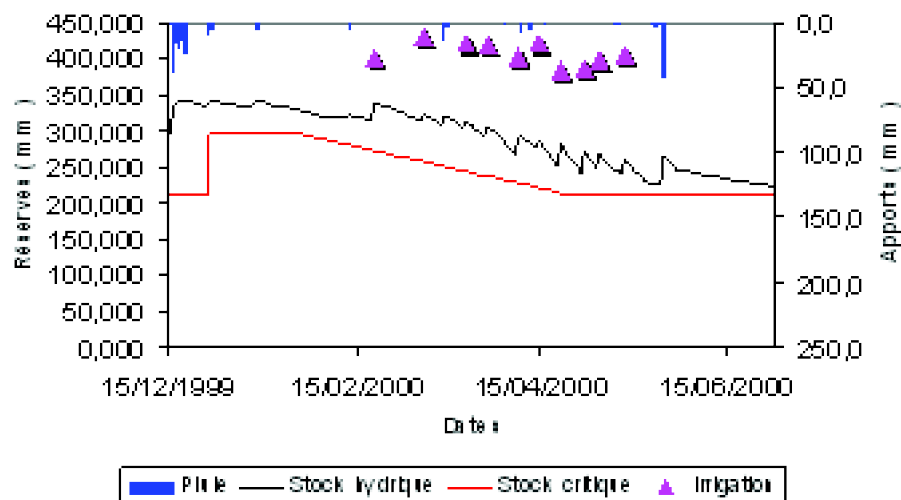
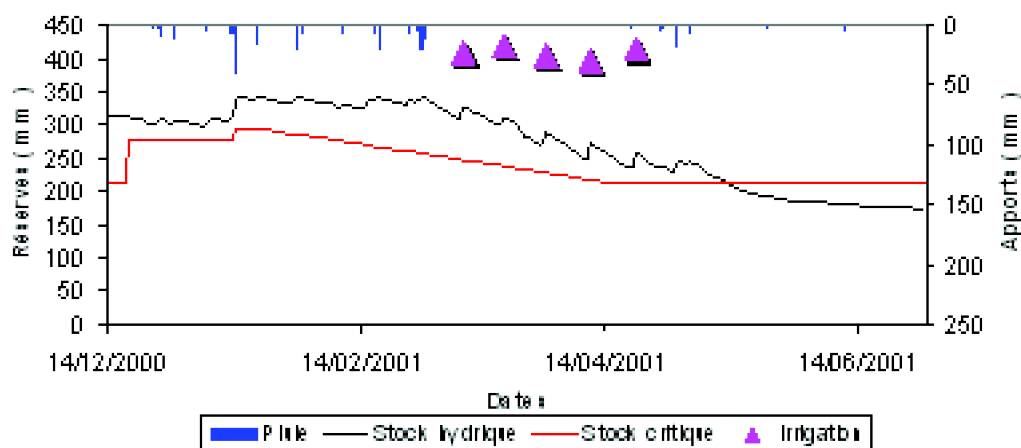


Figure N° III.3 : Variation de la réserve en eau du sol simulée (ETM 2000)

La réserve en eau du sol pour une profondeur racinaire de 1.0 m décroît légèrement en fin d'essai mais elle ne descend pas en dessous de la réserve critique, ce qui semble montrer que pour ce traitement ETM que les irrigations répétées ont permis d'assurer à la culture un confort hydrique.

La réserve en eau du sol a varié entre les valeurs de 221.0 et 337.0 mm (assez proche de la réserve à capacité au champ).



**Figure N° III.4 :** Variation de la réserve en eau du sol simulée (ETM 2001)

La réserve en eau du sol du traitement ETM correspondant à l'essai 2001 reste, en début du cycle, assez proche de la capacité en champs puis diminue malgré les irrigations répétées dont les doses n'arrivent pas à stabiliser au voisinage de la capacité au champs. En fin de cycle (à partir de la date du 14/05/2001), la réserve en eau du sol descend en dessous de la réserve critique. Ceci semble montrer l'installation d'un stress hydrique à partir de cette date mais qui, survenant en fin cycle, n'aura pas d'incidence pour la culture.

Les valeurs de la réserve en eau du sol pour le traitement ETM 2001 ont oscillé entre 174.0 mm le 30/06/2001 et 340.0 mm le 01/03/2001.

## II.2.- Traitement PLU

Les graphiques N° III.5 et N° III.6 montrent respectivement les variations de la réserve pour les essais 2000 et 2001.

La réserve en eau du sol du traitement pluvial ( $Z_r = 1.2$  m) décroît d'abord lentement puis brusquement pour descendre en dessous du seuil critique. Elle varie entre les valeurs de 186.0 et 407.0 mm (assez proche de la réserve à capacité au champ en raison de la seule irrigation du 20/02/2000).

Un stress hydrique s'est donc installé en fin de cycle, la réserve restant donc en dessous du seuil critique malgré la pluie de 43.3 mm survenue le 25/05/2000.

Par contre, pour l'essai 2001, on remarque bien que la réserve en eau du sol varie beaucoup pendant la période pluviale de Décembre à Mars et, grâce à ces apports, elle atteint sa valeur maximale de 408 mm le 21/01/2001. Ensuite, le cycle rencontre une période sèche allant de 01/03/2001 au 19/04/2001 qui entraîne une diminution assez importante de la réserve en dessous de la réserve critique jusqu'à atteindre la valeur la plus basse de 199.0 mm le 28/06/2001.



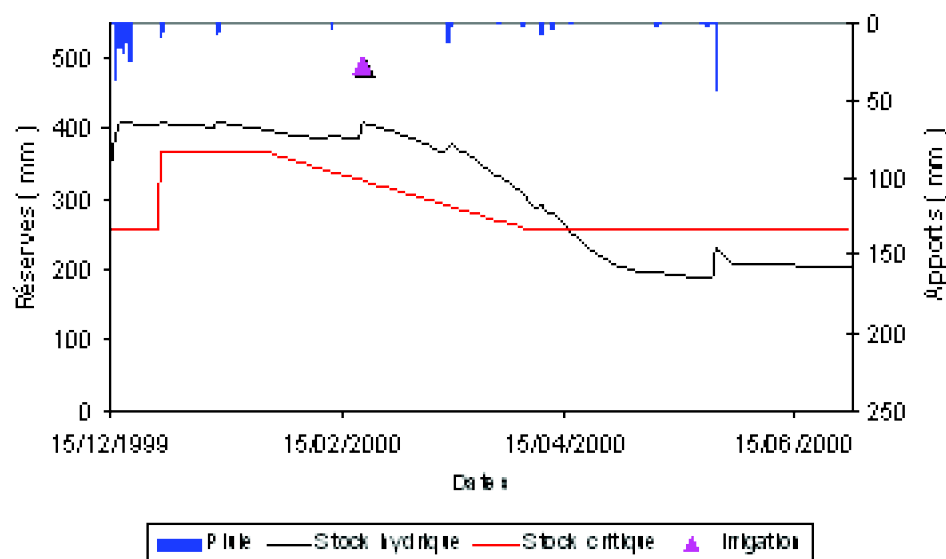


Figure N° III.5 : Variation de la réserve en eau du sol simulée (PLU 2000)

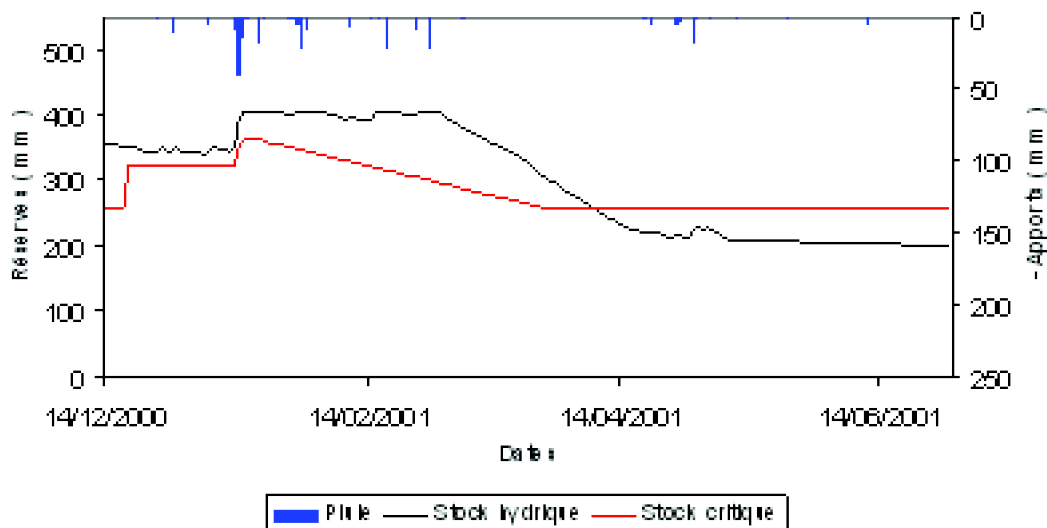


Figure N° III.6 : Variation de la réserve en eau du sol simulée (ETM 2001)

### II.3.- Traitement MOD

Les graphiques N° III.7 et N° III.8 montrent respectivement les variations de la réserve pour les essais 2000 et 2001.

La réserve en eau du sol pour une profondeur racinaire de 1,2 m décroît et descend en dessous de la réserve critique le 22/04/2000 et atteint une valeur minimale de 201.0 mm le 24/05/2000. Les irrigations au début du cycle ont cependant permis à la réserve en eau du sol d'atteindre le seuil maximal et on donc assuré à la plante un confort hydrique et retardé l'installation du stress hydrique.

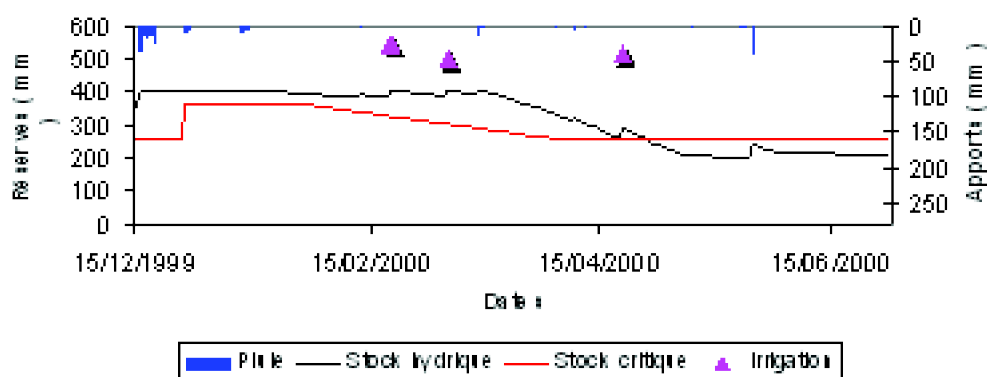


Figure N° III.7 : Variation de la réserve en eau du sol simulée (MOD 2000)

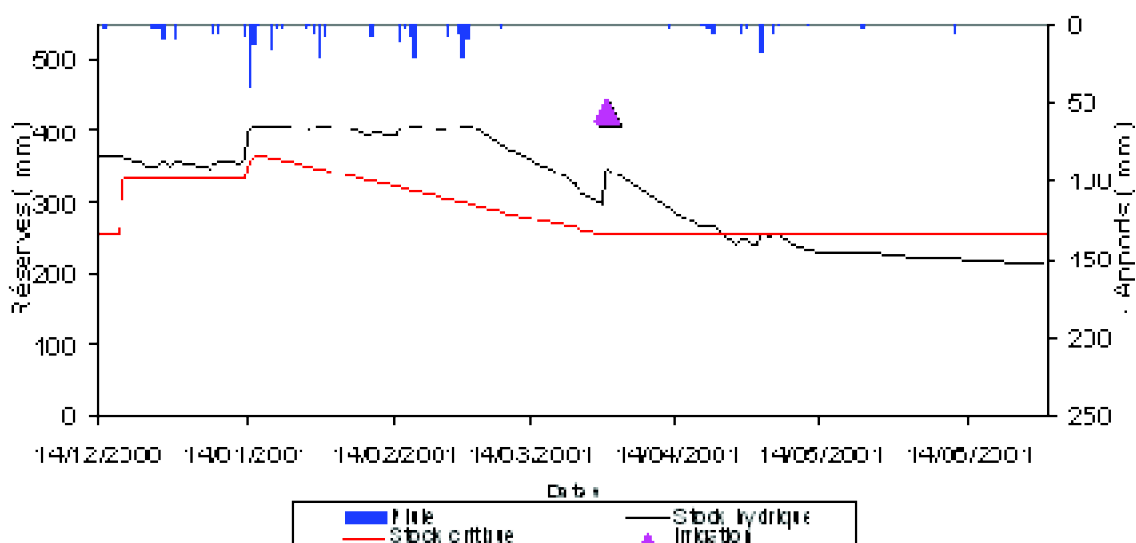


Figure N° III.8 : Variation de la réserve en eau du sol simulée (MOD 2001)

Pratiquement les mêmes conclusions que les autres traitements peuvent être notées ici, avec une réserve stabilisée au voisinage de la capacité en champs puis chutant brusquement en fin de cycle végétatif. Une irrigation, survenue pendant une période non pluvieuse, a permis de retarder la diminution de la réserve en dessous du seuil critique.

## II.4.- Traitement SEV

Les graphiques N° III.9 et N° III.10 montrent respectivement les variations de la réserve pour les essais 2000 et 2001.

La réserve en eau du sol pour une profondeur racinaire de 1.2 m remonte à chaque fois qu'il y'a un apport hydrique (pluie ou irrigation) et atteint une valeur maximale de 408.0 mm le 14/01/2000.

La réserve décroît légèrement en fin d'essai et descend en dessous de la réserve critique le 23/04/2000 et atteint un stock minimal de 195.0 mm le 24/05/2000.

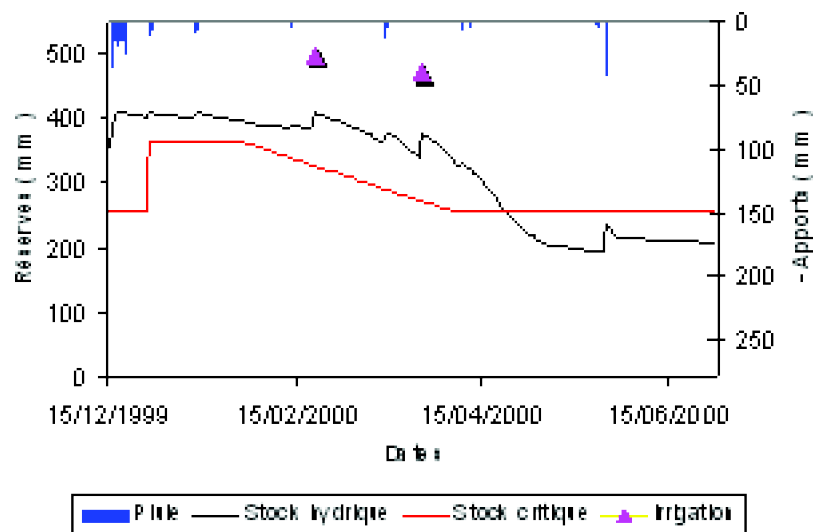


Figure N° III.9 : Variation de la réserve en eau du sol simulée (SEV 2000)

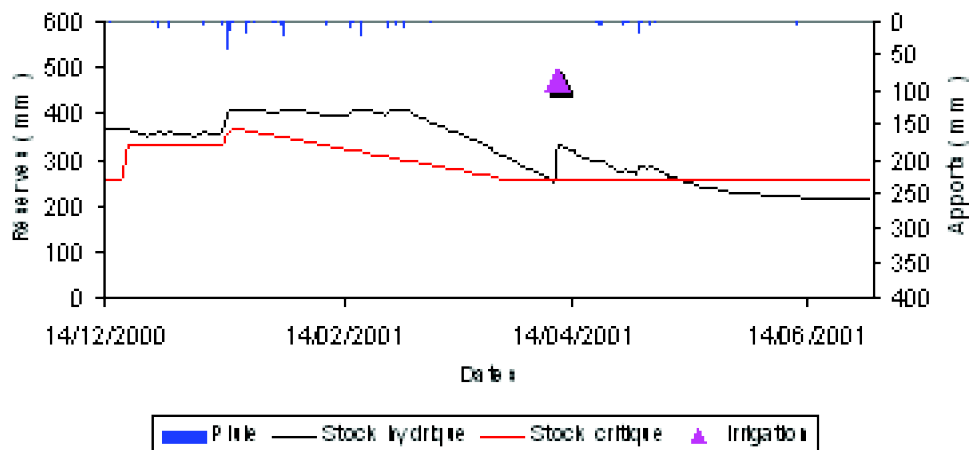


Figure N° III.10 : Variation de la réserve en eau du sol simulée (SEV 2001)

On remarque à travers ce graphique que la réserve reste d'abord largement au dessus de la réserve critique en raison d'un épisode pluvieux. Ensuite elle commence à décroître pour descendre en dessous du seuil critique en raison probablement de fortes évapotranspirations pendant un période sans pluie. Cette diminution est néanmoins ralentie par une irrigation qui vient à point pour relever la réserve au dessus du seuil critique et donc retarder l'installation d'un stress hydrique.

## III.- Paramètres physiologiques

### III.1.- Température du couvert végétal

Dans ce chapitre, nous discuterons les résultats des températures du couvert végétal à travers les différences :

Ts – Ta Avec Ts et Ta températures de surface du couvert et de l'air respectivement.

### III.1.1.- Evolution pendant la journée

Nous abordons ici une brève discussion sur l'évolution pendant la journée de la température du couvert végétal à travers deux graphiques respectivement pour les stades plein tallage et floraison de l'essai 2001.

Les graphiques N° III.11 et N°III.12 suivants montrent l'évolution pendant la journée de la température du couvert pendant les stades plein tallage et floraison, et ce pour les quatre traitements hydriques :

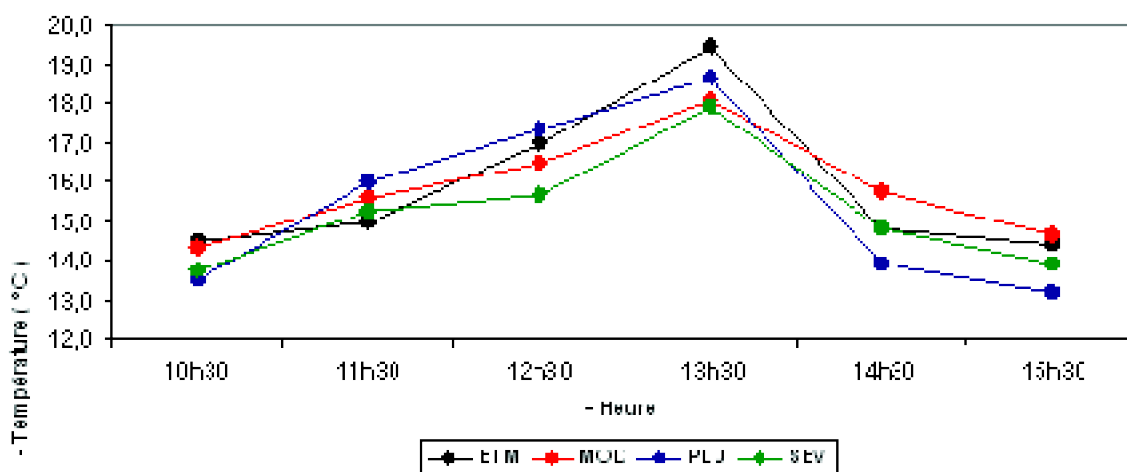


Figure N° III.11 : Evolution de la température du couvert (Stade Plein Tallage)

On remarque une augmentation de la température pour atteindre un maximum à midi solaire et diminuer ensuite en fin de journée. Les graphiques pour les 4 traitements ont pratiquement évolué de la même façon, les différenciations entre les traitements ne paraissent pas évidentes.

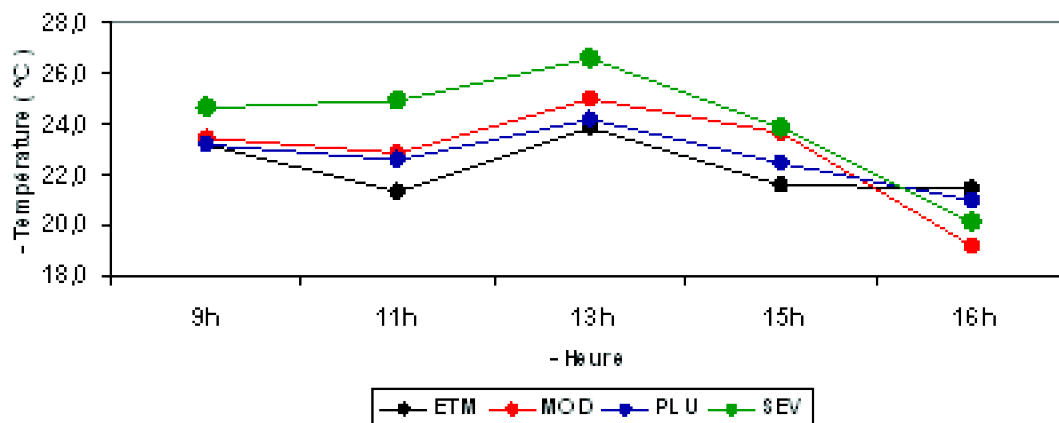


Figure N° III.12 : Evolution de la température du couvert (Stade Floraison)

Au stade floraison, l'évolution de la température n'est pas aussi prononcée que dans le graphique N° précédent. Le maximum est toujours atteint à midi solaire. Le traitement irrigué ETM présente les valeurs des températures les plus basses.

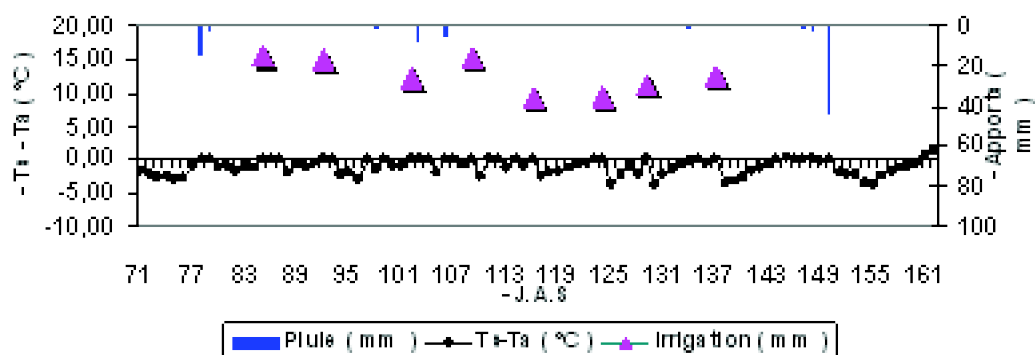
### III.1.2.- Evolution des écarts de température Ts-Ta

Nous avons étudié ce paramètre non pas pour déterminer le seuil critique de déclenchement de l'irrigation mais pour voir l'évolution de l'écart Ts - Ta pris le jour le jour car la variabilité dont dépend Ts - Ta est très aléatoire.

#### III.1.2.1.- Essai 2000

##### a.- Traitement ETM

Le graphique N° III.13 suivant montre l'évolution des écarts Ts - Ta au cours de la croissance du blé dans les conditions jugées de confort hydrique (traitement ETM). Nous y avons ajouté pour des besoins de compréhensions et d'interprétations les apports d'eau (pluies et irrigations).



**Figure N° III.13 : Evolution de l'écart de température Ts-Ta (ETM 2000)**

Les valeurs des écarts Ts - Ta pour le traitement irrigué restent en dessous de 0, ce qui semble indiquer que ce traitement a bénéficié d'un confort hydrique et n'a donc pas souffert de stress hydrique. On remarque aussi que les apports ( pluie et/ou irrigation ) ont à chaque fois entraîné une diminution des écarts Ts - Ta qui a atteint une valeur extrême de -3.75 °C en raison d'une pluie importante de 43.3 mm survenue au 150ème jour après semis .

##### b.- Traitement MOD

Le graphique N° III.14 suivant montre l'évolution des écarts Ts - Ta au cours de la croissance du blé dans les conditions jugées de stress modéré (traitement MOD). Nous y avons ajouté pour des besoins de compréhensions et d'interprétations les apports d'eau (pluies et irrigations).

En ce qui concerne le traitement Modéré, l'évolution des écarts Ts - Ta présente deux phases :

Une première phase pendant laquelle les valeurs Ts - Ta sont restées pratiquement en dessous de 0.

Une deuxième phase où un stress a commencé à s'installer mais qui a ensuite été retardé par une irrigation appropriée de 40 mm au 117 J.A.S.

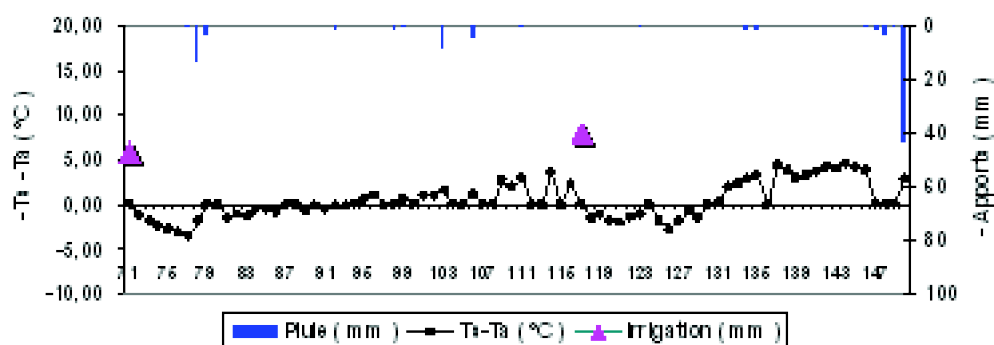


Figure N° III.14 : Evolution de l'écart de température  $T_s-T_a$  (MOD 2000)

**c. - Traitement SEV:**

Le graphique N° III.15 suivant montre l'évolution des écarts  $T_s - T_a$  au cours de la croissance du blé dans les conditions jugées de stress sévère (traitement SEV). Nous y avons ajouté pour des besoins de compréhensions et d'interprétations les apports d'eau (pluies et irrigations).

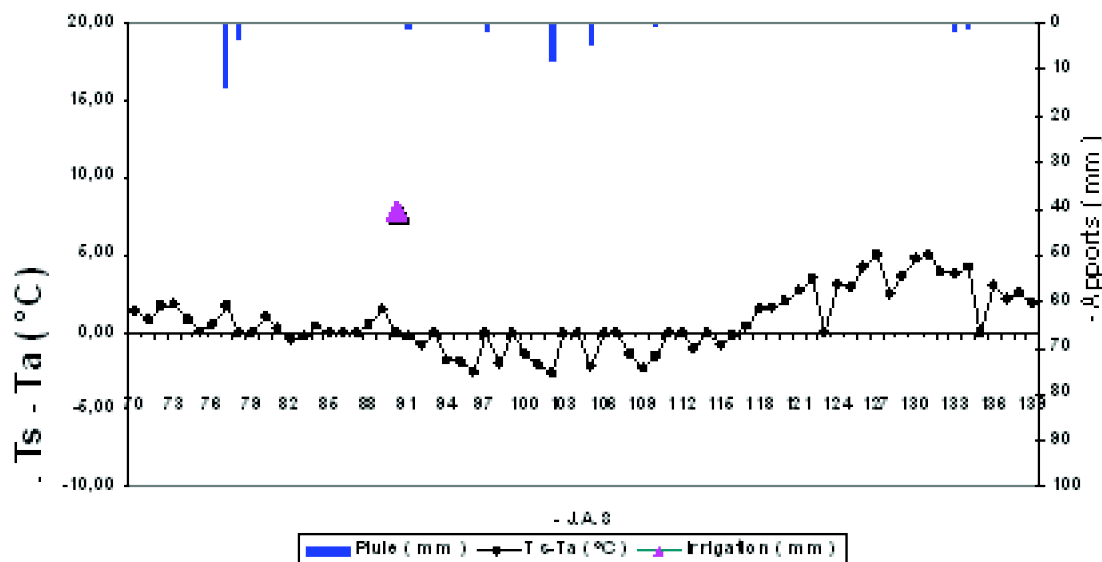


Figure N° III.15 : Evolution de l'écart de température  $T_s-T_a$  (SEV 2000)

La même remarque que le traitement MOD semble être valable pour le traitement SEV avec les deux périodes sans et avec stress. En effet, on voit que jusqu'aux environs du 117ème JA.S. , les écarts  $T_s-T_a$  restent autour et en dessous de 0 en raison des pluies (14. 8 et 5 mm aux 70. 102 et 105ème J.A.S) et de l'irrigation ( 40 mm au 90 J.A.S. ).

Ensuite il s'en suit une période sèche qui fait augmenter les écarts  $T_s-T_a$  jusqu'à atteindre la valeur maximale de 6 °C aux environs du 127ème J.A.S.

**d.- Traitement PLU**

Le graphique N° III.16 suivant montre l'évolution des écarts  $T_s - T_a$  au cours de la croissance du blé dans les conditions pluviales (traitement PLU). Nous y avons ajouté pour des besoins de compréhensions et d'interprétations les apports d'eau (pluies et irrigations).

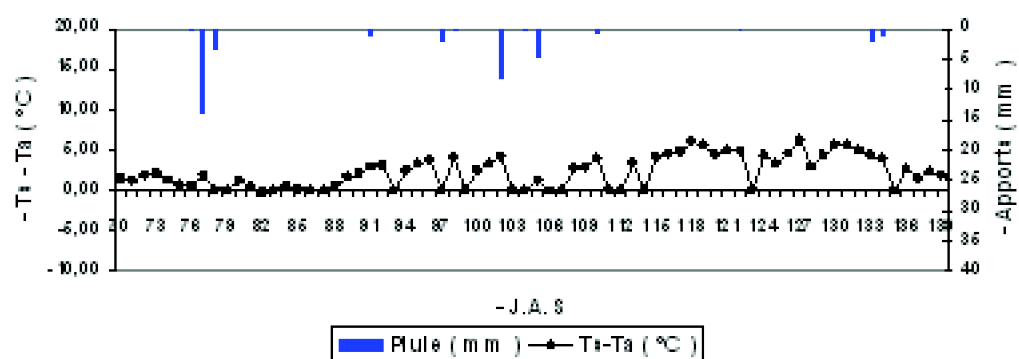


Figure N° III.16 : Evolution de l'écart de température  $T_s - T_a$  (PLU 2000)

Les écarts de températures pour le traitement pluvial sont pratiquement restés au dessus de 0 malgré les quelques pluies qui n'ont pas été assez suffisantes pour faire descendre les écarts en dessous de 0.

L'écart  $T_s - T_a$  a atteint sa valeur maximale de 6.3 °C le 127ème J.A.S. soit en fin de période végétative.

### III.1.2.2.- Essai 2001

#### a.- Traitement ETM

Le graphique N° III.17 présente les variations des écarts  $T_s - T_a$  pendant la croissance du blé , avec en plus les apports d'eau ( pluies et irrigations ) survenus pour la même période .

L'essai 2001 montre que, malgré les apports d'eau par irrigations , les écarts de températures n'ont pas été systématiquement en dessous de 0, ce qui dénote que le traitement irrigué n'a pas été conduit en ETM en raison peut être de doses insuffisantes . Les valeurs extrêmes des écarts  $T_s - T_a$  ont été de 7.8 et -7.2 °C respectivement aux 91 et 93ème J.A.S.

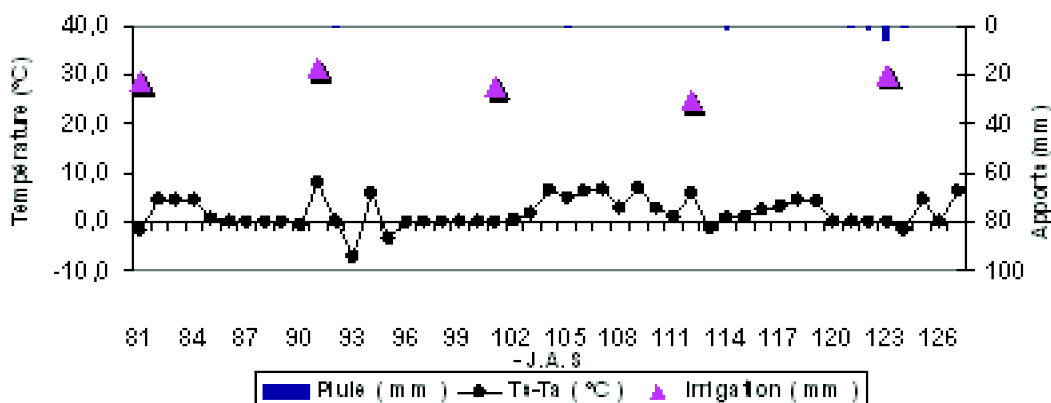
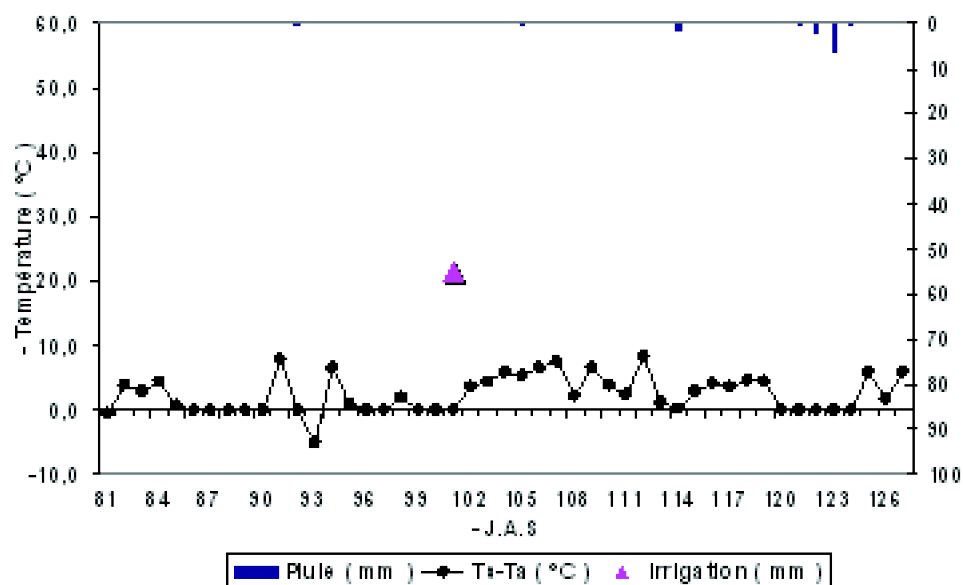


Figure N° III.17 : Evolution de l'écart de température  $T_s - T_a$  (ETM 2001)

#### b.- Traitement MOD

Le graphique N° III.18 présente les variations des écarts  $T_s - T_a$  pendant la croissance du blé , avec en plus les apports d'eau ( pluies et irrigations ) survenus pour la même période .



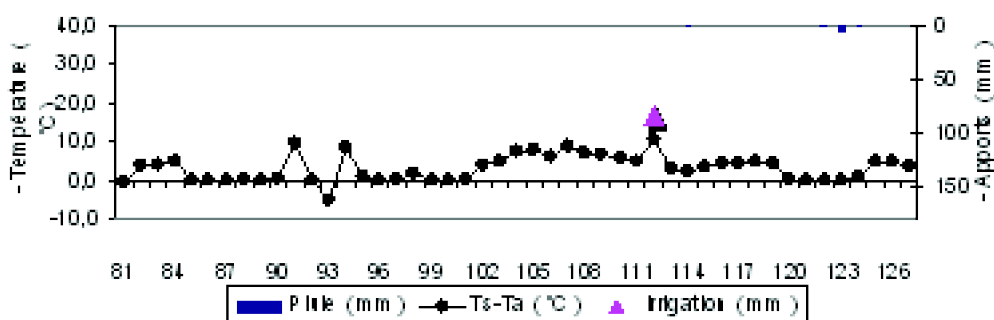
**Figure N° III.18 :** Evolution de l'écart de température  $T_s-T_a$  (MOD 2001)

Les mêmes conclusions sont valables ici pour le traitement MOD avec des écarts de températures oscillant entre +7,8 et -5,2 °C aux 91 et 93ème J.A.S.

Il faut noter aussi que l'irrigation de 55 mm au 101ème J.A.S n'a pas réussi à empêcher l'installation d'un stress hydrique même si elle a quelque peu amoindri l'augmentation des écarts  $T_s - T_a$ .

#### c.- Traitement SEV

Le graphique N° III.19 présente les variations des écarts  $T_s - T_a$  pendant la croissance du blé , avec en plus les apports d'eau ( pluies et irrigations ) survenus pour la même période .



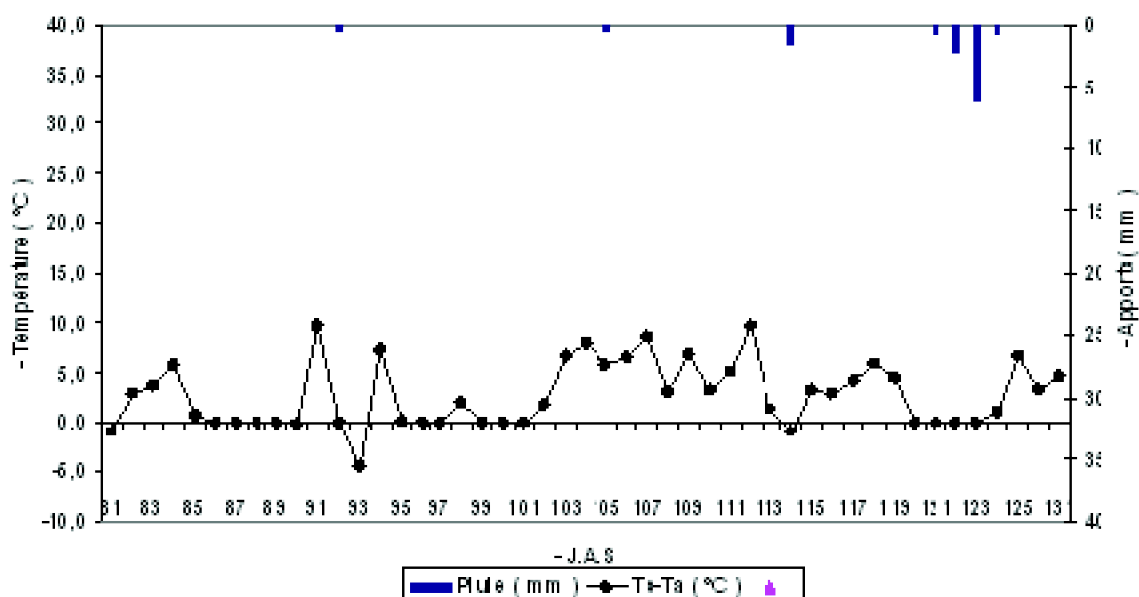
**Figure N° III.19 :** Evolution de l'écart de température  $T_s-T_a$  (SEV 2001)

En ce qui concerne le traitement SEV de l'essai 2001, les écarts de températures sont quelque peu plus prononcés avec des valeurs allant de -5.2 °C ( 93ème J.A.S ) à 10.4 °C ( 112ème J.A.S ).

#### d.- Traitement PLU

Le graphique N° III.20 présente les variations des écarts  $T_s - T_a$  pendant la croissance du blé , avec en plus les apports d'eau ( pluies et irrigations ) survenus pour la même période .





**Figure N° III.20 : Evolution de l'écart de température  $T_s-T_a$  (PLU 2001)**

Le traitement pluvial de l'essai 2001 présente une évolution des écarts  $T_s - T_a$  restant au dessus du seuil 0 avec une augmentation assez prononcée en fin d'essai . Les valeurs atteintes par ces écarts ont varié entre  $-4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (93ème J.A.S) et  $9.7^{\circ}\text{C}$  (112ème J.A.S).

### III.1.3.- Relation entre la réserve en eau du sol et les écarts $T_s-T_a$

Dans le but d'analyser la pertinence des écarts  $T_s - T_a$  en tant qu'indicateur de stress hydrique, nous les discutons ici en relation avec les variations de la réserve en eau du sol par rapport au stock critique. Cette analyse a pour but de voir si les températures du couvert permettent de détecter un stress hydrique au même moment lorsque la réserve en eau du sol descend en dessous du seuil critique.

Nous limiterons cette discussion aux seules données de l'essai 2000 ayant fait l'objet de mesures intensives de température du couvert.

#### III.1.3.1.- Traitement ETM 2000

La figure N° III.21 regroupe les courbes correspondant aux réserves simulées et critiques ainsi que celle des écarts  $T_s - T_a$ , pour valider le traitement irrigué.

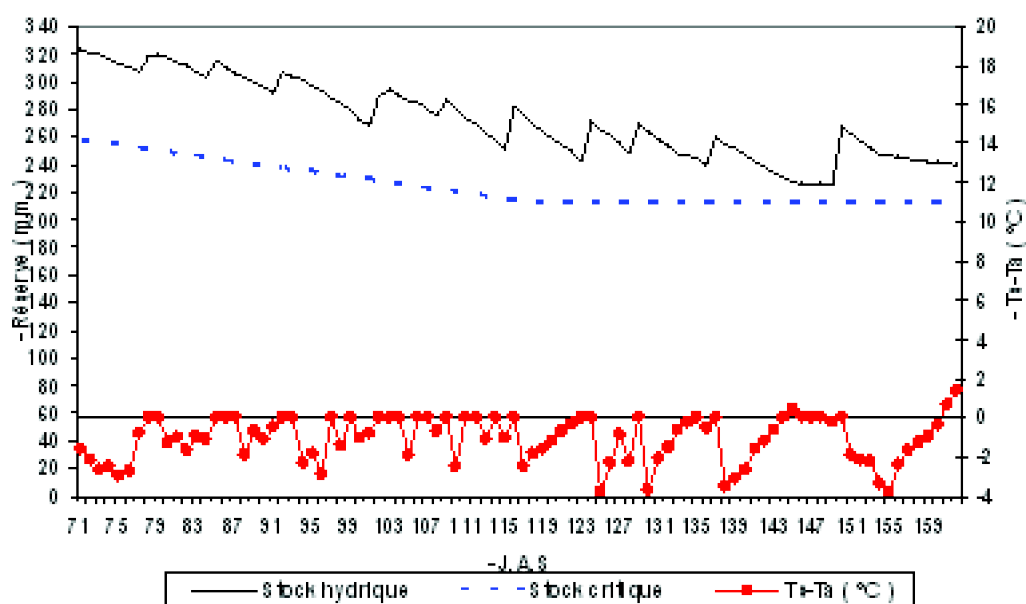


Figure N° III.21 : Réserve en eau du sol et écart de température  $T_s - T_a$  (ETM 2000)

L'évolution des écarts  $T_s - T_a$  ainsi que la réserve en eau du sol montre clairement que la culture est dans un état de confort hydrique. Les deux courbes répondent pratiquement au même moment en cas d'apport d'eau (pluie ou irrigation).

### III.1.3.2.- Traitement MOD 2000

La figure N° III.22 regroupe les courbes correspondant aux réserves simulée et critique ainsi que celle des écarts  $T_s - T_a$ .

A travers ce graphique, on peut noter deux phases :

Il faut cependant noter que la transition entre ces deux phases est perturbée par un apport d'eau (Irrigation) qui a quelque peu retardé la diminution de la réserve en eau en dessous du seuil critique et a de ce fait rechuter les écarts  $T_s - T_a$  en dessous de 0.

On peut aussi remarquer que les écarts  $T_s - T_a$  détectent un peu plus tôt le stress hydrique : en effet, lorsque la réserve avoisine le seuil critique, les écarts  $T_s - T_a$  sont largement au dessus de 0.

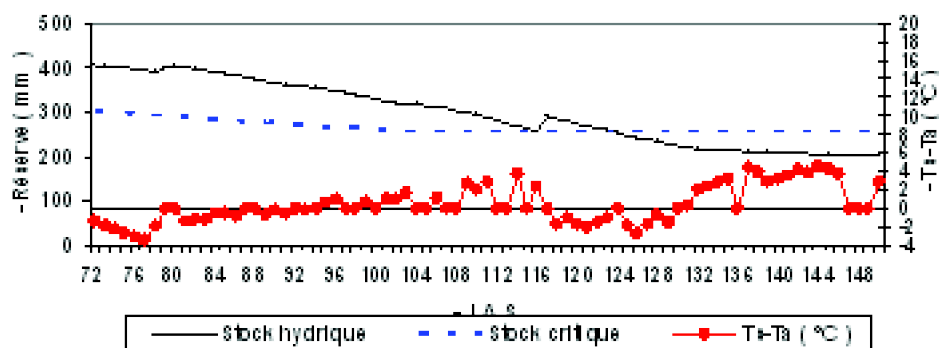
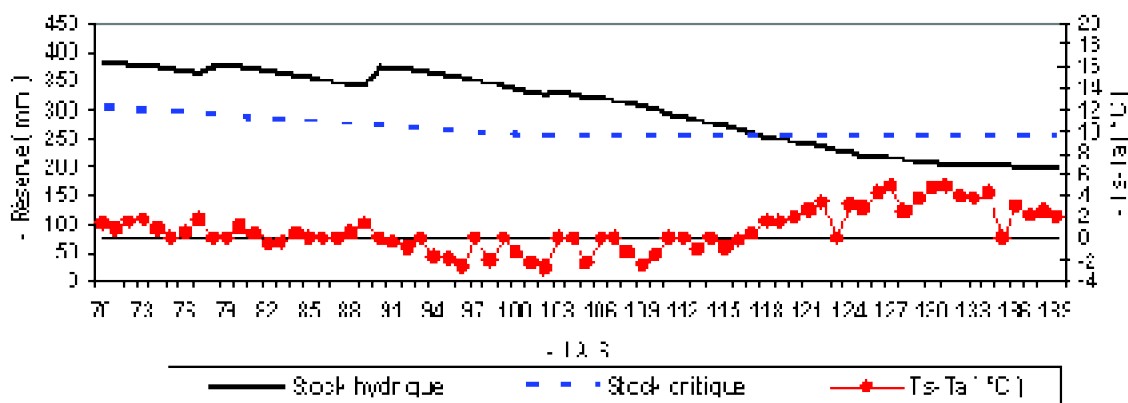


Figure N° III.22 : Réserve en eau du sol et écart de température  $T_s - T_a$  (MOD 2000)

### III.1.3.3.- Traitement SEV 2000

La figure N° III.23 regroupe les courbes correspondant aux réserves simulée et critique ainsi que celle des écarts  $T_s - T_a$ .



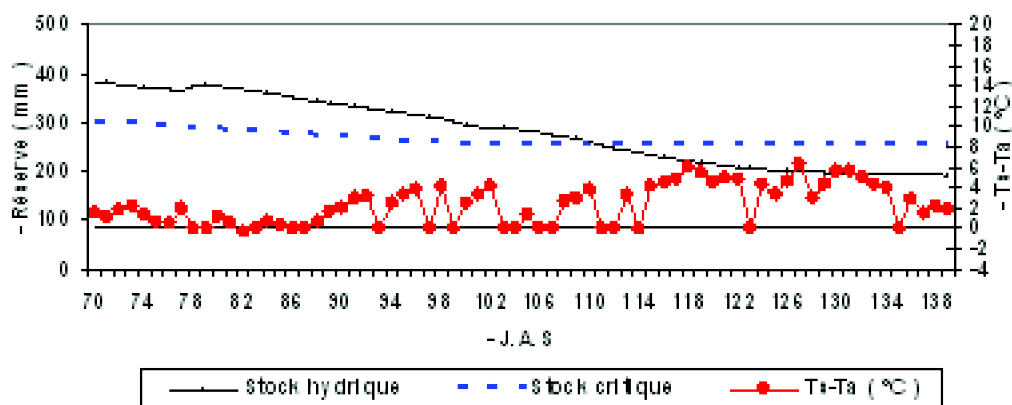
**Figure N° III.23 : Réserve en eau du sol et écart de température  $T_s - T_a$  (SEV 2000)**

Le traitement Sévère se comporte de la même façon que le traitement Modéré avec une phase de confort hydrique et une autre de stress hydrique s'installant en fin d'essai.

Contrairement aux observations faites pour le traitement MOD, on remarque ici que les deux paramètres (réserve et  $T_s - T_a$ ) indiquent pratiquement au même moment l'apparition d'un stress hydrique.

#### III.1.3.4.- Traitement PLU 2000

La figure N° III.24 regroupe les courbes correspondant aux réserves simulée et critique ainsi que celle des écarts  $T_s - T_a$ .



**Figure N° III.24 : Réserve en eau du sol et écart de température  $T_s - T_a$  (PLU 2000)**

Le graphique montre que, pour le traitement pluvial, il existe un grand décalage de dates de stress hydrique entre les deux courbes relatives à la réserve en eau et les écarts  $T_s - T_a$ . Le paramètre lié à la température du couvert végétal semble détecter le stress hydrique bien avant que la réserve en eau du sol devienne déficitaire.

#### III.1.4.- Indice de stress hydrique lié à la température du couvert végétal

Nous avons vu en bibliographie qu'il existe plusieurs indices qui peuvent être déduits à partir de la température du couvert végétal et définis à travers les concepts de SDD (

Stress Degree Day ) , CTV ( Canopy Temperature Variability ) , TSD ( Temperature Stress Day ) , CWSI ( Crop Water Stress Index ) , etc ...

Nous allons discuter ici deux de ces indices en l'occurrence le SDD et le CWSI que nous choisissons car considérés comme étant les "pionniers" des indicateurs de stress hydrique basés sur la mesure de Ts et donc les plus utilisés dans les travaux de recherche et les plus accessibles dans la littérature.

### **III.1.4.1.- L'approche SDD (Stress Degree Day)**

Nous noterons que nous nous limiterons, dans nos calculs, aux seules données de température du couvert concernant les traitements modéré, sévère et pluvial de l'essai 2000 dont les valeurs obtenues in situ sont jugées plus crédibles que celles de l'essai 2001 .

Bref rappel sur le concept de SDD

L'équation du bilan radiatif (Rn) montre qu'une comparaison directe entre les températures du couvert et de l'air peut être une indication de stress. Cette comparaison fût appelée " Stress Degree Day ", noté SDD, tenant compte du fait que la température d'une plante sous stress est plus importante que celle de l'air. C'est ainsi que le concept de SDD ( Stress Degree Day, Idso et al., 1977 ) fût élaboré selon le principe basé sur la relation entre la différence de température entre le couvert et l'air (Tc-Ta) et l' état hydrique de la plante.

Le SDD a été défini par Idso et al. (1977) et Jackson et al. (1977) à l'aide de la formula suivante :

$$SDD = \sum_n^{i-1} (T_c - T_a)_i \dots\dots\dots(III.1)$$

Où : Tc est la température du couvert mesuré à midi solaire ; Ta la température de l'air.

Idso et al. (1977) ont montré que pour les climats arides (Arizona), les rendements du blé diminuent si le SDD devenait positif. Jackson et al. (1977) postulèrent que le SDD était directement lié à la consommation en eau et peut donc être utilisé comme indicateur de stress hydrique et outil de pilotage des irrigations. D'autres travaux ont cependant montré que la division arbitraire à SDD=0 était inappropriée pour toutes les conditions plus particulièrement pour les régions à forte humidité atmosphérique.

C'est pour cela, que l'on se retrouve devant deux alternatives de calcul du SDD :

Une première méthode qui consiste à calculer le SDD en cumulant " toutes " les valeurs des écarts Tc - Ta.

Une deuxième méthode qui consiste à calculer le SDD en ne cumulant que les valeurs des écarts Tc - Ta " positifs ".

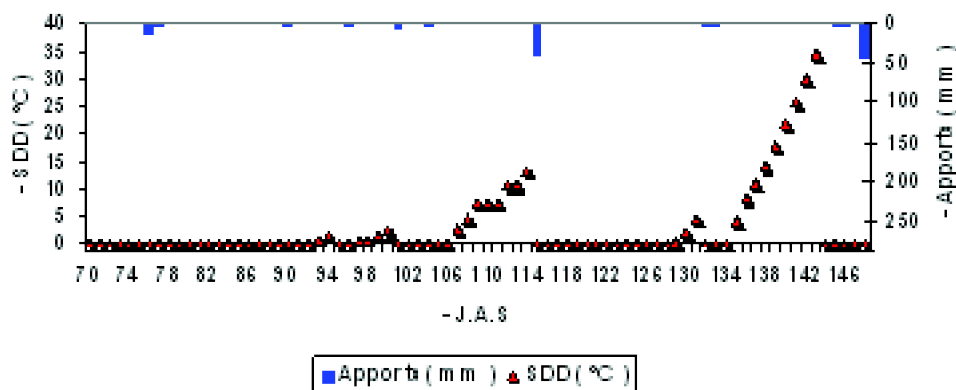
Dans notre étude, nous adoptons la deuxième méthode qui semble être la plus adoptée en littérature.

De plus, cette méthode consiste à remettre le compteur du SDD à 0 dès que survient un apport d'eau (pluie ou irrigation).

Nous notons que seules les valeurs des températures du couvert de l'essai 2000 ont été utilisées dans les calcul du SDD pour les traitements modéré, sévère et pluvial.

Traitement modéré :

Le graphique N° III.25 montre l'évolution du SDD pendant le cycle végétatif du blé. Nous y avons inséré les apports d'eau pour plus de clarté :

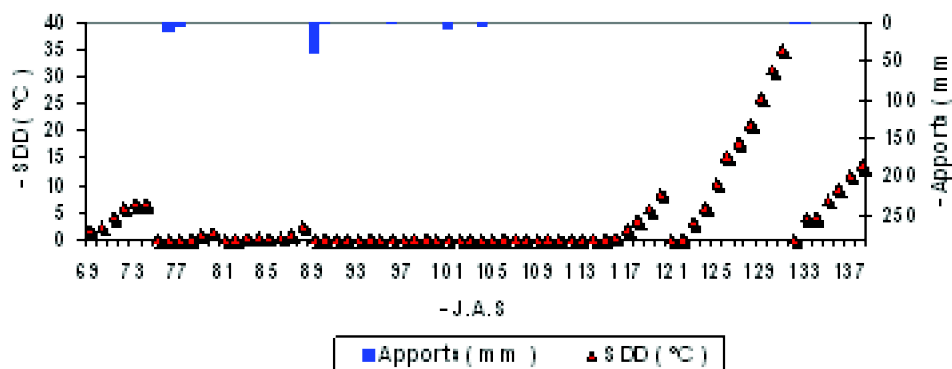


**Figure N° III.25:** Evolution du Stress Degree Day SDD (MOD 2000)

Le graphique montre que le SDD reste égal à 0 jusqu'au 106ème J.A.S, puis augmente jusqu'à atteindre la valeur de 13.2 °C au 114ème J.A.S. La valeur de SDD = 13 °C annonce un stress hydrique important qui commence à s'installer. L'irrigation de 40 mm le 115ème J.A.S permet d'éviter l'installation d'un stress " irréversible " et remet le SDD à la valeur seuil 0 pendant une période allant du 115ème au 134ème J.A.S. Au-delà de cette période, l'absence des apports fait en sorte que le SDD augmente jusqu'à atteindre la valeur de 34°C le 143ème J.A.S, valeur qui nous semble assez excessive.

Traitement sévère :

Le graphique N° III.26 montre l'évolution du SDD pendant le cycle végétatif du blé. Nous y avons inséré les apports d'eau pour plus de clarté :



**Figure N° III.26:** Evolution du Stress Degree Day SDD (SEV 2000)

Les mêmes remarques que le traitement modéré peuvent être faites ici pour le traitement sévère :

Une première phase pendant laquelle les apports météoriques ainsi que l'irrigation de

40 mm le 89ème J.A.S ont réussi à maintenir le SDD au voisinage de 0 montrant ainsi que le blé était en " confort hydrique " .

Une première phase survenant en fin de cycle pendant laquelle l'absence des apports météoriques ainsi que les irrigations ont entraîné une augmentation sensible du SDD , d'abord vers 8.3 °C pour atteindre ensuite les 35 °C .

#### Traitement pluvial :

Le graphique N° III.27 montre l'évolution du SDD pendant le cycle végétatif du blé. Nous y avons inséré les apports d'eau pour plus de clarté :

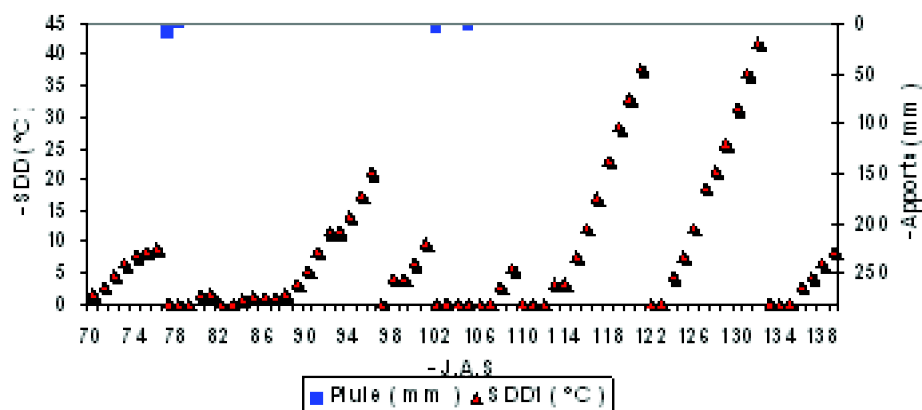


Figure N° III.27: Evolution du Stress Degree Day SDD ( PLU 2000 )

Le SDD correspondant au traitement pluvial ne s'est pas comporté comme ceux des traitements précédents. On observe ici plusieurs paliers d'augmentation du SDD notant ainsi que la plante a souffert d'un manque d'eau en l'absence d'irrigations. Les paliers observés chronologiquement correspondent à des pics de SDD de 9°C (76ème J.A.S), 21°C (96ème J.A.S), 9.8°C (101ème J.A.S), 5.6°C (109ème J.A.S), 38°C (121ème J.A.S) et 42°C ( 132ème J.A.S ). Cette évolution semble montrer l'installation progressive du stress hydrique jusqu'en fin de cycle.

#### III.1.4.2.- L 'approche CWSI ( Crop Water Stress Index )

Nous noterons que nous nous limiterons, dans nos calculs, aux seules données de température du couvert concernant les traitements Modéré et Sévère de l'essai 2000.

Outre la discussion sur la " pertinence " du CWSI à détecter un stress hydrique, nous essayerons de faire la liaison entre deux notions : CWSI "théorique" et CWSI "mesuré".

CWSI théorique :

Développé par Jackson et al. (1981 ), le CWSI repose sur une relation établie entre les écarts  $T_s - T_a$  et les mesures expérimentales notamment le " Déficit de Pression de Vapeur " noté VPD ( Vapor Pressure Deficit ) .

Théoriquement, le CWSI repose sur la formule classique de Penman-Monteith dont les fondements sont largement connus dans la littérature et sur lesquelles nous ne revenons pas ici. Nous nous limiterons donc aux formules de base permettant le calcul du CWSI. Les différents paramètres intervenant dans ces formules font partie intégrante de

l'équation de Penaman-Monteith :

La formule théorique utilisée dans le calcul du CWSI est la suivante :

$$CWSI_t = 1 - \frac{(T_s - T_a)_{\max} - (T_s - T_a)}{(T_s - T_a)_{\max} - (T_s - T_a)_{\min}} \quad \text{.....(III.2)}$$

Les valeurs extrêmes de  $T_s - T_a$  sont calculées par les expressions suivantes :

$$(T_s - T_a)_{\min} = \frac{r_a R_v}{C_v} \frac{\gamma}{(\Delta + \gamma)} - \left( \frac{VPD}{(\Delta + \gamma)} \right) \quad (^\circ\text{C}) \quad \text{..... (III.3)}$$

$$(T_s - T_a)_{\max} = \frac{r_a R_v}{C_v} \quad (^\circ\text{C}) \quad \text{.....(III.4)}$$

Avec :

**CWSI mesuré :**

Le CWSI mesuré est calculé par la même formule (N° III.2) que le CWSI théorique mais avec des valeurs de  $(T_s - T_a)_{\max}$  et  $(T_s - T_a)_{\min}$  correspondant aux écarts  $T_s - T_a$  "mesurés" respectivement pour les traitements Pluvial et Irrigué . La formule N° peut donc être traduite de la façon suivante :

$$CWSI_{\text{mes}} = 1 - \frac{(T_s - T_a)_{\text{plu}} - (T_s - T_a)}{(T_s - T_a)_{\text{irri}} - (T_s - T_a)_{\text{plu}}} \quad \text{.....(III.4)}$$

**Résultats des CWSI obtenus :**

**1.- Evolution des CWSI théorique et mesuré**

**1.1.- Traitement Modéré 2000**

Le graphique (Fig. N° III.28) montre les évolutions des CWSI théorique et mesuré pour le traitement Modéré 2000. On remarque que les deux indices évoluent pratiquement de la même façon malgré quelques distorsions probablement liées aux erreurs de mesures.

Nous notons ici que les CWSI expriment fidèlement les constatations faites pour les températures du couvert (cf. graphique  $T_s$  modéré). Le CWSI débute avec des valeurs négatives ou nulles (confort hydrique) pour augmenter et atteindre les valeurs 1 à 1.5 montrant l'apparition d'un important stress hydrique. La diminution brusque des CWSI à partir du 117ème J.A.S est due à l'apport d'eau par irrigation de 40 mm à cette date qui permet de faire rechuter le CWSI vers 0 et retarder donc le stress hydrique.

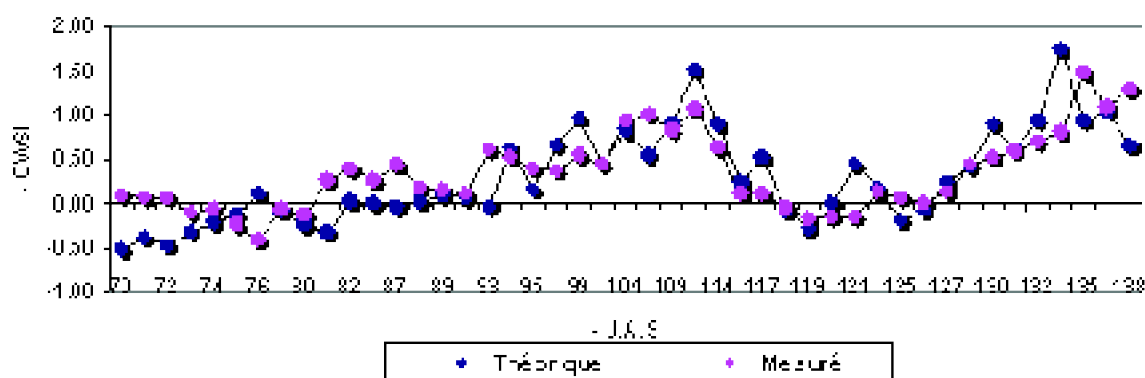


Figure N° III.28 : Evolution des Crop Water Stress Index CWSI théorique et mesuré (MOD 2000)

Nous avons ensuite établi la relation entre les CWSI théorique et mesuré dans le but de comparer entre les deux méthodes de calcul. Ainsi, la figure N° III.29 suivante montre qu'il existe une relation acceptable entre les deux CWSI ( $R^2 = 0.553$ ) :

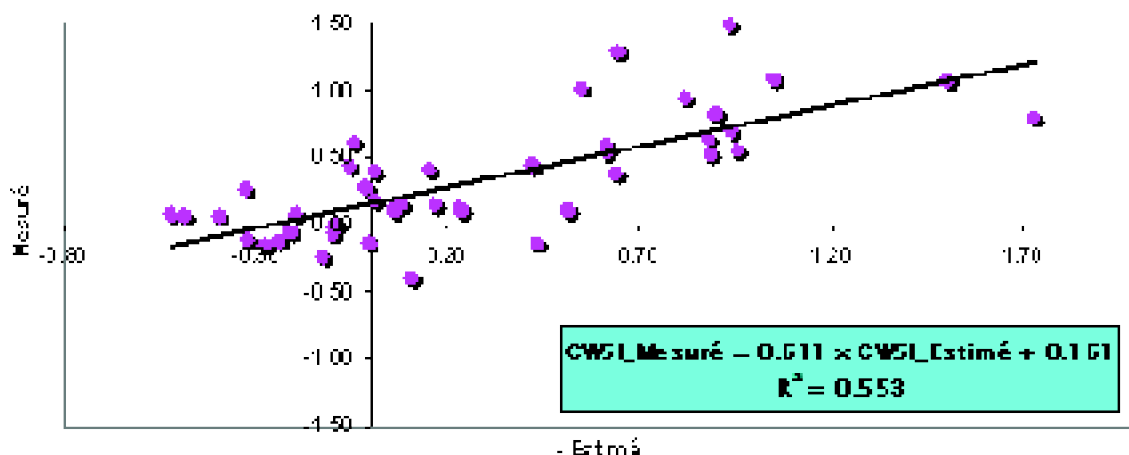


Figure N° III.29 : Relation entre les CWSI théorique et mesuré (MOD 2000)

L'analyse de variance de la régression (tableau N° III.1) vient confirmer que le modèle obtenu est acceptable eu égard aux probabilités de 0.0025, 0.0000 et 0.0000 pour respectivement l'ordonnée, la pente et le modèle. Ces trois valeurs étant largement inférieures au risque choisi de 5%, le modèle est donc jugé " très hautement significatif " :

Tableau N° III.1: Analyse statistique de la régression " CWSI mesuré – CWSI estimé " (MOD)

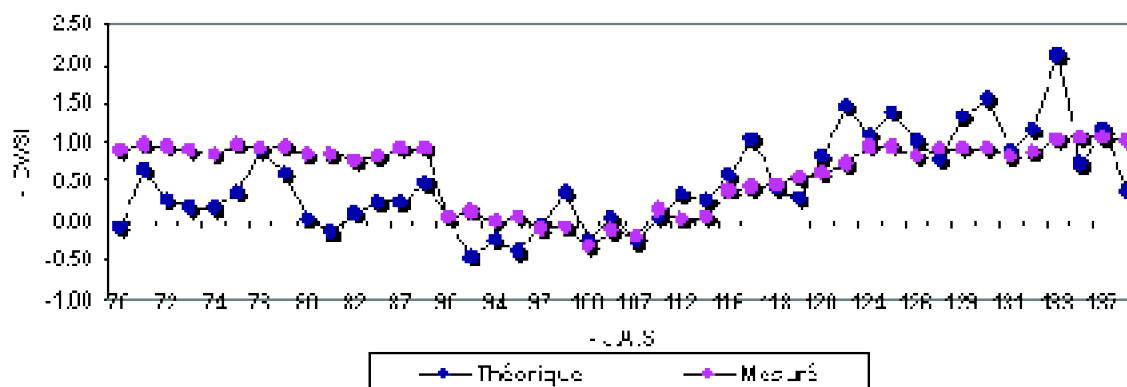
Paramètre	Estimation	Ecart Type	$R^2$	Probabilité	Test
Pente	0.611	0.0840	-	0.0000	THS
Ordonnée	0.161	0.0501	-	0.0025	THS
Modèle	-	0.2937	0.553	0.0000	THS

### 1.2.- Traitement Sévère 2000

Le traitement Sévère (Fig. N° III.30) montre d'emblée (à partir du 70ème J.A.S) des CWSI proche de 1, ce qui dénote une phase de stress hydrique. Ensuite, une irrigation de 40 mm le 90ème J.A.S a entraîné une chute des CWSI vers la valeur 0 (confort hydrique).

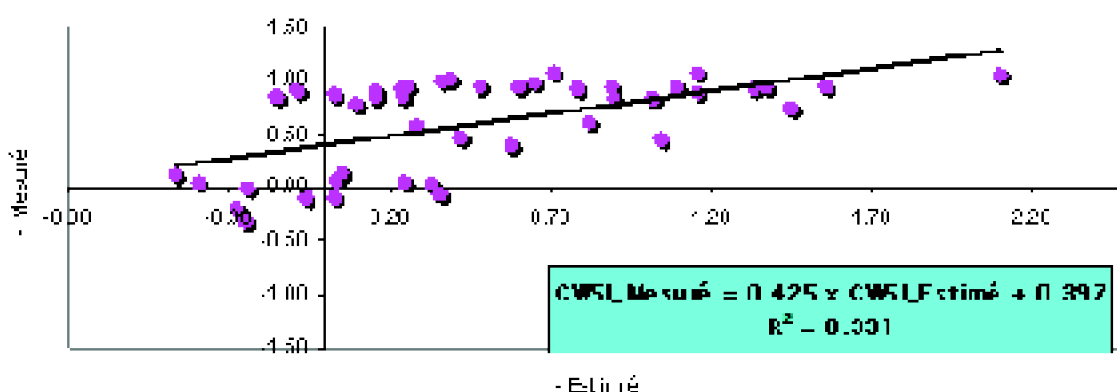


Cet état de confort a duré jusqu'au 116ème J.A.S pour ensuite donner lieu à une période de stress hydrique en fin de cycle.



**Figure N° III.30 :** Evolution des Crop Water Stress Index CWSI théorique et mesuré (SEV 2000)

De même que le traitement Modéré, la relation obtenue (Fig. N° III.31) entre les CWSI théorique et mesuré semble être acceptable ( $R^2 = 0.331$ ) :



**Figure N° III.31 :** Relation entre les CWSI théorique et mesuré (SEV 2000)

Le tableau N°III.2 de l'analyse de variance de cette relation montre les probabilités confirmant la conclusion que nous avons émise tenant compte seulement du coefficient de détermination :

En effet, les probabilités insignifiantes (0.0000) pour l'ordonnée, la pente et le modèle viennent confirmer qu'il s'agit d'une relation jugée " très hautement significative " :

**Tableau N° III.2 :** Analyse statistique de la régression " CWSI mesuré – CWSI estimé " (SEV)

Paramètre	Estimation	Ecart Type	$R^2$	Probabilité	Test
Pente	0.425	0.0930	-	0.0000	THS
Ordonnée	0.397	0.0703	-	0.0000	THS
Modèle	-	0.3549	0.331	0.0000	THS

### 1.3.- Relations entre les CWSI théorique et mesuré tous traitements confondus

Nous présentons dans ce qui suit (fig. N° III.32 et tableau N° III.3) la même relation que les précédentes en regroupant les valeurs des CWSI obtenues pour les deux

traitements hydriques ainsi que les résultats de l'analyse de variance correspondante :

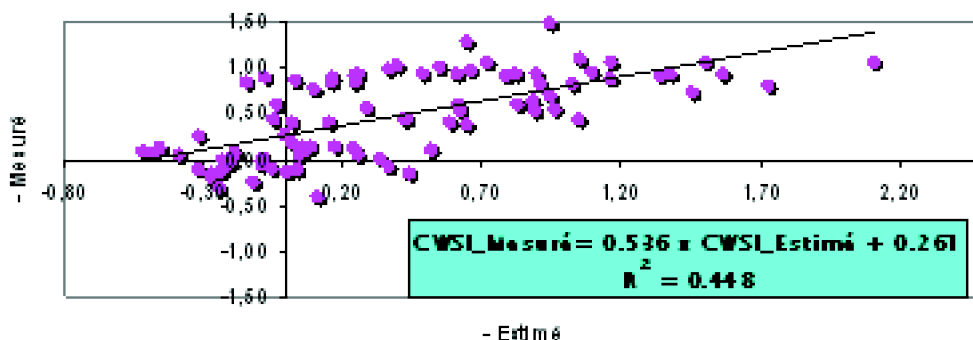


Figure N° III.32 : Relation entre les CWSI théorique et mesuré (MOD et SEV 2000)

Tableau N° III.3 : Analyse statistique de la régression " CWSI mesuré – CWSI estimé (MOD+SEV)

Paramètre	Estimation	Ecart Type	R <sup>2</sup>	Probabilité	Test
Pente	0.536	0.0638	-	0.0000	THS
Ordonnée	0.261	0.0434	-	0.0000	THS
Modèle	-	0.3358	0.448	0.0000	THS

Le regroupement des données des deux traitements hydriques donne lieu aussi à une relation statistiquement significative.

## 2.- Relation entre les CWSI et le rapport ETR/ETM

### 2.1.- Traitement Modéré 2000

De plus, nous avons ensuite essayé de tester la relation liant le CWSI au rapport ETR/ETM. Nous avons ainsi obtenus des relations satisfaisantes pour les CWSI "théorique" et "mesuré" du traitement Modéré (Fig. N°III.33) :

Les équations de régression " linéaire " obtenues sont :

$$- \text{CWSI}_{\text{théorique}} : \text{CWSI}_t = -2.3865 \times \frac{\text{ETR}}{\text{ETM}} + 2.0073 \quad (R^2 = 0.776) \dots \dots (III.5)$$

$$- \text{CWSI}_{\text{mesuré}} : \text{CWSI}_m = -2.8172 \times \frac{\text{ETR}}{\text{ETM}} + 2.3522 \quad (R^2 = 0.781) \dots \dots (III.6)$$

Figure N° III.33 : Relation entre les CWSI théorique et mesuré et le rapport ETR/ETM (MOD 2000)

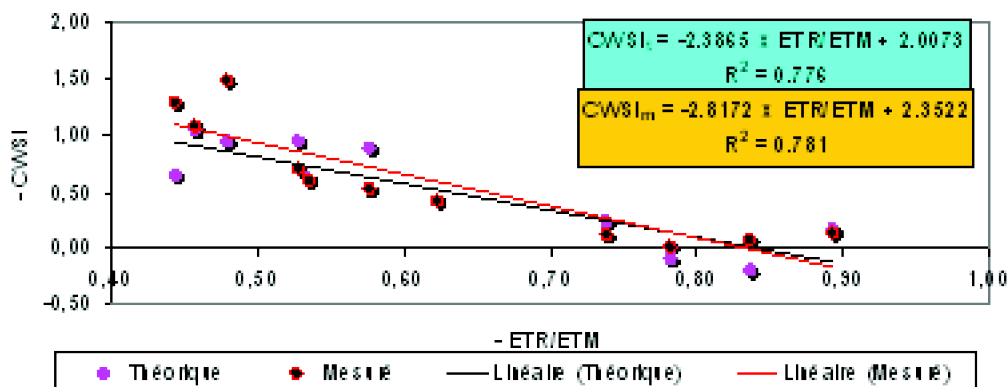


Figure N° III.33 : Relation entre les CWSI théorique et mesuré et le rapport ETR/ETM

(MOD 2000)

Les tableaux N°III.4 et N°III.5 suivants montrent les analyses de variances des regressions pour respectivement les CWSI théorique et mesuré en fonction du rapport ETR/ETM et confirment donc la validité des équations obtenues :

Tableau N° III.4 : Analyse statistique de la régression " CWSI mesuré – ETR/ETM

Paramètre	Estimation	Ecart Type	R <sup>2</sup>	Probabilité	Test
Pente	-2.8171	0.4967	-	0.0003	THS
Ordonnée	2.3522	0.3206	-	0.0000	THS
Modèle	-	0.2516	0.781	0.0003	THS

Tableau N° III.5 : Analyse statistique de la régression " CWSI estimé – ETR/ETM

Paramètre	Estimation	Ecart Type	R <sup>2</sup>	Probabilité	Test
Pente	-2.3865	0.4275	-	0.0003	THS
Ordonnée	2.0073	0.2759	-	0.0000	THS
Modèle	-	0.2165	0.776	0.0003	THS

### 2.1.- Traitement Sévère 2000

Pour ce qui concerne la relation " CWSI – ETR/ETM " du traitement Sévère, seule la relation entre le CWSI "mesuré" et le rapport ETR/ETM s'est avéré acceptable ( Fig.N° III.34 et Tableau N° III.6) :

$$- \text{CWSI}_{\text{mesuré}} : \text{CWSI}_m = -0.7624 \times \frac{\text{ETR}}{\text{ETM}} + 1.1457 \quad (R^2 = 0.787) \dots \dots \dots (\text{II } 7)$$

Figure N° III.34 : Relation entre les CWSI théorique et mesuré et le rapport ETR/ETM (SEV 2000)

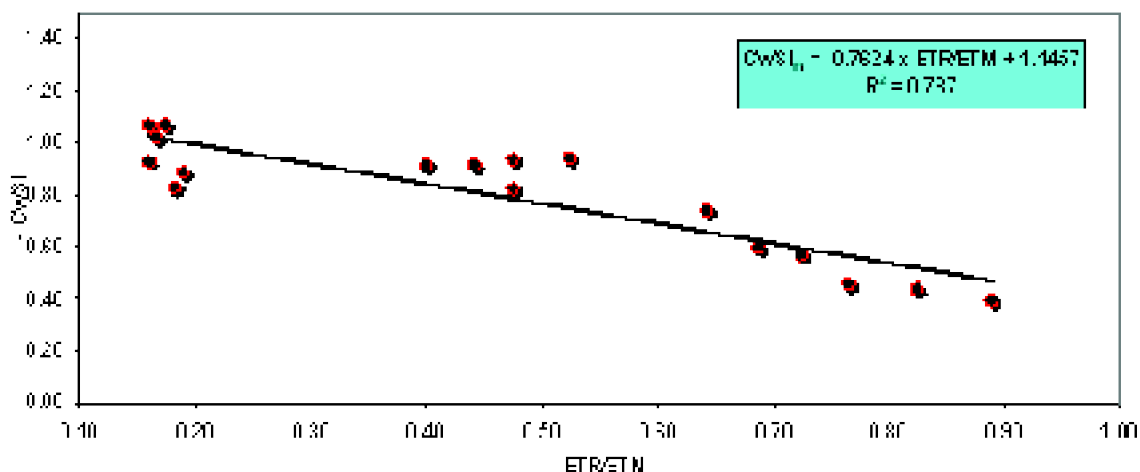


Figure N° III.34 : Relation entre les CWSI théorique et mesuré et le rapport ETR/ETM (SEV 2000)

Le tableau N° III.6 suivant résume les résultats de l'analyse statistique de la régression qui vient confirmer qu'il s'agit d'un modèle acceptable eu égard aux probabilités toutes inférieures au seuil de 5% montrant ainsi une très haute signification

de la relation entre le CWSI mesuré et le rythme de consommation ETR/ETM :

**Tableau N° III.6 : Analyse statistique de la régression " CWSI mesuré – ETR/ETM**

Paramètre	Estimation	Ecart Type	R <sup>2</sup>	Probabilité	Test
Pente	-0.7624	0.1025	-	0.0003	THS
Ordonnée	1.1457	0.0540	-	0.0000	THS
Modèle	-	0.1061	0.787	0.0003	THS

### 3.- Pertinence du CWSI à détecter un stress hydrique

Afin de tester la pertinence du CWSI comme indicateur de stress hydrique et donc de juger de sa fiabilité à être utilisé en tant qu'outil de pilotage des irrigations, nous allons ici faire un parallèle avec le taux de tarissement de la réserve en eau du sol que nous calculons comme suit :

$$T_x T = \frac{R_{cc} - R_{act}}{R_{cc}} = 1 - \frac{R_{act}}{R_{cc}} \dots\dots\dots (III. 8)$$

Avec :

TxT : Taux de tarissement de la réserve

Rcc : Réserve à capacité en champs

Ract : Réserve actuelle

La figures N° III.35 et N° III.36 suivantes montrent respectivement les régressions réalisées entre le CWSI et le taux de tarissement de la réserve en eau du sol, respectivement pour les traitements Modéré et Sévère de l'essai 2000 pour lesquels on a procédé aux calculs des CWSI.

Il faut noter que les régressions ont été réalisées seulement pour les valeurs de CWSI supérieurs à 0.

Les tableaux statistiques des deux régressions (Tableaux N°III.8 et N° III.9) montrent bien qu'il existe une corrélation significative entre le CWSI et le taux d'épuisement de la réserve hydrique, ce qui permet de conclure que le CWSI est une approche fiable pour détecter un stress hydrique et par conséquent pouvant être utilisé comme moyen de piloter les irrigations. C'est ce qui rejoint les recommandations des différents travaux de recherche effectués dans ce domaine.

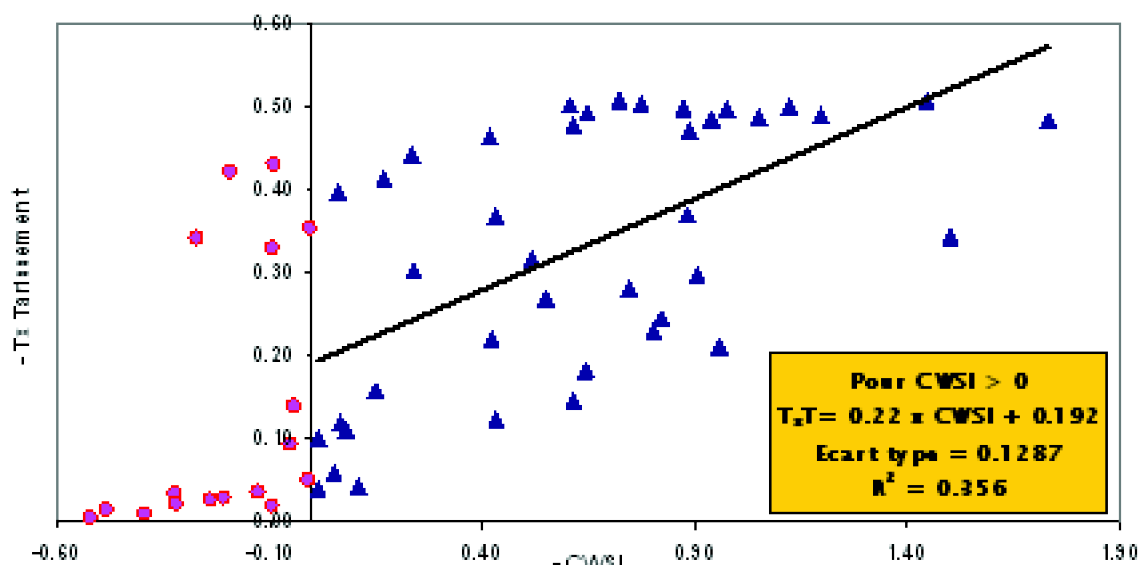


Figure N° III.35 : Relation entre le taux de tarissement de la réserve en eau du sol et le CWSI (MOD 2000)

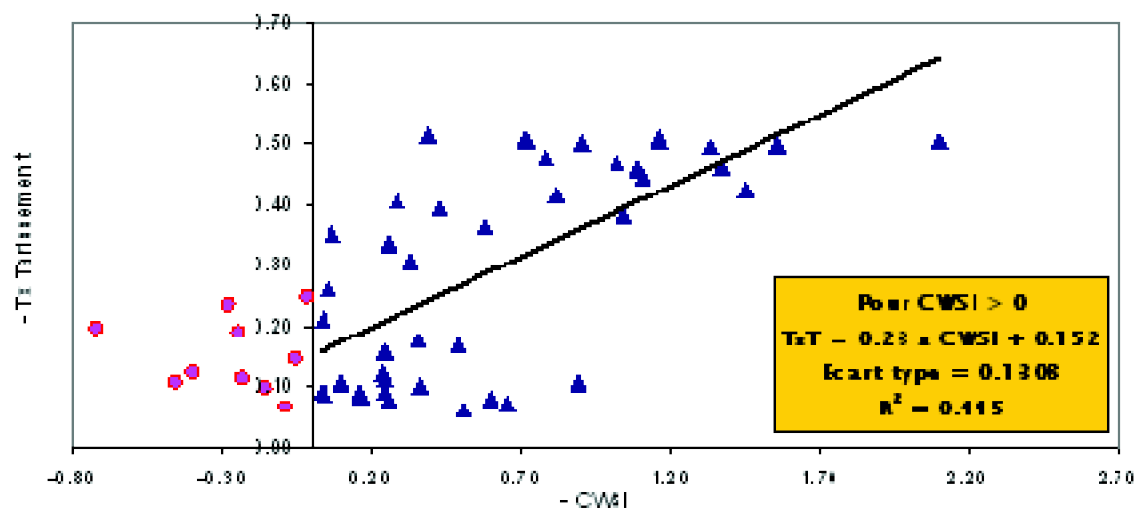


Figure N° III.36 : Relation entre le taux de tarissement de la réserve en eau du sol et le CWSI (SEV 2000)

Tableau N°III.7 : Analyse de variance – Régression CWSI en fonction taux tarissement réserve (Traitement Modéré)

Paramètre	Estimation	Ecart Type	R <sup>2</sup>	Probabilité	Test
Pente	0.2196	0.0473	-	0.0000	THS
Ordonnée	0.1915	0.0364	-	0.0000	THS
Modèle	-	0.1287	0.356	0.0000	THS

Tableau N°III.8 : Analyse de variance – Régression CWSI en fonction taux tarissement réserve (Traitement Sévère)

## Cinétique de quelques paramètres physiologiques du blé dur *triticum durum* (variété vitron) sous contrainte hydrique dans la plaine de la Mitidja

Paramètre	Estimation	Ecart Type	R <sup>2</sup>	Probabilité	Test
Pente	0.2329	0.0411	-	0.0000	THS
Ordonnée	0.1516	0.0327	-	0.0000	THS
Modèle	-	0.1308	0.445	0.0000	THS

Les deux ajustements ont donné lieu à deux modèles dont les coefficients sont presque identiques et se rapprochent de ceux données dans la littérature. Nous résumons dans le tableau N° III.10 suivant les paramètres de corrélation obtenus :

Source	Pente	Ordonnée Origine	R <sup>2</sup>	ET
Traitement Modéré, INA 2000	0.22	0.192	0.356	0.1287
Traitement Sévère, INA 2000	0.23	0.152	0.445	0.1308
E.M. Barnes et al. , Madison 2000	0.23	0.420	0.390	0.0800
Coefficient de Variation, %	2.50	56.80		

Ce tableau montre clairement :

Une presque égalité des pentes ( Cv = 2.5 % )

Des différences pas très importantes entre les ordonnées à l'origine (Cv = 56.8 % )

### III.2.- Indice foliaire "LAI"

L'indice foliaire caractérise la surface photosynthétiquement active de la culture (feuilles vertes).

Les mesures ont débuté lorsque la culture a complètement recouvert le sol (65ème et 63ème J.A.S. respectivement pour l'essai 2000 et 2001), jusqu'à la sénescence des plantes.

#### III.2.1.- Essai 2000

##### a.- Traitement ETM

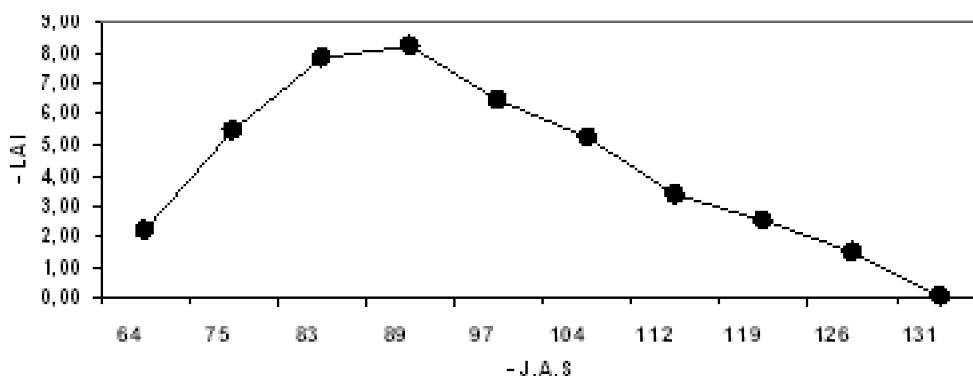


Figure N° III.37 : Evolution de l'indice foliaire LAI (ETM 2000)

La figure N° III.37 montre l'évolution de l'indice foliaire du traitement irrigué. Le LAI augmente avec la croissance végétative de la culture et atteint son seuil maximal de 8,21

le 26/03/2000 et diminue progressivement avec la sénescence de la culture.

#### b.- Traitement MOD

L'évolution de l'indice foliaire du traitement modéré est similaire à celle du traitement irrigué avec une valeur maximale de 6,71 le 26/03/2000.

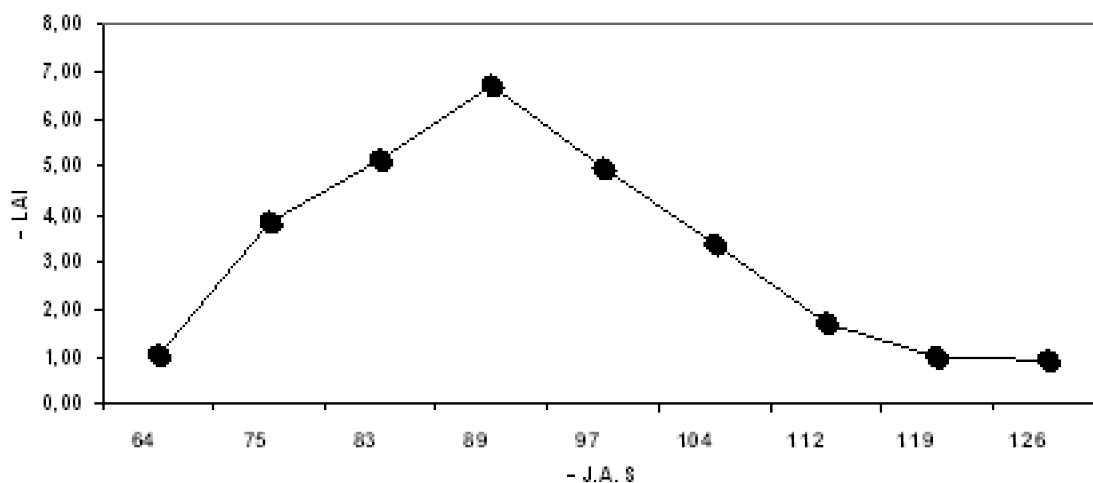


Figure N° III.38 : Evolution de l'indice foliaire LAI (MOD 2000)

#### c.- Traitement SEV

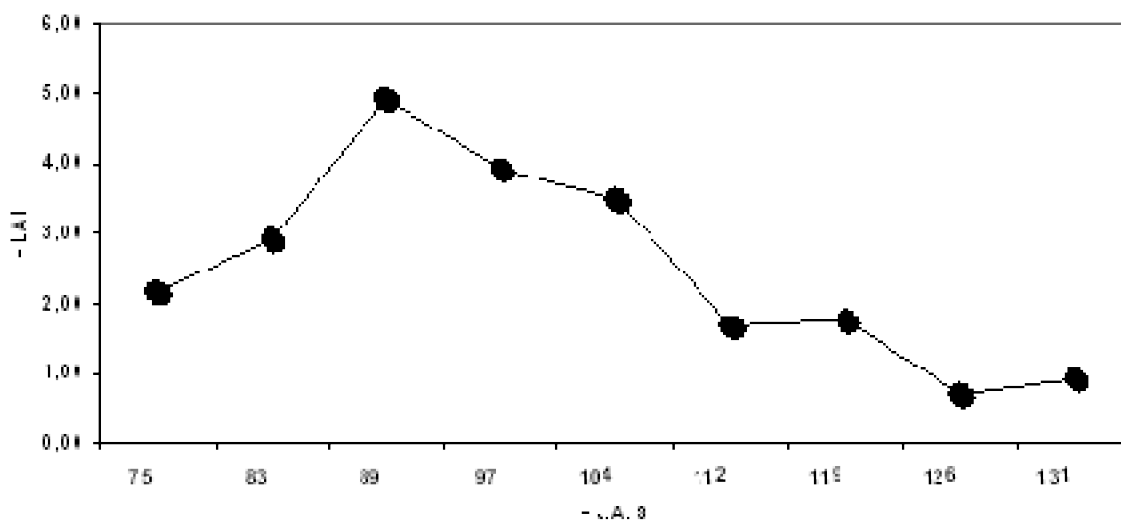


Figure N° III.39 : Evolution de l'indice foliaire LAI (SEV 2000)

Une irrigation apportée le 28/03/2000 pour le traitement sévère a eu un effet sur la reprise de croissance ce qui améliore le développement du LAI, et atteint une valeur maximale de 4,92 le 26/03/2000.

#### d.- Traitement PLU

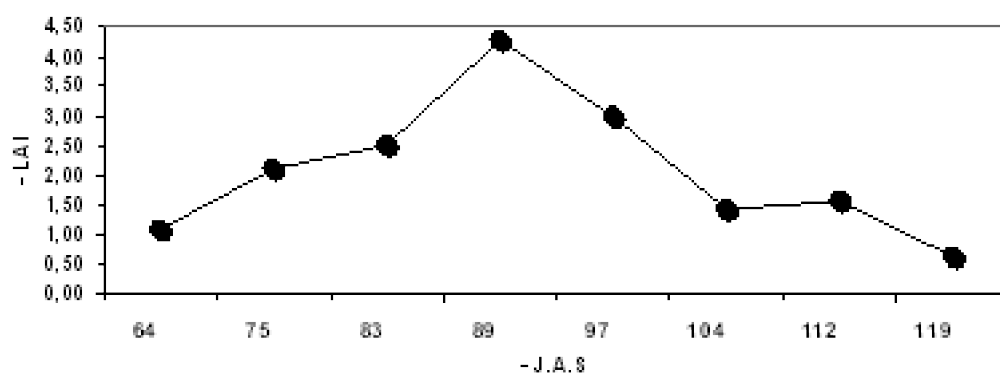


Figure N° III.40 : Evolution de l'indice foliaire LAI (PLU 2000)

Pour le traitement pluvial la valeur maximale est de 4,27 le 26/03/2000. c'est la valeur la plus basse par rapport aux autres traitements, ce qui montre que ce traitement a souffert d'un stress hydrique.

**e.- Effet des traitements hydriques sur l'indice foliaire :**

Le graphique N° III.41 suivant résume les LAI pour tous les traitements hydriques :

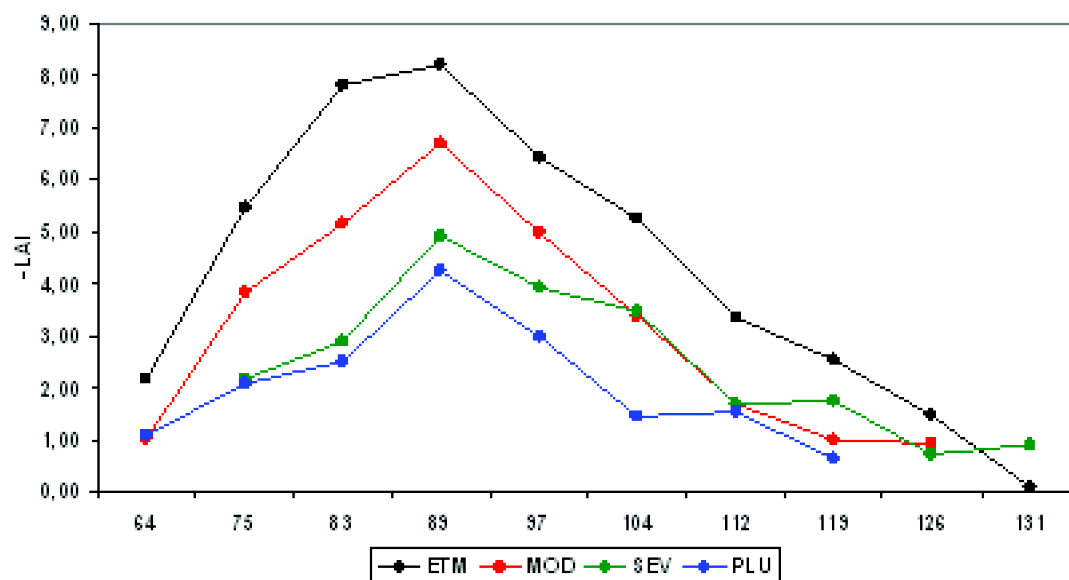


Figure N° III.41 : Effet des traitements hydriques sur la LAI (Essai 2000)

Le graphique montre que le LAI augmente du traitement sec vers celui plus irrigué. Ceci montre clairement l'effet d'un stress sur la réduction de la croissance à travers le LAI. Les LAI maxima obtenus pour chaque traitement témoignent justement de l'effet du stress hydrique :

- ETM : LAI<sub>max</sub> = 8.2
- MOD : LAI<sub>max</sub> = 6.7
- SEV : LAI<sub>max</sub> = 4.9
- PLU : LAI<sub>max</sub> = 4.3

Pour confirmer ce résultat, nous avons réalisé une analyse de variance sur les valeurs



des LAI avec comme facteur le " traitement hydrique " ayant quatre niveaux (ETM, MOD, SEV et PLU). Nous rappelons que le dispositif expérimental comprenait trois blocs (voir matériels et méthodes) et que le test adopté pour la comparaison des moyennes est le LSD (least square différence) . Les calculs ont été réalisés à l'aide du Logiciel STATGRAPHICS version 5.1.

L'analyse a donné lieu aux résultats regroupés dans le tableau N°III.10 suivant :

**Tableau N°III.10 : Analyse de variance du LAI – Essai 2000**

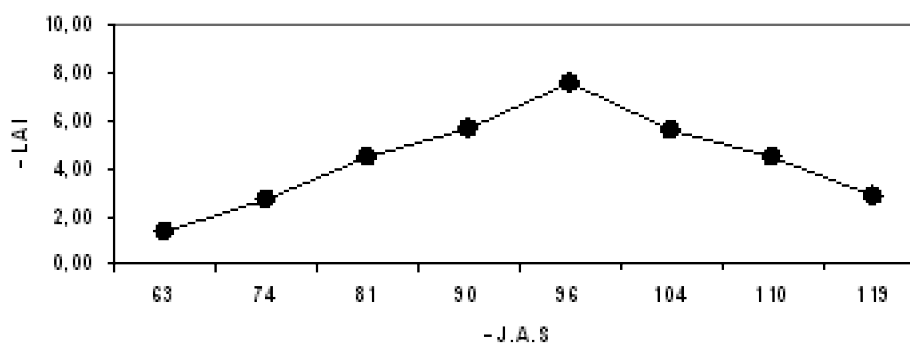
Probabilité p	Traitement	Moyenne	Groupe
	PLU	2.16	A
0.0001	SEV	3.65	B
	MOD	4.99	C
	ETM	6.07	D

La probabilité  $p = 0.0001$  très largement inférieure au seuil habituel de 5 % montre que l'effet traitement est " très hautement significatif ". Le test LSD affecte les traitements dans des groupes distincts A, B, C et D.

### III.2.2.- Essai 2001

Les graphiques N° III.42, N° III.43, N° III.44 et N° III.45 montrent les évolutions des LAI pour les traitements ETM, MOD, SEV et PLU.

#### a.- Traitement ETM



**Figure N° III.42 : Evolution de l'indice foliaire LAI (ETM 2001)**

#### b.- Traitement MOD

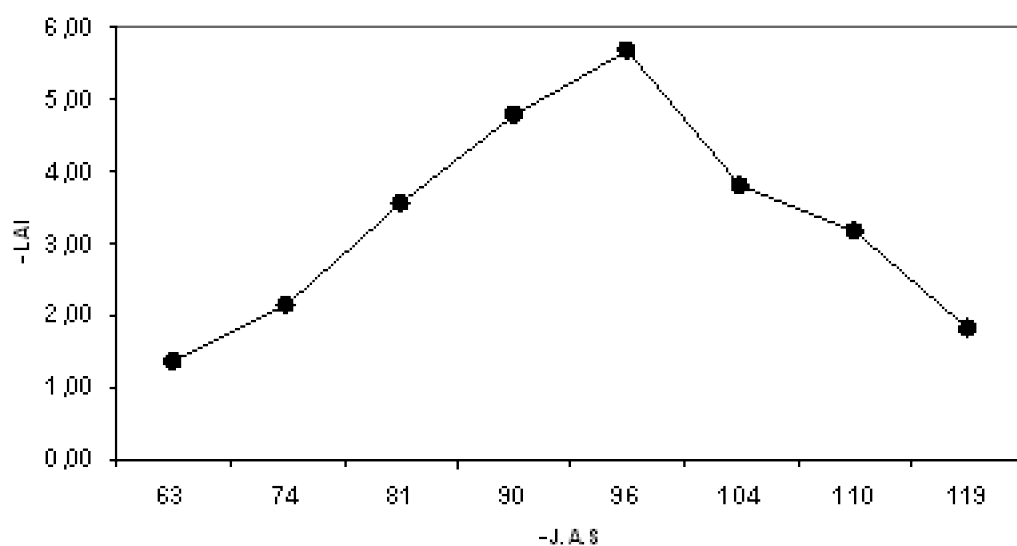


Figure N° III.43 : Evolution de l'indice foliaire LAI (MOD 2001)

c.- Traitement SEV

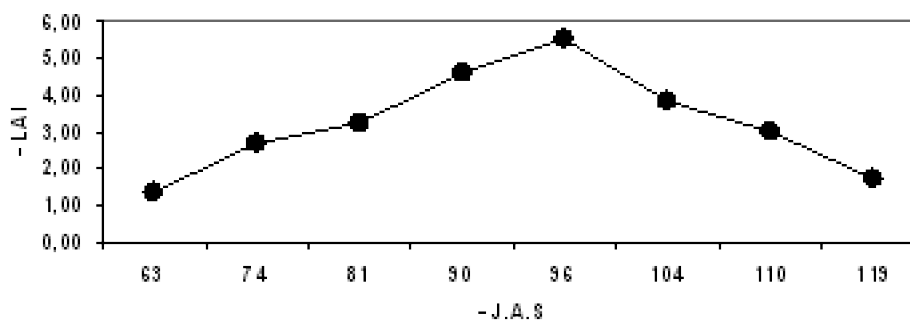


Figure N° III.44 : Evolution de l'indice foliaire LAI (SEV 2001)

d.- Traitement PLU

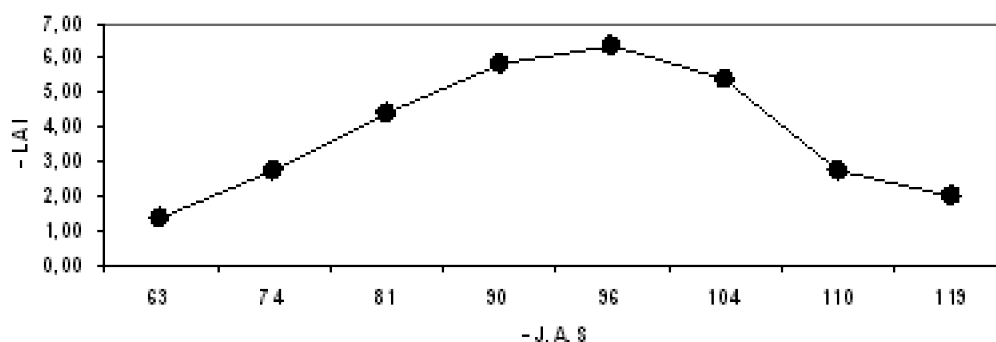
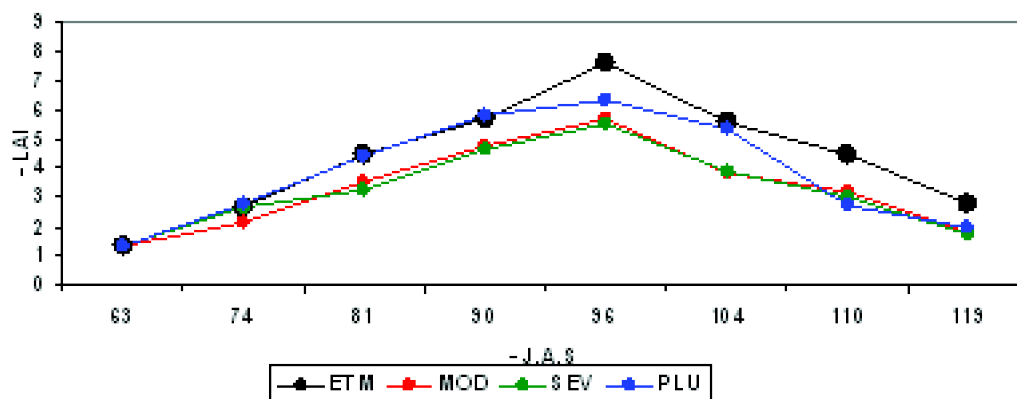


Figure N° III.45 : Evolution de l'indice foliaire LAI (PLU 2001)

Concernant les figures précédentes, on remarque que l'indice foliaire évolue au même rythme avec des valeurs maximales de 7.62, 5.7, 5.5 et 6.35 respectivement pour les traitements ETM, MOD, SEV et PLU. La valeur du LAI pour le traitement PLU est nettement supérieure à celles de l'essai 2000 en raison d'apports pluviométriques importants en 2001.

e.- Effet des traitements hydriques sur l'indice foliaire

Nous avons regroupé en figure N° III.46 les indices foliaires des différents traitements hydriques dans un but comparatif afin d'étudier l'effet des irrigations sur la croissance par le biais du Lai :



**Figure N° III.46 : Effet des traitements hydriques sur la LAI (Essai 2001)**

Nous remarquons que le LAI du traitement ETM semble être le plus important. Les LAI des traitements MOD et SEV sont pratiquement confondus tandis que celui du traitement PLU s'intercale entre eux, ce qui semble ne pas concorder avec la réalité et n'obéit pas à l'évolution des réserves discutée précédemment. Ceci est peut être du à des imprécisions dans les mesures du LAI (technique de mesure manuelle assez aléatoire ...).

Nous présentons dans le tableau N° III.11 les résultats de l'analyse de variance du LAI :

**Tableau N° III.11 : Analyse de variance du LAI – Essai 2001**

Probabilité p	Traitement	Moyenne	Groupe
0.1918	PLU	4.21	A
	SEV	3.53	A
	MOD	3.57	A
	ETM	4.76	A

Cette analyse confirme bien que, pour l'essai 2001, les LAI ne semblent pas répondre à la même tendance observée pour l'essai 2000. On voit bien que le test statistique ne révèle aucune différence significative des LAI moyens.

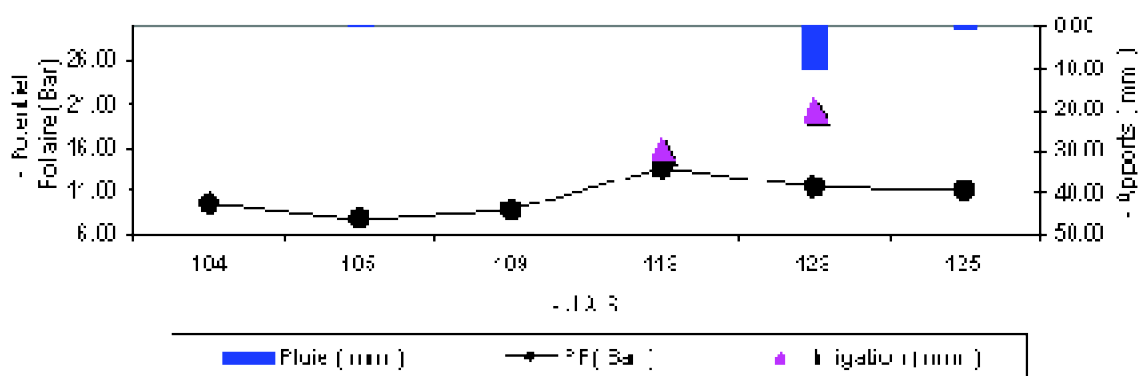
### III.3.- Potentiel foliaire

En ce qui concerne le potentiel foliaire nous ne présentons ici que les résultats de l'essai 2001 ayant fait l'objet de mesures des potentiels foliaires.

#### III.3.1.- Essai 2001

##### a.- Traitement ETM

**Cinétique de quelques paramètres physiologiques du blé dur *triticum durum* (variété vitron) sous contrainte hydrique dans la plaine de la Mitidja**

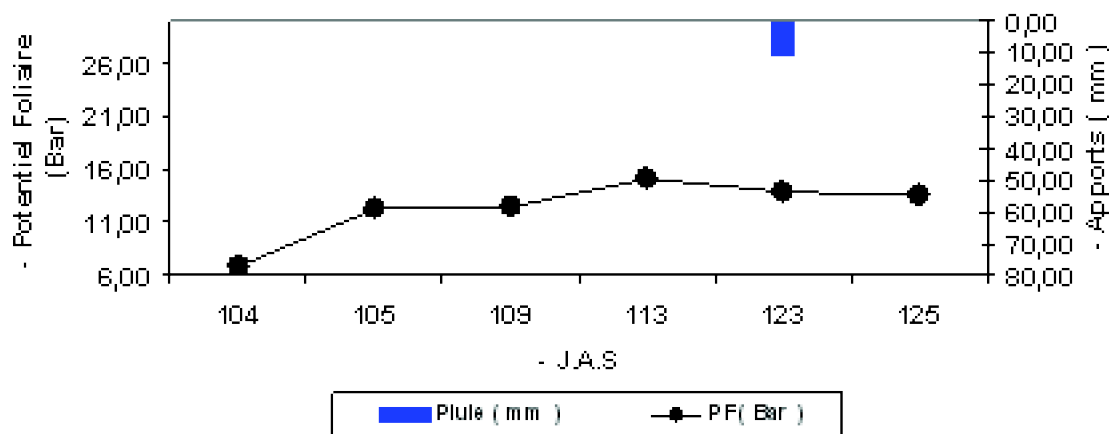


**Figure N° III.47 : Potentiel foliaire (ETM 2001)**

On constate que l'évolution du potentiel foliaire pour le traitement irrigué diminue à chaque fois qu'il y'a un apport d'eau. Sa valeur oscille entre 7.67 Bar (105ème J.A.S.) et 13.65 Bar (113ème J.A.S.)

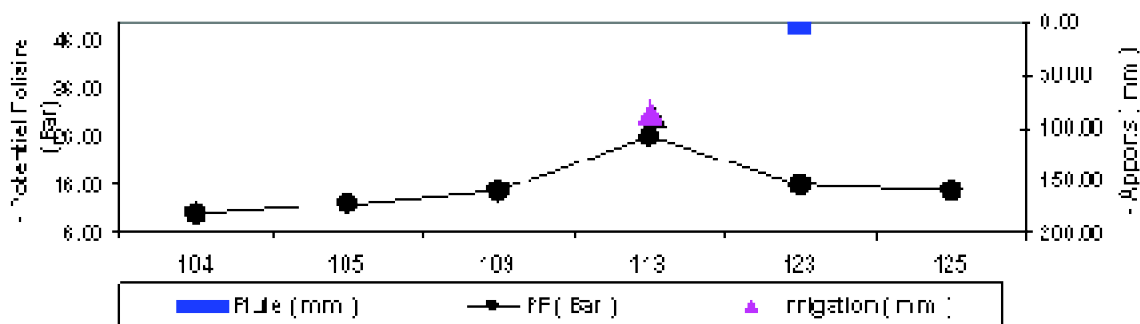
**b.- Traitement MOD**

La figure N° III.48 montre une augmentation du potentiel foliaire du 104ème (7.0 Bar) au 113ème J.A.S (15.0 Bar). La pluie de 11.0 mm au 23ème J.A.S. entraîne une faible diminution du potentiel qui se stabilise autour de la valeur de 13.5 Bar.



**Figure N° III.48 : Potentiel foliaire (MOD 2001)**

**c.- Traitement SEV**



**Figure N° III.49 : Potentiel foliaire (SEV 2001)**

La figure N° III.49 montre que l'évolution du potentiel foliaire présente d'abord une phase croissante de 10 jusqu'à une valeur maximale de 26 Bar. Ensuite, une irrigation de

85 mm au 113ème J.A.S ainsi qu'une pluie de 10mm au 123ème J.A.S ont été assez importantes pour faire chuter le potentiel foliaire jusqu'à la valeur de 14.8 Bar.

#### d.- Traitement PLU

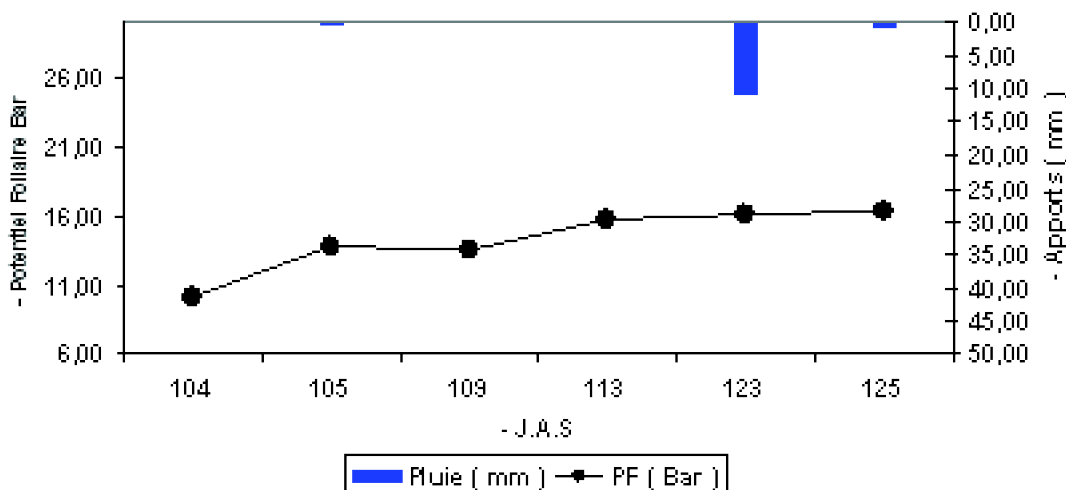


Figure N° III.50 : Potentiel foliaire (PLU 2001)

On remarque qu'une pluie survenue le 105ème J.A.S. (stade épiaison) a été suffisante pour faire descendre le potentiel foliaire de la valeur maximale de 17 Bar à 12 Bar le 109ème J.A.S. Ensuite, on note une stabilisation du potentiel autour de la valeur de 16 Bar même avec la pluie de 11 mm au 123ème J.A.S (stade grain laitex).

Sur ce point, on peut conclure que si une pluie, même faible, survient à un stade végétatif sensible, elle peut influencer le potentiel foliaire. D'autre part, une pluie abondante n'aura pratiquement pas d'effet notable sur le potentiel foliaire si elle arrive à un stade pendant laquelle le stress s'avère irréversible.

#### e.- Comparaison " Irrigué – Pluvial " :

Le graphique N° III.51 ci-dessous montre une comparaison entre les potentiels foliaires obtenus pour les traitements extrêmes en l'occurrence celui irrigué ( ETM ) et pluvial ( PLU ).

On note tout d'abord que les graphiques évoluent en augmentant pratiquement dans le même sens quoique les variations du potentiel pour le trait ETM sont plus importantes en raison des irrigations.

On remarque ensuite que le potentiel foliaire est plus important pour le traitement pluvial en raison du stress hydrique. Les écarts entre les potentiels des deux traitements varient entre 0.7 et 6.1 Bar. Les valeurs maximales atteintes par les traitements ETM et PLU sont respectivement de 13.65 et 16.40 Bar.

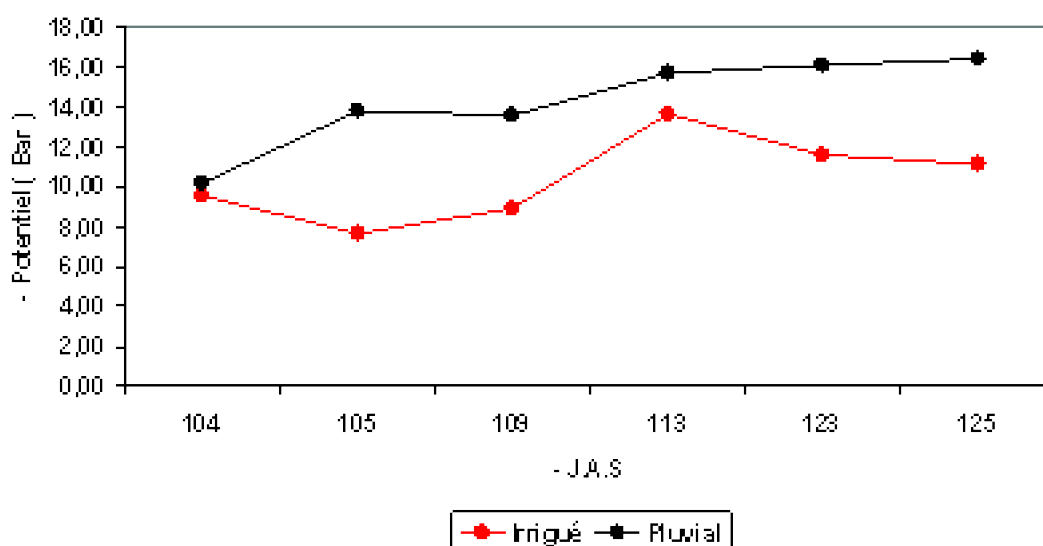


Figure N° III.51 : Effet des traitements hydriques sur le potentiel foliaire (Essai 2001)

### III.4.- Teneur en eau relative "RWC"

#### III.4.1.- Essai 2000

##### a.- Traitement ETM

On remarque que d'après les figures N° III.52, N° III.53, N° III.54 et N° III.55 que les teneurs en eau relative mesurées varient d'une manière très prononcée entre les traitements. Ces teneurs sont fortement diminuées pendant les périodes sèches et cela à des degrés différents.

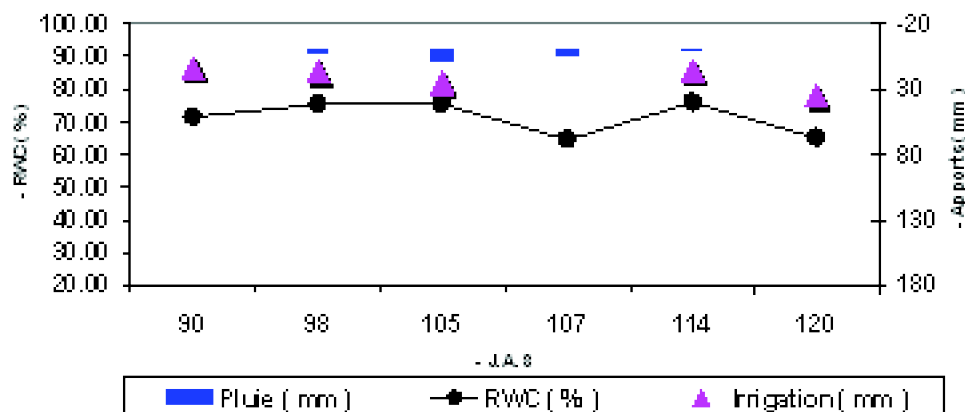


Figure N° III.52 : Teneur en eau relative RWC (ETM 2000)

On remarque que pour le traitement ETM que l'irrigation quotidienne a pratiquement maintenue le RWC à la même valeur qui est au tour de 75%.

##### b.- Traitement MOD

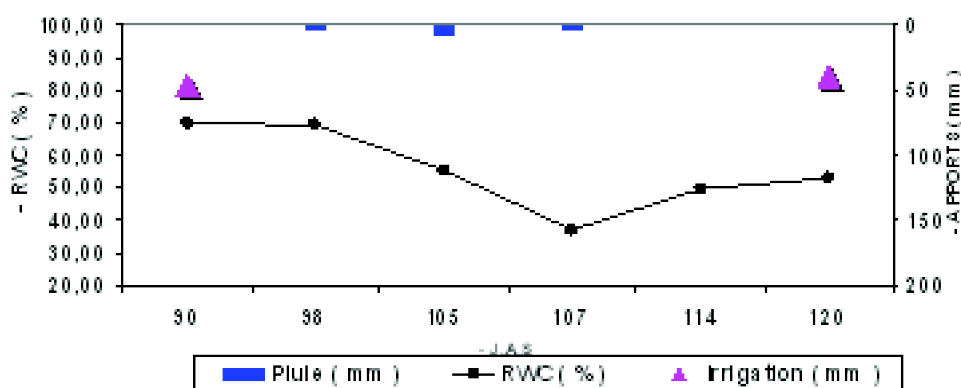


Figure N° III.53 : Teneur en eau relative RWC (MOD 2000)

Ce graphique Fig. N° III.53 montre qu'une irrigation au début du stade végétative a maintenue le RWC à la valeur 69%, alors que les pluies n'ont pas été assez suffisante pour maintenir le RWC à la même valeur et a diminué jusqu'à atteindre la valeur minimale de 37,36 % le 107 J.A.S.

**c.- Traitement SEV**

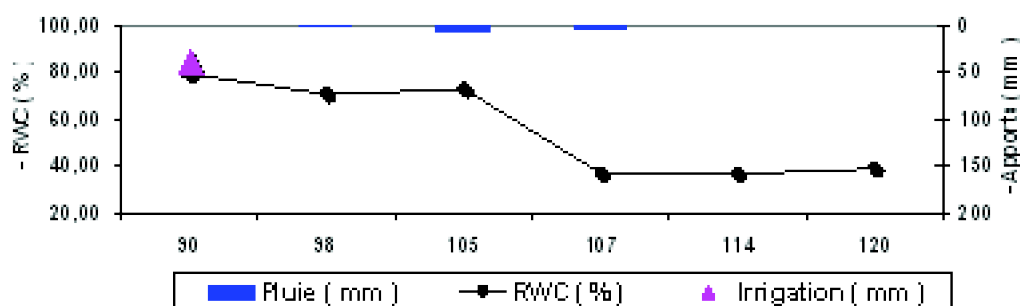


Figure N° III.54 : Teneur en eau relative RWC (SEV 2000)

On note que pour le traitement SEV la teneur relative en eau oscille entre 79,37 % le 90 J.A.S. et 36,35 % 107 J.A.S.

**d.- Traitement PLU**

On remarque que pour ce traitement PLU fig. N°III.55 la teneur relative en eau diminue de la valeur 70,41 % le 90ème J.A.S. jusqu'à atteindre la valeur minimale de 42 % le 120ème J.A.S.

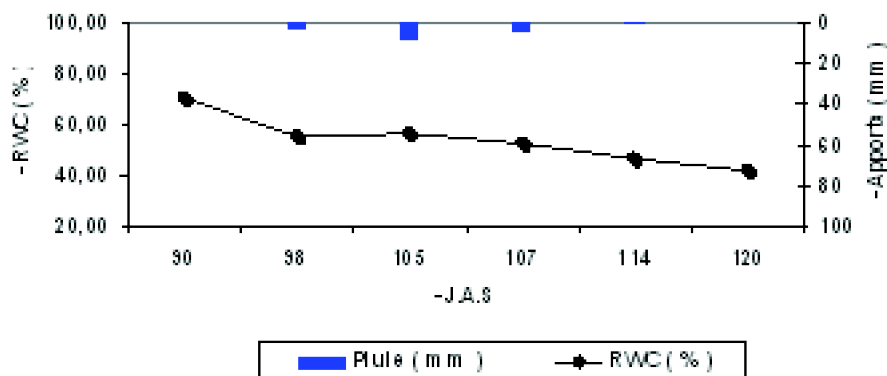
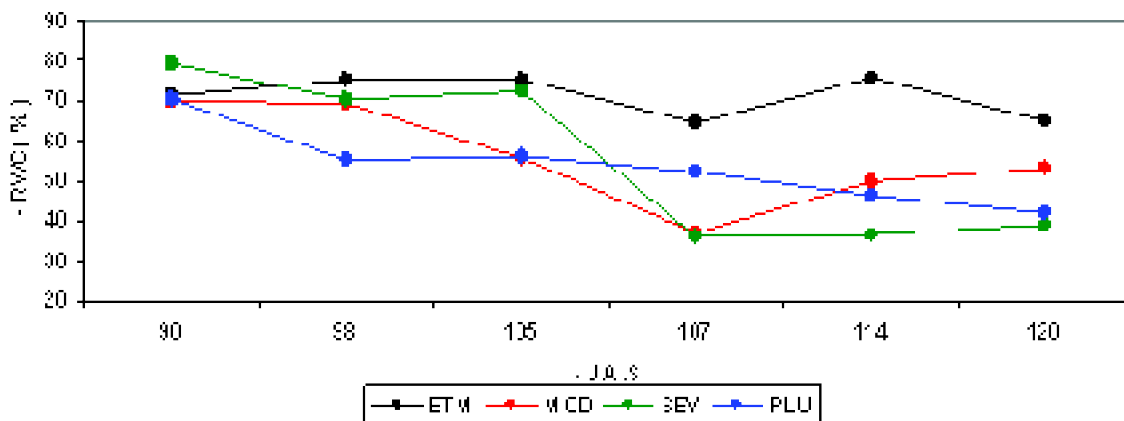


Figure N° III.55 : Teneur en eau relative RWC (PLU 2000)

**e.- Effet traitements hydriques :**

Afin de tester l'effet des traitements hydriques sur la teneur en eau relative, nous récapitulons en figure N° III.56 les graphiques pour les quatre traitements :



**Figure N° III.56 : Effet des traitements hydriques sur la teneur en eau relative RWC (Essai 2000)**

Le graphique ne montre pas des différences claires entre les teneurs en eau relatives des traitements hydriques sauf peut être pour les valeurs correspondant au traitement irrigué ETM qui semblent être plus importantes par rapport à celles des autres traitements.

Le tableau N° III.12 suivant montre les résultats de l'analyse statistique sur les teneurs en eau relatives :

**Tableau N° III.12 : Analyse de variance de la Teneur en Eau Relative – Essai 2000**

Probabilité p	Traitement	Moyenne	Groupe
	SEV	47.64	A
0.2608	PLU	48.71	A
	MOD	48.97	A
	ETM	54.97	A

La probabilité  $p = 0.2608$  largement au dessus du seuil habituel de 5 % ainsi que le test LSD viennent confirmer effectivement qu'il n'existe pas de différences significatives entre les teneurs en eau relatives moyennes des quatre traitements hydriques .

**III.4.2.- Essai 2001**

On observe dans les figure N° III.57 et N° III.58 qu'à chaque fois qu'on apporte une irrigation la teneur en eau relative augmente pour atteindre une valeur maximale de 85% ET 81% pour respectivement les traitements ETM et MOD.

**a.- Traitement ETM**



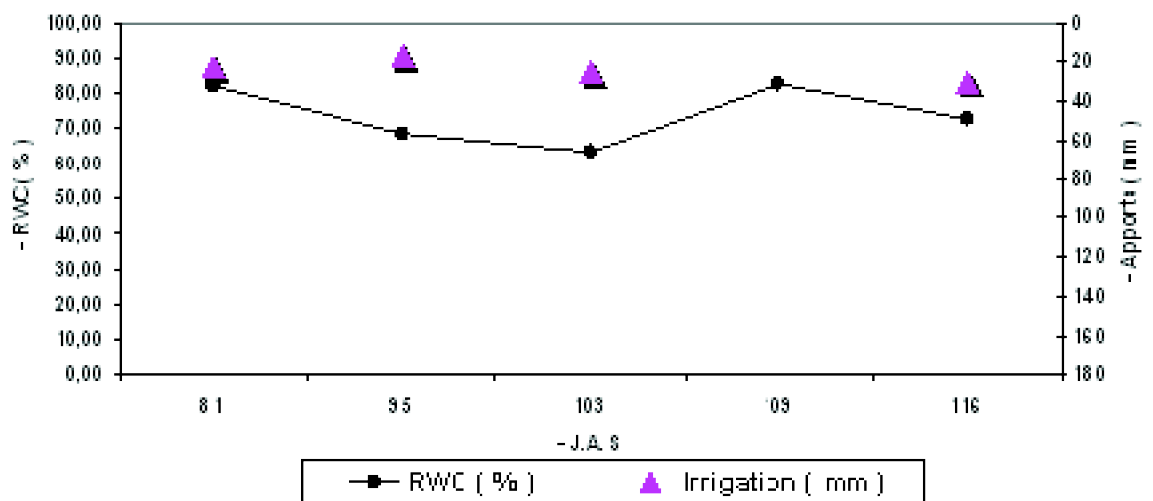


Figure N° III.57 : Teneur en eau relative RWC (ETM 2001)

b.- Traitement MOD

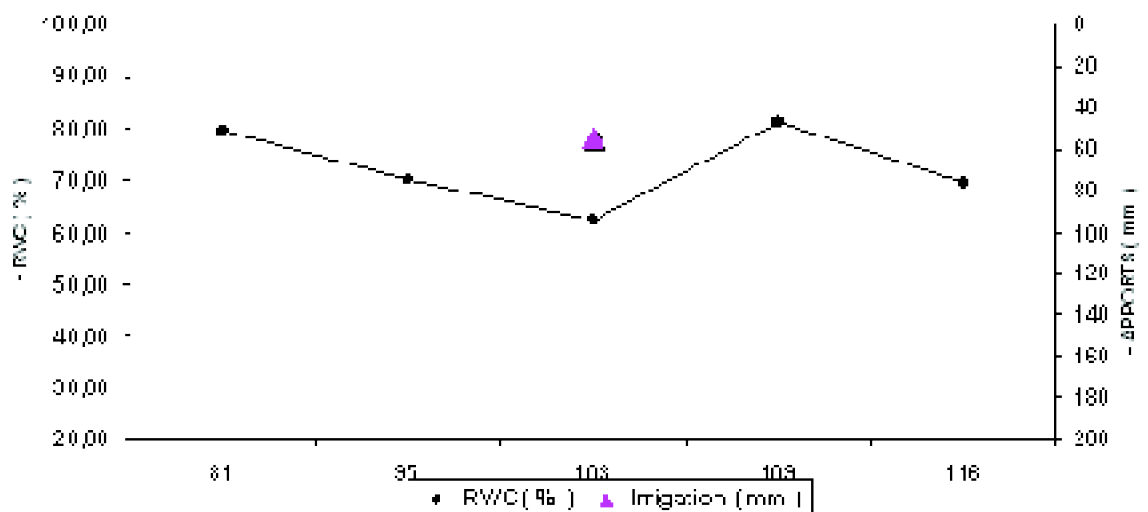


Figure N° III.58 : Teneur en eau relative RWC (MOD 2001)

c.- Traitement SEV

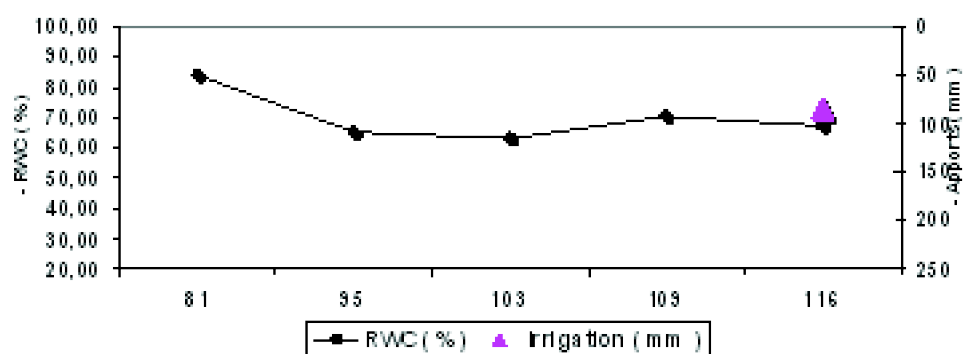


Figure N° III.59 : Teneur en eau relative RWC (SEV 2001)

d.- Traitement PLU

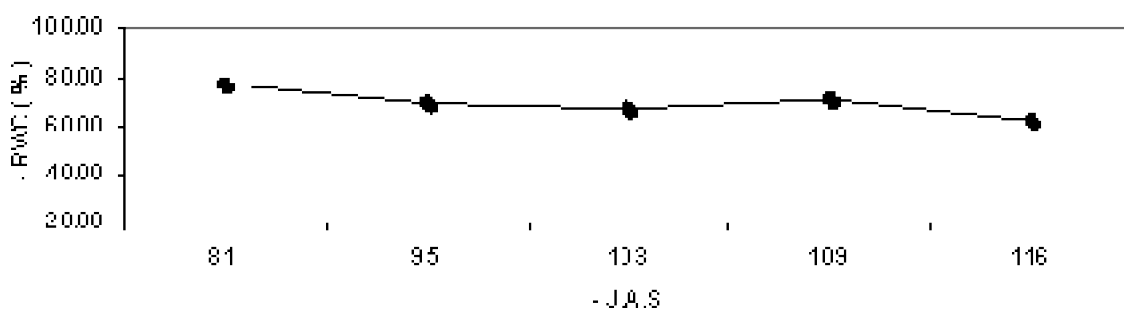


Figure N° III.60 : Teneur en eau relative RWC (PLU 2001)

En ce qui concerne les traitements Sévère et Pluvial, les figure N° III.59 et N° III.60 et montrent que les teneurs en eau relatives diminuent pendant le cycle végétatif de la culture. Ces teneurs ont fortement diminuées par les périodes sèches.

### III.5.- Proline et sucres

Il faut noter que ces deux paramètres n'ont été mesurés que pendant l'essai 2001.

Afin de calculer les taux de sucres et prolines, nous avons réalisé au préalable les courbes d'étalonnage correspondantes qui sont montées par les figures respectives N° III.61 et N° III.62 :

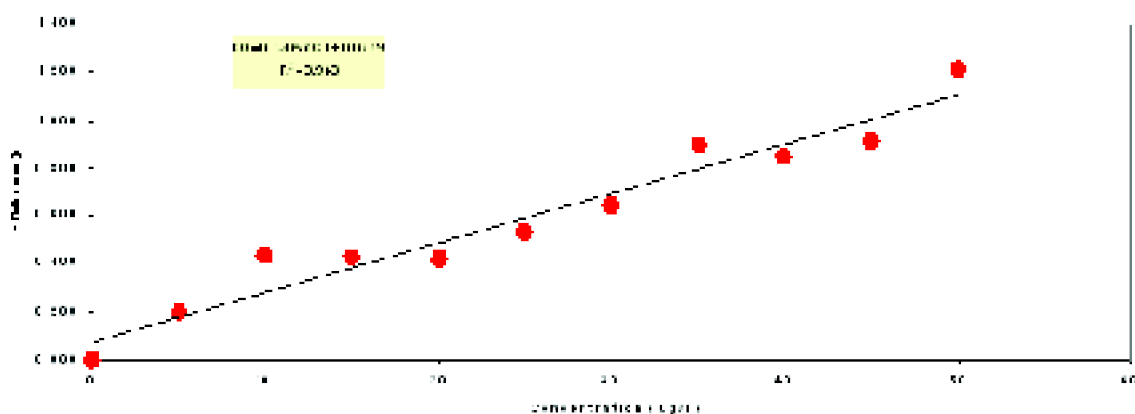


Figure N° III.61 : Courbe étalon sucre solubles totaux

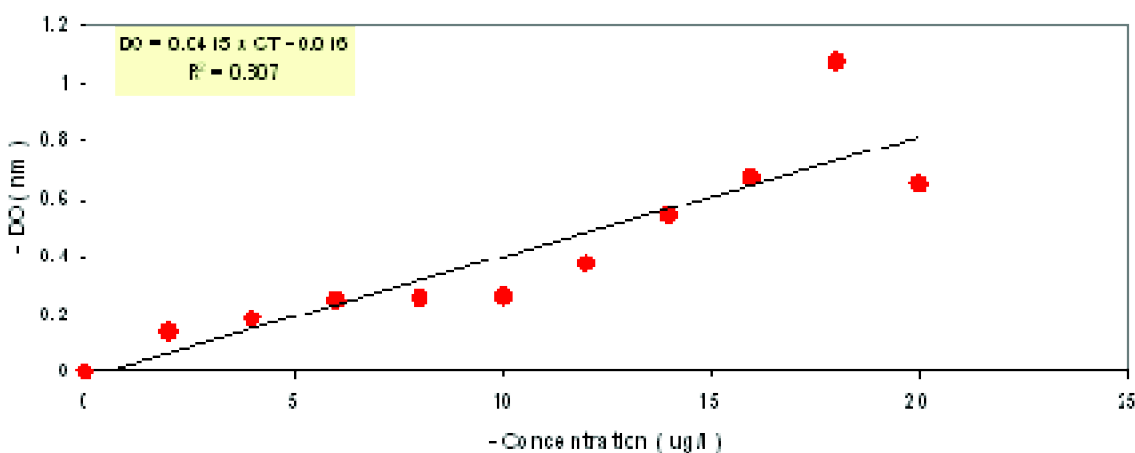


Figure N° III.62 : Courbe étalon proline

Les coefficients de détermination respectifs  $R^2 = 0.940$  et  $R^2 = 0.807$  permettent de conclure que les deux étalonnages sont donc satisfaisants et peuvent être utilisés dans les calculs appropriés.

### III.5.1- Proline

#### a.- Traitement ETM 2001

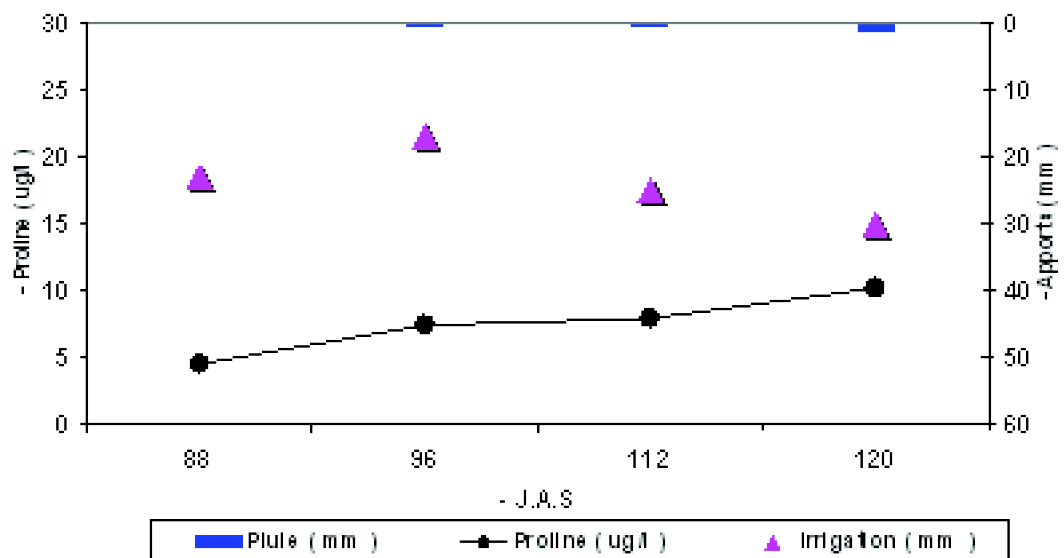


Figure N° III.63 : Concentration en proline (ETM 2001)

Pour le traitement irrigué, on remarque que la concentration en proline varie de la valeur  $4.6\mu\text{g/l}$  le 88ème J.A.S. à  $8.0\mu\text{g/l}$  le 120ème J.A.S. et que les irrigations apportées n'ont pas été assez suffisante pour diminuer cette concentration surtout pendant les périodes sèches.

#### b.- Traitement MOD 2001

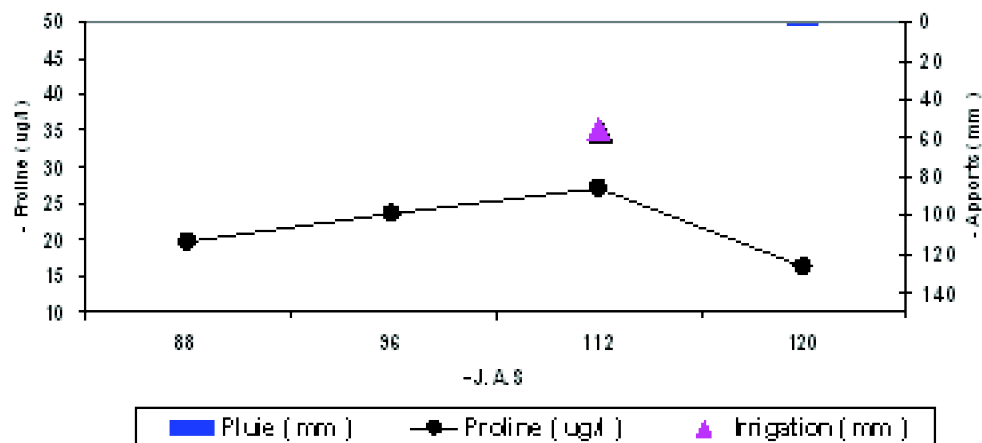
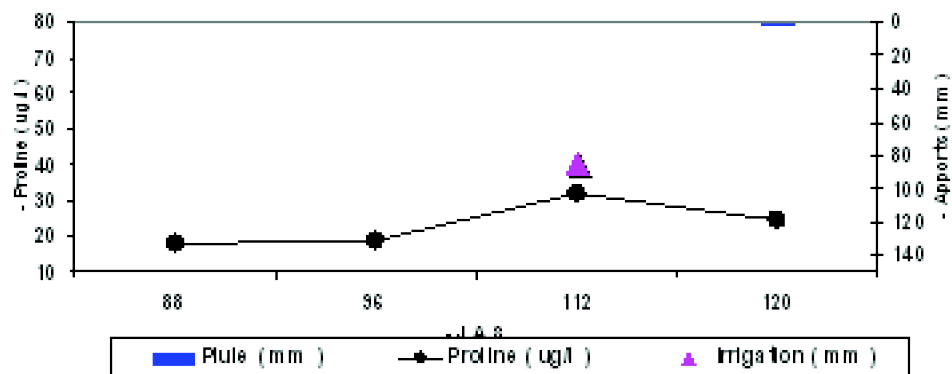


Figure N° III.64 : Concentration en proline (MOD 2001)

On remarque que pour le traitement MOD une irrigation apportée au 112ème J.A.S. a été largement suffisante pour diminuer la concentration en proline de la valeur  $27\mu\text{g/l}$  à la valeur  $16\mu\text{g/l}$ .

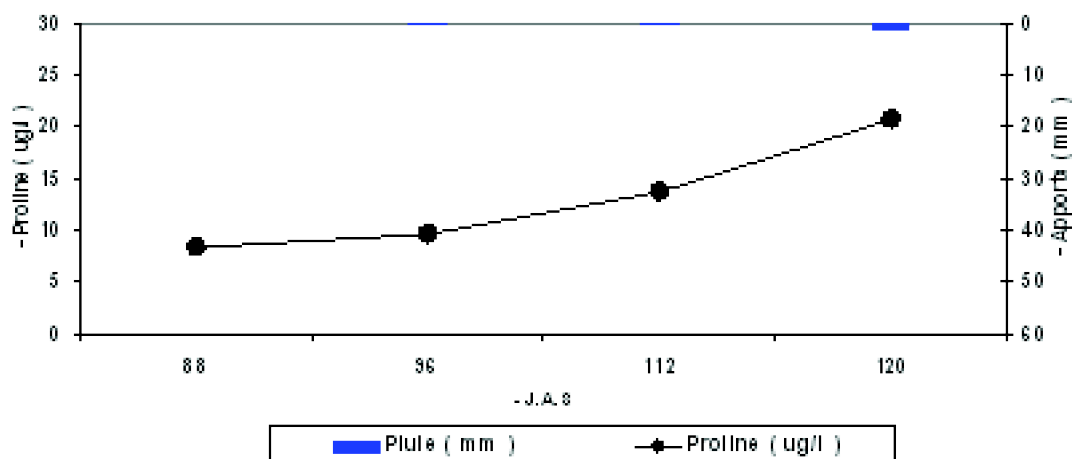
**c.- Traitement SEV 2001**



**Figure N° III.65 : Concentration en proline (SEV 2001)**

On remarque pour ce traitement SEV qu'une irrigation apportée le 112ème J.A.S. a entraîné une diminution de la concentration en proline de la valeur 30 µg/l à la valeur 25 µg/l le 120ème J.A.S.

**d.- Traitement PLU 2001**



**Figure N° III.66 : Concentration en proline (PLU 2001)**

La figure N° III.66 montre que la concentration en proline pour le traitement pluvial augmente de façon continue pendant le cycle végétatif de la culture. Cette augmentation est accentuée pendant les périodes sèches.

**III.5.2- Sucres**

**a.- Traitement ETM 2001**

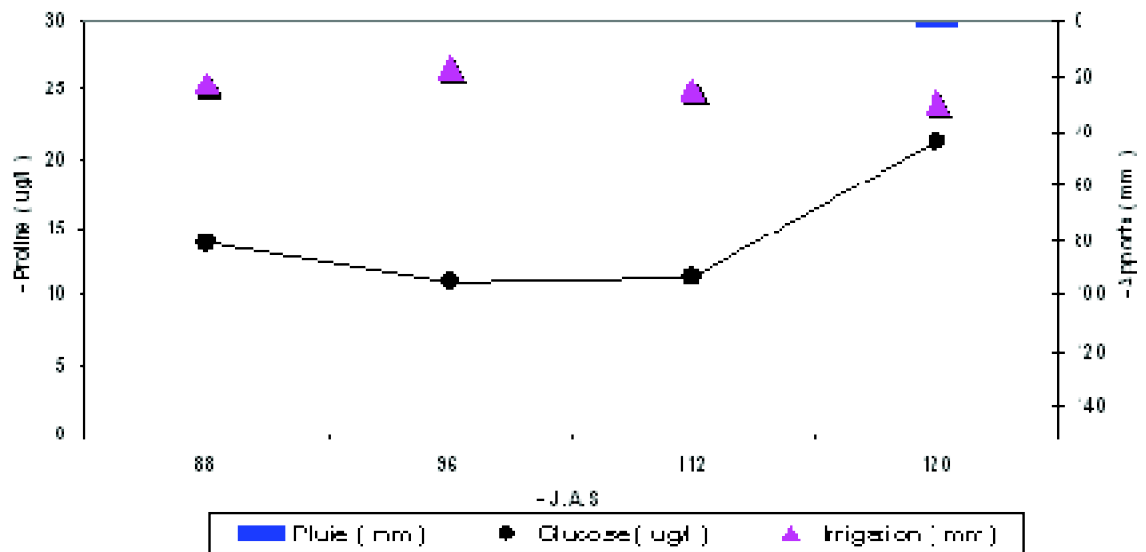


Figure N° III.67 : Concentration en sucres (ETM 2001)

La figure N° III.67 montre que pour le traitement irrigué les doses apportées n'ont pas été assez suffisantes pour stabiliser la concentration en sucre à un niveau bas.

**b.- Traitement MOD 2001**

On remarque que pour le traitement modéré (Fig. III.68) une irrigation apportée au milieu du cycle été suffisante pour diminuer la concentration en sucre de la valeur 15 µg/l à la valeur 12.5 µg/l.

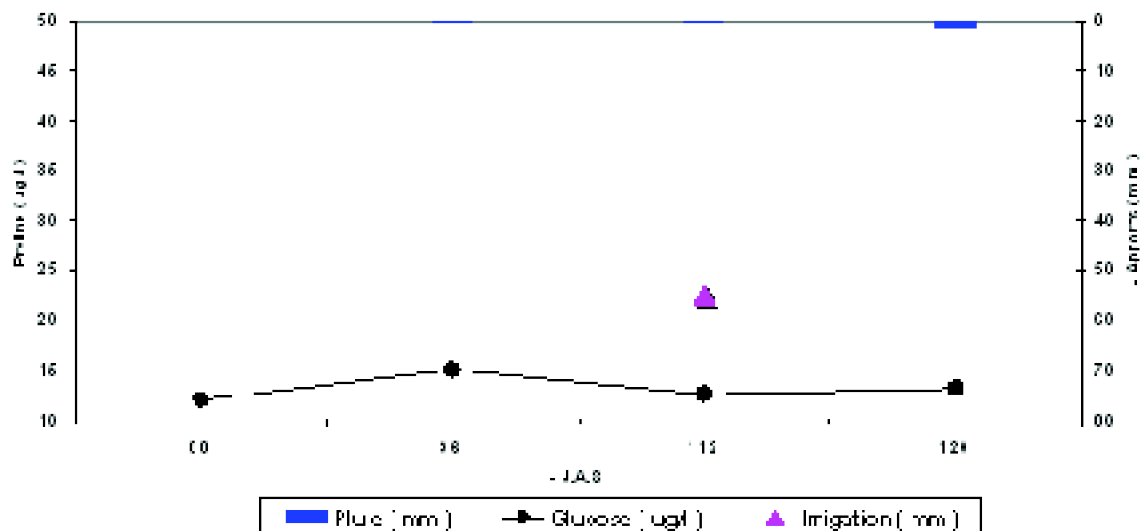


Figure N° III.68 : Concentration en sucres (MOD 2001)

**c.- Traitement SEV 2001**

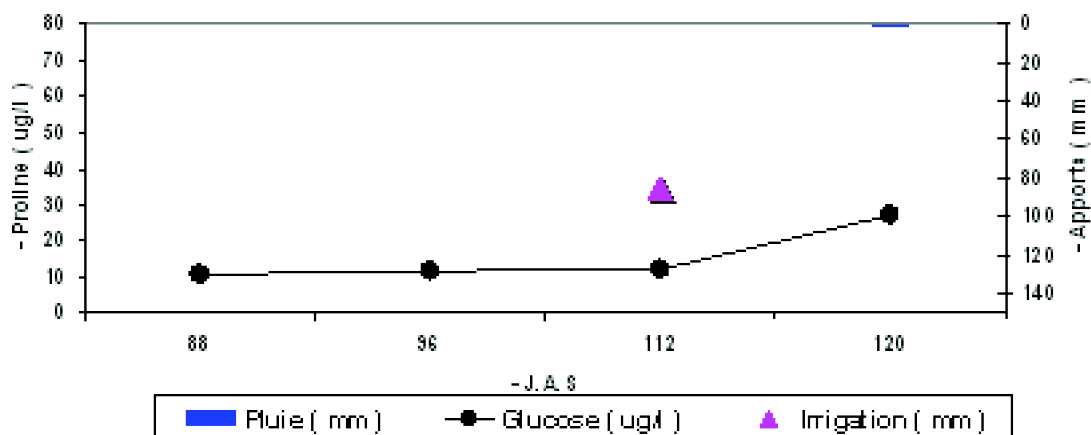


Figure N° III.69 : Concentration en sucres (SEV 2001)

Les teneurs en sucre du traitement Sévère (Fig. III.69) semblent se stabiliser au début pour ensuite augmenter brusquement à partir du 112ème J.A.S malgré un apport d'eau par irrigation.

#### d.- Traitement PLU 2001

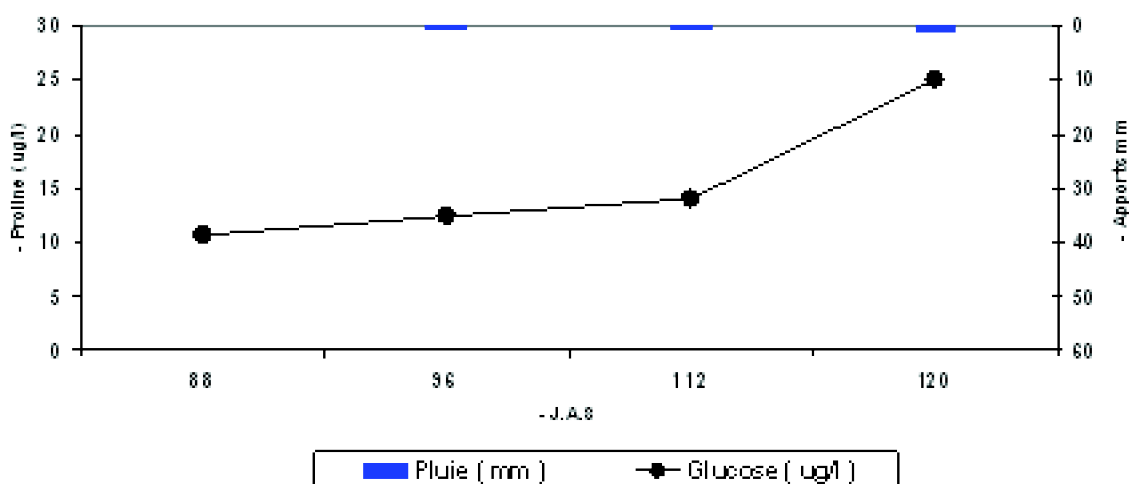


Figure N° III.70 : Concentration en sucres (PLU 2001)

La même remarque que le traitement Sévère est valable ici pour le traitement Pluvial ( Fig. III.70 ) avec une augmentation continue des teneurs en sucre pendant le cycle végétatif .

## IV. Composantes de rendements

### IV .1.- Evolution générale et effet du traitement hydrique

#### IV.1.1.- Essai 2000

Le graphique N° III.71 suivant résume les composantes de rendements en fonction des consommations en eau (ETR) pendant le cycle végétatif. Afin de mieux comprendre le graphique, nous présentons dans le tableau N° III.13 suivant les correspondances entre ETR et traitement hydrique :

Tableau N°III.13 : Consommations en eau (ETR) et traitements hydriques – Essai 2000

TRAITEMENT HYDRIQUE	ETR (mm)
ETM	441.0
MOD	381.1
PLU	332.6
SEV	366.5

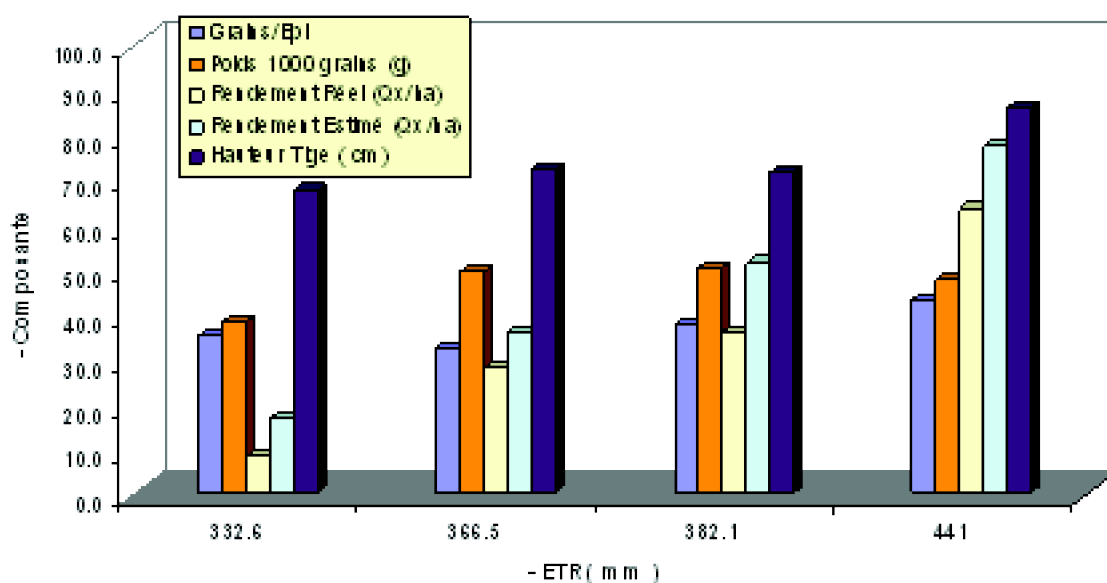


Figure N° III.71 : Composantes de rendements (Essai 2000)

Ce graphique permet de conclure que pratiquement tous les paramètres représentés présenteraient une tendance générale vers une augmentation en fonction des ETR croissants. Cependant, on notera que le rythme d'accroissement est relativement élevé pour les rendements réel et estimé.

Les analyses de variances pour tous les paramètres discutés sont résumées dans les tableaux N° III.14 suivants :

Tableau N°III.14 : Analyse de variance des composantes de rendement (Essai 2000)

**Cinétique de quelques paramètres physiologiques du blé dur *triticum durum* (variété vitron) sous contrainte hydrique dans la plaine de la Mitidja**

Paramètre	ETM	MOD	SEV	PLU	Probabilité	Test	Groupes Homogènes
Grains par épi	42.46	37.22	31.76	34.44	0.0552	NS	A : ETM, MOD, SEV, PLU
Poids 1000 grains	46.94	49.58	49.06	37.60	0.3847	NS	A : ETM, MOD, SEV, PLU
Rendement réel	62.93	35.45	27.49	7.96	0.0000	THS	A : ETM ; B : MOD C : SEV ; D : PLU
Rendement estimé	77.08	50.89	35.45	16.55	0.0000	THS	A : ETM ; B : MOD C : SEV ; D : PLU

Le tableau précédent montre que l'effet des traitements hydriques s'est fait sentir seulement pour les rendements réel et estimé pour lesquels les moyennes des traitements font partie de quatre groupes distincts A, B, C et D.

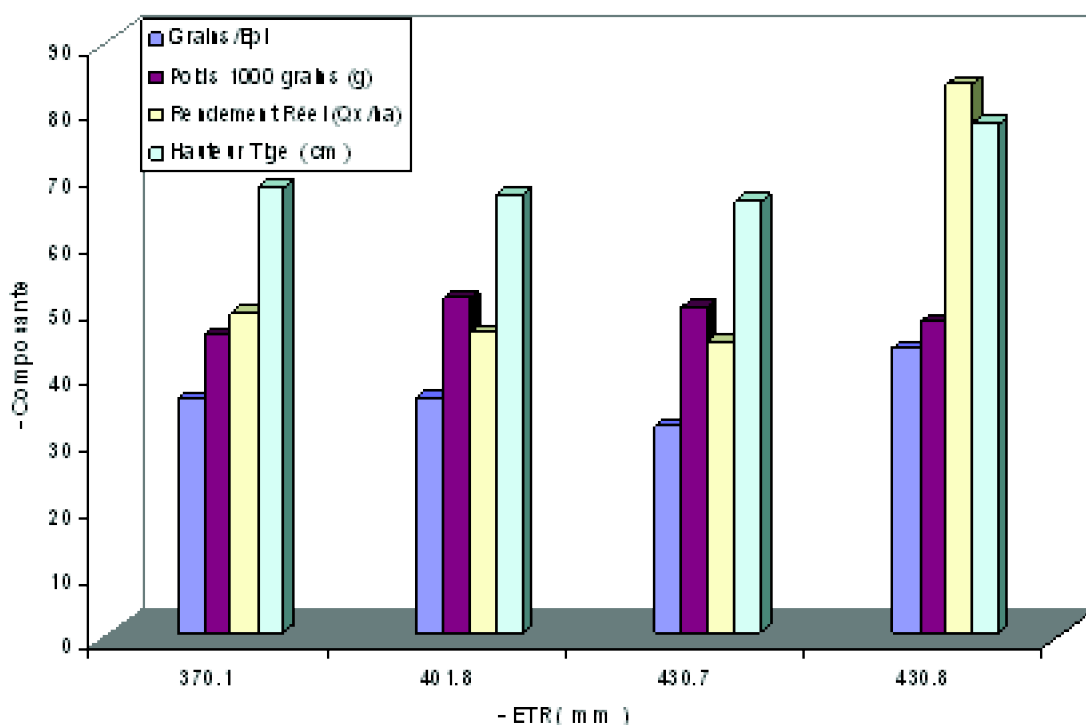
**IV.1.2.- Essai 2001**

Le graphique N° III.72 suivant résume les composantes de rendements en fonction des consommations en eau (ETR) pendant le cycle végétatif. Afin de mieux comprendre le graphique, nous présentons dans le tableau N°III.15 suivant les correspondances entre ETR et traitement hydrique :

**Tableau N° III.15 : Consommations en eau (ETR) et traitements hydriques – Essai 2001**

TRAITEMENT HYDRIQUE	ETR ( mm )
PLU	370.1
MOD	401.8
SEV	430.7
ETM	430.8





**Figure N° III.72 : Composantes de rendements (Essai 2001)**

Le graphique de l'essai 2001 semble montrer un même comportement que celui observé dans l'essai 2000 avec cependant des rythmes moins accentués.

Les analyses de variances pour tous les paramètres discutés sont résumées dans le tableau N° III.16 suivant :

**Tableau N°III.16 : Analyse de variance des composantes de rendement (Essai 2001)**

Paramètre	ETM	MOD	SEV	PLU	Probabilité	Test	Groupes Homogènes
Grains par épi	43.07	35.56	31.12	35.49	0.0738	NS	A : ETM, MOD, SEV, PLU
Poids 1000 grains	47.00	50.63	49.20	45.21	0.7648	NS	A : ETM, MOD, SEV, PLU
Hauteur de tige	77.14	66.21	65.40	67.45	0.0479	S	A : ETM B : MOD, SEV, PLU
Rendement réel	83.04	45.50	44.07	48.28	0.0050	HS	A : ETM B : MOD, SEV, PLU

Le tableau précédent montre que l'effet des traitements hydriques n'a été positif que pour la hauteur de tige et le rendement pour lesquels le test LSD de comparaison des moyennes a permis de montrer :

La moyenne des hauteurs de la tige est différente d'un traitement à un autre. Le test LSD montre une différence de la moyenne du traitement ETM avec celles des autres traitements formant un même groupe homogène.

La moyenne des rendements obtenue pour le traitement ETM semble se différencier

par rapport aux autres traitements dont les moyennes sont jugées statistiquement identiques.

## IV .2.- Rendements et consommations en eau du blé

En plus de l'analyse statistique précédente, nous avons voulu tester les liaisons entre les rendements et la consommation en eau (ETR) des différents traitements. Nous ne présentons ici que la relation concernant l'essai 2000 qui s'est avérée significative :

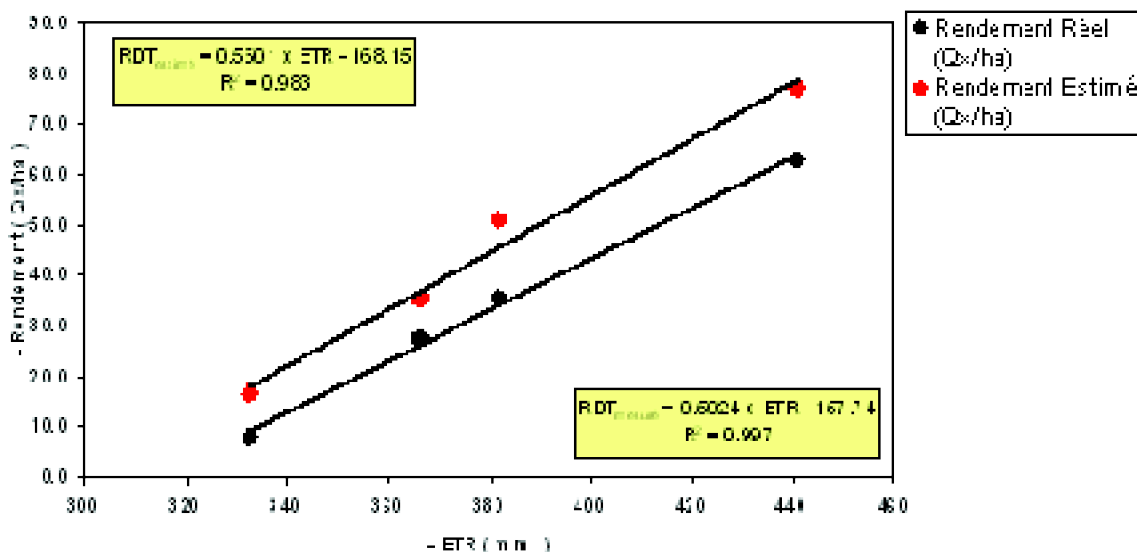


Figure N° III.73 : Relation entre le rendement et l'ETR (Essai 2000)

L'analyse de variance de la régression correspondante a donné les résultats suivants :

Tableau N°III.17 : Analyse de variance – Régression “ Rendement estimé– ETR ”– Essai 2000

Paramètre	Estimation	Ecart Type	R <sup>2</sup>	Probabilité	Test
Pente	0.5601	0.0523	-	0.0086	HS
Ordonnée	-168.15	20.0168	-	0.0139	S
Modèle	-	4.104	0.983	0.0086	HS

Tableau N° III.18 : Analyse de variance – Régression “ Rendement réel – ETR ” – Essai 2000

Paramètre	Estimation	Ecart Type	R <sup>2</sup>	Probabilité	Test
Pente	0.5024	0.0210	-	0.0017	HS
Ordonnée	-157.743	8.0413	-	0.0026	HS
Modèle	-	1.6488	0.997	0.0017	HS

D'après ces résultats, il apparaît que les deux relations sont statistiquement acceptables avec cependant une meilleure corrélation entre le rendement réel et l'ETR pour laquelle le test s'est avéré hautement significatif .

### IV .3.- Efficience de l'eau

Nous discuterons ici deux types d'efficience :

1.- Une efficience liée aux apports d'eau exprimant le rapport entre les rendement en grains et le volume total d'eau (pluies et irrigations) apporté pendant le cycle de la culture :

$$E_w = \frac{R}{\sum (P + I)} \dots\dots\dots(III.9)$$

Avec :

E<sub>w</sub> : Efficience des apports d'eau (Kg/ha/mm)

R : Rendement en grains (Kg/ha)

P : Pluies totales (mm)

I : Irrigations totales (mm)

2.- Une efficience liée aux consommations d'eau exprimant le rapport entre les rendement en grains et la consommation en eau totale représentée par les évapotranspirations réelles ETR cumulées pour tout le cycle de la culture :

$$E_c = \frac{R}{\sum ETR} \dots\dots\dots(III.10)$$

Avec :

E<sub>c</sub> : Efficience de consommation (Kg/ha/mm)

R : Rendement en grains (mm)

ETR : Evapotranspirations réelles (mm)

Le tableau N° III.19 résume les valeurs des efficience obtenues pour les essais 2000 et 2001 :

Année	Traitement	Apports (mm)	E <sub>TR</sub> (mm)	Rendement réel (Qx/ha)	E <sub>w</sub> (Kg/ha/mm)	E <sub>c</sub> (Kg/ha/mm)
2000	ETM	364.7	441.0	62.93	17.3	14.3
	MOD	241.7	382.1	35.45	14.7	9.3
	SEV	134.7	366.5	27.45	14.1	7.5
	PLU	154.7	337.6	7.45	5.1	7.4
2001	ETM	432.7	430.8	83.05	19.2	19.3
	MOD	372.7	401.8	45.50	12.2	11.3
	SEV	402.7	430.7	44.07	10.9	10.2
	PLU	317.7	370.1	48.23	15.2	13.0

**Tableau N° III.19 : Efficience des apports et des consommations d'eau (Essais 2000 –**

2001)

On note une tendance générale vers une augmentation sensible des efficacités du traitement sec vers le traitement irrigué :

Pour l'essai 2000 , un volume d'eau d'irrigation de 170 mm pour le traitement ETM a permis une augmentation des deux efficacités de 5.1 à 17.3 (  $E_w$  ) et de 2.4 à 14.3 (  $E_c$  ) , ce qui représente respectivement des gains de 70 et 83 % .

Pour l'essai 2001 , un volume d'eau d'irrigation de 115 mm pour le traitement ETM a permis une augmentation des deux efficacités de 15.1 à 19.2 (  $E_w$  ) et de 13.0 à 19.3 (  $E_c$  ) , ce qui représente respectivement des gains de 21 et 32 % .

Nous présentons dans les graphiques N° III.74 et N° III.75 suivants les relations obtenues entre les efficacités et les apports et consommations d'eau pour les deux essais 2000 et 2001 réunis :

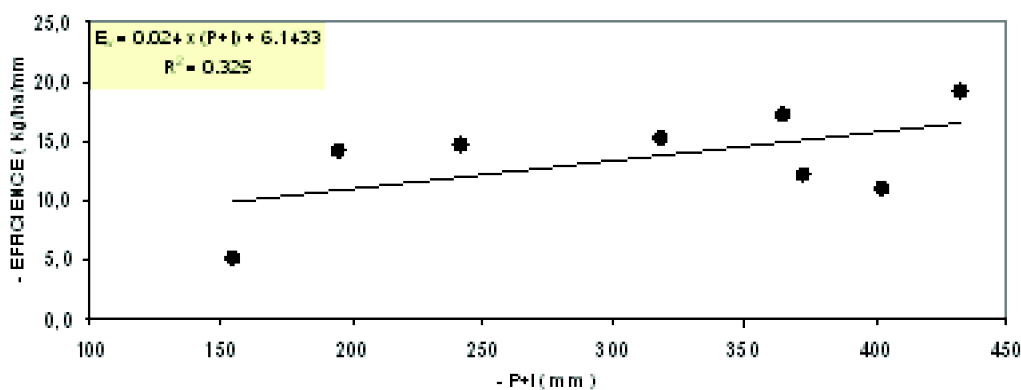


Figure N° III.74 : Relation entre l'efficacité et les apports d'eau

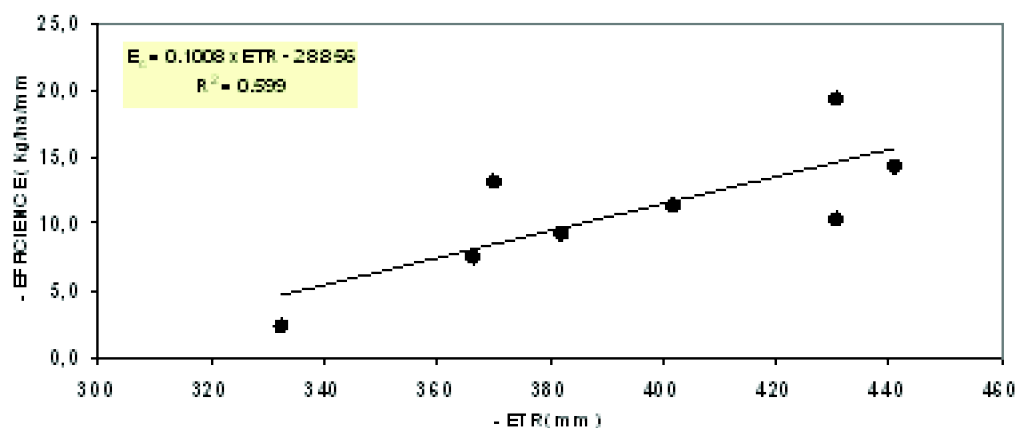


Figure N° III.75 : Relation entre l'efficacité et l'ETR

Les analyses de variances des régressions sont résumées dans le tableau N° III.20 suivant :

Efficiences	Paramètre	Estimation	Ecart type	R <sup>2</sup>	Probabilité	Test
E <sub>w</sub>	Pente	0.0247	0.0141	-	0.1473	NS
	Ordonnée	6.1432	4.5371		0.2270	NS
	Modèle	-	3.8115	0.325	0.1473	NS
E <sub>c</sub>	Pente	0.1308	0.0337	-	0.0242	§
	Ordonnée	-28.756	13.3475	-	0.1078	NS
	Modèle		3.7030	0.595	0.0242	§

**Tableau N° III.20 : Analyse de variance – Régression “ Efficiences – P+I et ETR ”**

De ce tableau, on peut relever que les efficacités des apports d'eau ne sont pas du tout corrélées avec la somme des pluies et irrigations. Seule la relation entre les efficacités E<sub>c</sub> et les ETR semblent être significatives.



## Conclusion générale

Nous rappelons que les objectifs principaux de notre travail peuvent se résumer chronologiquement par cette triptyque :

Caractériser un stress hydrique à l'aide de certains paramètres physiologiques essentiellement les températures du couvert végétal

Etudier la pertinence de ces paramètres physiologiques à détecter le stress hydrique

Tester les impacts des stress hydriques sur les composantes de rendements par le biais de différentes stratégies d'irrigation

Les résultats obtenus, malgré des insuffisances dues à certaines contraintes ayant entravé quelque peu le bon déroulement des protocoles expérimentaux ( notamment les conduites des irrigations ), nous ont permis plus ou moins de répondre aux objectifs fixés .

Ainsi, nous pouvons au terme de ce travail relever les points suivants :

Confrontés aux réserves en eau du sol, les écarts de température  $T_s-T_a$  semblent indiquer tantôt au même moment tantôt un peu plutôt l'apparition d'un stress hydrique. Dans le même sens, Yang yang M.S. (2003) conclut que la technique utilisant la thermométrie à infra rouge était capable de détecter le stress à un ou deux jours avant l'apparition de signes visibles de stress hydrique.

L'indice SDD fonctionne (du moins pour l'essai 2000) de la même manière que les écarts  $T_s-T_a$ . Nous obtenons, pour le blé, des seuils de SDD de 10 à 15 °C pour le déclenchement des irrigations avec toutefois des valeurs en fin de cycle dépassant les 30

°C et qui nous paraissent exagérées.

Les Relations entre les CWSI théorique et mesuré ont été satisfaisantes ( $R^2 = 0.55$  ;  $0.33$ )

Les relations obtenues entre les CWSI et le rapport ETR/ETM ont été très hautement significatives pour les traitements modéré ( $R^2 = 0.78$ ) et sévère ( $R^2 = 0.79$ ) et les équations trouvées sont en concordance avec celles trouvées en bibliographie. Ceci semble confirmer que le CWSI apparaît comme un indicateur pertinent du stress hydrique

La confirmation du CWSI comme indicateur potentiel du stress hydrique a été aussi apportée par les relations obtenues entre le CWSI et le taux d'épuisement de la réserve en eau du sol qui se sont avérées significatives pour les traitements modéré ( $R^2 = 0.36$ ) et sévère ( $R^2 = 0.45$ ). Pratiquement les mêmes équations furent obtenues par E.M. Barnes et al.

Si le potentiel foliaire a montré des différences significatives entre les différentes stratégies d'irrigation, la teneur en eau relative ne semble pas être influencée par les traitements hydriques, du moins dans le contexte de nos expérimentations. Nous avons cependant remarqué que la teneur en eau relative ne réagit pas systématiquement à un apport d'eau en raison probablement de l'intensité et de la durée du stress hydrique devenant quasi irréversible.

Les rendements en grains réel et estimé ont été significativement influencés par les régimes hydriques, le traitement irrigué donnant les valeurs les plus importantes (63.0 et 77.0 Qx/ha pour l'essai 2000 et 83.0 pour l'essai 2001).

Cette conclusion de l'effet des régimes hydriques est d'ailleurs confirmée par les relations hautement significatives obtenues entre les rendements réel et estimé et la consommation en eau (ETR) avec des coefficients de détermination respectifs de 0.997 et 0.983.

Seule les efficacités des consommations en eau ont donné des corrélations acceptables. Celles des apports d'eau se sont avérées non significatives

Cette étude confirme que le stress hydrique peut affecter de façon significative les paramètres physiologiques et entraîner une baisse importante de rendement lorsqu'il survient à des moments critiques du développement de la culture. D'où l'intérêt d'une détection précoce du stress par la mise en place d'un dispositif de diagnostic et de gestion du stress adéquat. Et dans ce contexte, les résultats auxquels nous avons aboutis semblent indiquer que la température du couvert, par le biais de l'indice CWSI, peut constituer un outil simple et efficace. L'un des avantages de la thermométrie à infra rouge est qu'elle offre la possibilité de procéder rapidement à plusieurs mesures sur un champs à différents endroits.

Cependant, le concept de CWSI présente toutefois un inconvénient concernant sa procédure de calcul qui nécessite la présence, dans un protocole d'essai, de deux placettes "témoins" irrigué et sec (ce qui n'est pas évident en pratique). De plus, son application à l'échelle locale et régionale est cependant entravée par la difficulté de mesurer la température des couverts hétérogènes. En effet, quand la végétation est



clairsemée, la température du sol domine la température de surface mesurée par le capteur et biaise l'interprétation du CWSI. À cet effet, Jackson et al. (1983) ont émis cet avertissement : « il est important que le sol n'apparaisse pas dans le champ de vue du thermomètre infrarouge. La température du sol peut être grandement différente de celle de la végétation et sa présence dans la mesure peut entraîner des erreurs importantes dans le CWSI ». Moran et al. (1994) propose une approche de solution qui consisterait à combiner aux mesures de thermographie infrarouge des indices de végétation ( tel que le LAI ) pour corriger la fraction de sol visible par le capteur.

Nous espérons que nos résultats peuvent constituer les bases de futurs travaux dans le même domaine afin de confirmer encore plus les conclusions concernant surtout les indicateurs de stress hydriques liés à la température du couvert qui nous semble être un paramètre facilement accessible sur le terrain pour autant que les conditions climatiques soient favorables et que l'on prenne les précautions nécessaires.



## Références bibliographiques

- Abib F., et Haddad H., 1994. Cartographie des sols de la ferme expérimentale de l'Institut National Agronomique d'EL – Harrach (INA), mémoire d'ingénieur, 91p.
- Anonyme (2002). Perspective Canadienne et mondiale des oléagineux pour 2002-2003, bulletin bimensuel, vol 15, N° 1, Canada
- Baret, F. 1999. Potentiel de la télédétection pour l'agriculture de précision. *L'enjeux français de l'agriculture de précision* , pp. 8-11.
- Belkacemi K.,2002. Optimisation dans la gestion des irrigations du blé dur (*Triticum Durum Desf*) variété vitron à travers la recherche de l'indicateur de stress le plus pertinent, mémoire d'ingénieur, 166p.
- Berliner, P., et al., 1984. Evaluation of the infrared thermometer as a crop stress detector. *Agricultural and Forest Meteorology* , Vol. 31, No. 3-4, pp. 219-230.
- Caloz, R., and Puech, C. 1996, Hydrologie et imagerie satellitaire. In Précis de télédétection, volume 2, applications thématiques. Edité par l'université du Québec.
- Enixon J. M., 2004. Etude de l'impact des différents types d'entretien du sol sur l'alimentation hydrique de la vigne. Effet sur son développement végétatif et la maturation des raisins.
- FAO 2003, La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO), Rome.
- Henry y. et Jacques de Buyer, 2000. Pour la science hors série N° 26, p 60 – 62.

- Idso, S. B., Hatfield, J. L., Jackson, R. D., and Reginato, R. J. 1979. Grain yield prediction: Extending the stress-degree-day approach to accommodate climatic variability. *Remote Sensing of Environment* , Vol. 8, No. 3, pp. 267-272.
- Idso, S. B., Jackson, R. D., Pinter, J., P. J., Reginato, R. J., and Hatfield, J. L. 1981a. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology* , Vol. 24, pp. 45-55.
- Idso, S. B., Reginato, R. J., Jackson, R. D., and Pinter, J., P. J. 1981b. Foliage and air temperatures: Evidence for a dynamic "equivalence point". *Agricultural Meteorology* , Vol. 24, pp. 223-226.
- Idso, S. B., Jackson, R. D., and Reginato, R. J. 1978. Remote sensing for agricultural water management and crop yield prediction. *Agricultural Water Management*, Vol. 1, No. 4, pp. 299-310.
- Idso, S. B., Reginato, R. J., Jackson, R. D., and Pinter, J., P. J. 1981b. Foliage and air temperatures: Evidence for a dynamic "equivalence point". *Agricultural Meteorology* , Vol. 24, pp. 223-226.
- Jackson, R. D., Hatfield, J. L., Reginato, R. J., Idso, S. B., and Pinter, J., P. J. 1983. Estimation of daily evapotranspiration from one time-of-day measurements. *Agricultural Water Management* , Vol. 7, No. 1-3, pp. 351-362.
- Jackson, R. D. 1982. Canopy temperature and crop water stress. *Advances in Irrigation* , Vol. 1, pp. 43-85.
- Kogan, F. N. 1995. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research* , Vol. 15, No. 11, pp. 91-100.
- Kotchi S. O., 2004. Détection du stress hydrique par thermographie infrarouge. Application à la culture de la pomme de terre.
- Luquet, D. 2002. Suivre de l'état hydrique des plantes par infrarouge thermique - analyse expérimentale et modélisation 3d de la variabilité des températures au sein d'une culture en rang de cotonniers: Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris.
- Mailhol J.C., 1992. Evolution de l'ETR par bilan hydrique : comparaison de deux modèles. Note interne CEMAGREF Montpellier p1-7.
- Mailhol J.C., 2001. Contribution à l'amélioration des pratiques d'irrigation à la raie par une modélisation simplifiée à l'échelle de la parcelle et de la saison. Thèse de doctorat de l'université de Montpellier II. 264p.
- Mailhol J.C. et Olufayo A., Ruelle P., 1997. Sorghum and sunflower évapotranspiration and yield from simulated area index. *Agric. Water manag.* 35 : 167-182
- Mailhol J.C., et Picheral I., 1994. Regional water needs and crop yield according to water availability. 17th European Regional conference on Irrig. And Drain. ICID, varna may 1994, p 73-82.
- Mosiniak M. et Moran, M. S. et al., 1994. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment* , Vol. 49, No. 3, pp. 246-263.
- Moran, S. M. et al., 2000. Soil moisture evaluation using multi-temporal synthetic aperture radar (sar) in semiarid rangeland. *Agricultural and Forest Meteorology* , Vol.

105, No. 1-3, pp. 69-80.

Olufayo A. 1994. Caractérisation des réponses du Sorgho grain au déficit hydrique à l'aide d'un indicateur bioclimatique. Thèse de Doctorat ENSA Rennes. 97p

Palomo I. R. et al., 2004. Canola under water deficiency in southern Argentina.

Prat R. ET Roland C., 2001. Du blé au pain.

Soltner D. 1999. Les grandes productions végétales. 19ème édition.

Yang yang M.S., 2003. Non-contacting techniques for detecting plant drought stress in a closed environment. Thèse doctorat, Ohio State University, 265p.



## Annexes

### **Annexe 1 : Fichier de données climatiques (essai 2000)**

**Cinétique de quelques paramètres physiologiques du blé dur *triticum durum* (variété vitron) sous contrainte hydrique dans la plaine de la Mitidja**

DATE	PLUIE (mm)	Eto (mm)	TEMPERATURE (°C)	HUMIDITE (%)	INSOLATION (h)	VENT (m/s)	RG (J/cm <sup>2</sup> )
28/12/1999	10	0.8	14.6	81	0.1	0.9	292.7
29/12/1999	6.5	1.2	11.3	65	0.1	1.3	293.2
30/12/1999	0	0.8	9.2	74	3.6	1.2	644.6
31/12/1999	0	0.6	8.4	75	1.5	0.0	435
01/01/2000	0	0.5	6.4	80.3	8.3	1.6	1124.7
02/01/2000	0	0.3	8	84.8	9.1	0.4	1208.5
03/01/2000	0	0.5	7.7	85.8	9	1.9	1201.6
04/01/2000	0	0.4	7.6	81.3	9.2	0.5	1225.5
05/01/2000	0	0.4	7.2	79.8	9	0.3	1208.9
06/01/2000	0	0.3	6.9	80.3	9	0.0	1212.8
07/01/2000	0	0.4	6.8	83.3	9	0.4	1217
08/01/2000	0	0.5	7.4	80.9	6.1	0.8	922.9
09/01/2000	0.2	0.6	7.4	83.3	0.5	1.0	348
10/01/2000	0	0.5	7.5	81.8	8.8	1.3	1210.3
11/01/2000	0	0.5	7.1	83	8.9	1.5	1225.8
12/01/2000	8.8	0.6	7.2	82.4	7	1.3	1032.5
13/01/2000	6.5	0.7	8.1	89.9	2.1	3.0	523.2
14/01/2000	0	0.5	8.2	77.1	8.5	0.0	1200.2
15/01/2000	0	0.8	10.2	72.8	6.8	0.9	1026.1
16/01/2000	0	0.9	10.4	62.6	9.2	1.0	1286.4
17/01/2000	0	0.6	7.6	81.6	5.2	1.1	865.9
18/01/2000	0	1.2	9.5	78.8	7.7	3.6	1138.7
19/01/2000	0	1.1	9.4	80.4	3.7	3.4	713.8
20/01/2000	0	0.9	10.6	82	8.2	1.8	1205.4
21/01/2000	0	0.6	8.6	82.8	8.9	0.3	1288.4
22/01/2000	0	0.7	7.4	80.5	9.4	1.4	1350.5
23/01/2000	0	0.7	7.3	82.9	2.4	1.6	588.5
24/01/2000	0	1	8.1	78.8	6.5	2.6	1045.8
25/01/2000	0	0.7	8.5	78.6	7.9	0.5	1207.9
26/01/2000	0	0.7	8.9	80.6	8.2	0.5	1248.9
27/01/2000	0	0.8	8.8	83.1	8.5	0.6	1290.5
28/01/2000	0	1.6	13.7	57.9	5.4	1.5	948.2
29/01/2000	0	0.9	9.9	78.6	4	1.1	795.4
30/01/2000	0	1.1	9.6	79.4	9.6	1.6	1441.3
31/01/2000	0	1	9.6	69.6	9.8	0.4	1473.7
01/02/2000	0	1	10.7	70.1	9.2	0.4	1414
02/02/2000	0	1.8	12.7	70.4	8.7	2.8	1365.2
03/02/2000	0	1.6	12.8	80	6	3.9	1058.3
04/02/2000	0	1	9.4	79.1	9.8	0.6	1513.4
05/02/2000	0	1	8.5	82	9.8	0.9	1523.7
06/02/2000	0	1.1	9.3	71.9	9.9	0.8	1546
07/02/2000	0	1.6	10.5	77.5	6.9	3.6	1196.7
08/02/2000	0	1.2	11.4	79.4	9.1	0.6	1470.8



09/02/2000	0.2	1.6	11.9	81.5	7.8	3.4	1323.2
10/02/2000	0	1.5	9.8	79	9.7	2.4	1564.8
11/02/2000	0	1.3	9.2	67.8	10	0.9	1612.6
12/02/2000	5.8	1.2	9.1	78	7.2	1.3	1277.3
13/02/2000	0	1.4	11.6	77.1	9.5	0.9	1572.9
14/02/2000	0	1.4	11.6	77.9	1.8	2.4	619.2
15/02/2000	0	1.5	11.1	78.9	10.2	0.9	1683.4
16/02/2000	0	2.2	13.2	67.1	10.1	2.5	1682.5
17/02/2000	0	2.8	13.7	72.8	9.8	5.3	1655.9
18/02/2000	0	2.3	14.3	73.5	9.2	2.9	1590.4
19/02/2000	0	2.2	13.8	66.9	10.7	1.8	1795.5
20/02/2000	0	2.2	12.3	73.8	10.5	2.8	1781.9
21/02/2000	0	2	9.8	75	10.3	2.9	1768
22/02/2000	0	1.8	10	71.4	9.2	1.6	1635.4
23/02/2000	0	1.6	12	74.8	5.7	1.5	1183.3
24/02/2000	0	1.6	9.5	74.6	9	1.3	1631.5
25/02/2000	0	1.7	9.4	66.9	10.5	0.5	1843.8
26/02/2000	0	2	10.8	59.4	9.2	1.1	1681
27/02/2000	0	1.6	11.5	69.5	7.8	0.4	1502.5
28/02/2000	0	2	11.9	80.9	9	2.5	1676.6
29/02/2000	0	1.5	12.5	79.1	4.8	0.8	1111.5
01/03/2000	0	2.2	13.2	77.6	10	1.8	1837.2
02/03/2000	0	2.6	12.1	73.6	9.3	3.9	1752.1
03/03/2000	0	2.4	11.1	59.9	10.8	1.6	1973
04/03/2000	0	2.5	12.2	74.5	10.4	2.8	1929.5
05/03/2000	0	1.9	11	82.6	8.3	2.0	1645.4
06/03/2000	0	2.1	11.2	79.8	8.8	2.1	1727
07/03/2000	0	1.9	12.5	84.5	8.5	1.0	1695.2
08/03/2000	0	2	12.3	79.9	6.9	2.0	1476.3
09/03/2000	0	2.3	11.2	74	10.6	1.3	2019.6
10/03/2000	0	2.6	12.5	61.8	10.9	1.1	2075.3
11/03/2000	0	2.9	14.9	57	11	1.1	2102.3
12/03/2000	0	2.8	16.7	54.6	7.8	1.1	1645.9
13/03/2000	0.5	2.9	16.8	68.3	6.3	2.5	1435
14/03/2000	13.9	1.8	14.5	83.1	3.7	1.8	1059.1
15/03/2000	3.7	2.1	13.4	87.4	6.1	2.8	1422.9
16/03/2000	0	2.6	13.1	76.8	7.7	2.6	1670.5
17/03/2000	0	2.6	12.3	74.5	10.4	1.4	2085.6
18/03/2000	0	2.6	11.5	77.5	10.5	1.6	2112.1
19/03/2000	0	2.6	11.4	77.3	9.3	2.4	1941.7
20/03/2000	0	2.8	10.9	75.4	10.6	2.4	2150.1
21/03/2000	0	3	15	70.9	8.8	1.8	1886.2
22/03/2000	0	4.6	21.5	41.9	2.7	3.5	959.4
23/03/2000	0.1	2.7	17.9	66.4	1.5	2.8	780.3
24/03/2000	0.1	3.1	15.4	79.8	9.8	2.1	2070.8

**Cinétique de quelques paramètres physiologiques du blé dur *triticum durum* (variété vitron) sous contrainte hydrique dans la plaine de la Mitidja**

25/03/2000	0	2.8	13.6	82.1	9.4	2.3	2018.9
26/03/2000	0	3.1	12.7	77.4	10	3.1	2122.5
27/03/2000	0	3.3	13.7	67.8	11.5	1.5	2367.9
28/03/2000	1.1	2	13.1	76.5	1.9	2.3	868.1
29/03/2000	0	3.3	13.4	74.9	10.1	2.6	2168.5
30/03/2000	0	2.4	13.8	81.5	6.8	1.0	1655.2
31/03/2000	0	2.6	15	79.8	5.3	2.6	1424.3
01/04/2000	0	3.5	14.3	76.6	10.7	2.5	2293.5
02/04/2000	0.1	3.6	18.7	69.1	5.5	3.3	1470
03/04/2000	1.9	4.4	17	75.6	10.7	4.5	2312.9
04/04/2000	0.5	4	14.5	74.8	5.6	7.6	1499.7
05/04/2000	0.1	5.1	13.6	67.4	9.3	8.0	2105.2
06/04/2000	0	3.5	11.7	70.9	11.5	2.6	2470.8
07/04/2000	0	3.3	13.3	83.3	9.3	3.8	2121.9
08/04/2000	8.3	3.1	18.8	67.1	0	4.1	611
09/04/2000	0	4	16.5	79.4	11.3	2.6	2465.8
10/04/2000	0.2	4.2	15.8	69	8.5	4.3	2014.6
11/04/2000	4.7	4.2	14.5	67.8	4.7	6.6	1396
12/04/2000	0	4.9	14.9	68.5	11.8	5.1	2574.3
13/04/2000	0	2.6	13.4	78.6	6.1	1.3	1638.8
14/04/2000	0	4.5	16.5	65.5	11.1	2.9	2474.9
15/04/2000	0	4.7	16.8	70	11.8	3.1	2599.3
16/04/2000	0.7	6	21.4	58	8.7	5.0	2090.1
17/04/2000	0	4.6	16.1	66	0	9.3	642
18/04/2000	0	5.1	15.5	69.5	10.6	5.9	2421.5
19/04/2000	0	4	17	72.4	3.8	6.1	1286.6
20/04/2000	0	5.2	18	70.9	12.3	3.6	2721.5
21/04/2000	0	4.6	17.6	67.4	12.5	1.4	2762.5
22/04/2000	0	5.3	18.5	60.1	11.2	3.3	2550
23/04/2000	0	5.3	17.4	60.5	7.2	5.5	1879.4
24/04/2000	0	4.3	14.5	65	12	1.9	2698.6
25/04/2000	0	4	16.6	73.6	10.4	1.3	2433.2
26/04/2000	0	4.1	17.9	73.6	8.6	2.3	2132.7
27/04/2000	0	4.8	17.3	65.8	6.8	5.0	1831.1
28/04/2000	0.4	5.2	14.3	60.5	8.3	6.0	2091.7
29/04/2000	0	4.8	14.5	66.3	11.1	3.8	2575.2
30/04/2000	0	5.6	19.2	57.8	9.5	3.9	2306.6
01/05/2000	0	3.7	16.9	79.9	7.7	2.8	2002.9
02/05/2000	0	4	18	81	9.3	1.8	2281.8
03/05/2000	0	6	22.3	61.6	12	2.6	2750.4
04/05/2000	0	8.1	24.7	45.9	9.9	5.4	2393.9
05/05/2000	0	4.9	19.4	74.4	10	3.0	2415.5
06/05/2000	0	5	17.6	71.8	10.4	3.9	2488.7
07/05/2000	0	4.4	18.5	77.4	9.8	2.1	2389.3
08/05/2000	0	4.2	18.2	80.4	8.9	2.8	2237.7

09/05/2000	1.9	2.5	19.5	79.5	0.4	3.0	771
10/05/2000	1.1	2.9	18.7	80.5	3.3	2.3	1275.3
11/05/2000	0	5.1	17.6	70.6	12.3	2.3	2837.4
12/05/2000	0	4.8	19.5	75	9.8	2.6	2407.6
13/05/2000	0	4.5	20.4	78.3	7.2	3.9	1959.6
14/05/2000	0	3.6	19.6	83.3	6.5	1.4	1840.9
15/05/2000	0	5.5	20.4	79.9	12.2	3.0	2834.2
16/05/2000	0	4.5	19.9	81.6	9.5	1.9	2367.8
17/05/2000	0	4.3	20.1	81.4	8.3	2.5	2161.7
18/05/2000	0	4.2	20.9	77.5	8.1	1.1	2129.4
19/05/2000	0	4.8	19.6	79.6	10.6	1.8	2567.4
20/05/2000	0.1	4.3	20.4	79.9	8.5	1.6	2203.9
21/05/2000	0.7	2	20.6	85.6	0	2.1	724
22/05/2000	2	3.4	20.8	78.6	3.8	2.5	1388.4
23/05/2000	3.6	3.1	20.1	85.8	3.7	2.8	1372.7
24/05/2000	0.7	2.8	20.4	85	2.4	2.9	1147.4
25/05/2000	43.3	2	18	92.8	1.5	1.4	991.7
26/05/2000	0	5.5	19.8	79.5	12.4	2.8	2897.2
27/05/2000	0	5.2	20.1	82.6	11.8	1.9	2794.2
28/05/2000	0	5.1	21.1	82.1	11.1	1.8	2673.6
29/05/2000	0	6.5	23.1	70.3	13.1	2.4	3024.8
30/05/2000	0	6.1	22.3	77.4	13.1	2.3	3026.4
31/05/2000	0	6.2	22.5	76	12.9	2.4	2992.9
01/06/2000	0	6.5	22.7	72.9	12.8	3.3	2976.8
02/06/2000	0	5.5	21.8	79.5	11.2	2.6	2698.2
03/06/2000	0	5.5	21.6	82	11.9	1.9	2821.8
04/06/2000	0	5.3	23.5	75	10	1.3	2490.4
05/06/2000	0	5.8	24.1	76.3	8.9	4.3	2298.8
06/06/2000	0	5.2	22.5	79.4	7.9	4.4	2124.7
07/06/2000	0	6.9	21.3	66.5	13.1	4.3	3035.6
08/06/2000	0	6.6	20.6	67.3	13.1	3.9	3036.4
09/06/2000	0	5	21.3	75.5	9.6	1.9	2424.4
10/06/2000	0	8.4	21.4	59.1	11.2	7.8	2705

## Annexe 2 : Fichier de données climatiques (essai 2001)

**Cinétique de quelques paramètres physiologiques du blé dur *triticum durum* (variété vitron) sous contrainte hydrique dans la plaine de la Mitidja**

DATE	PLUIE (mm)	Eto (mm)	TEMPERATURE (°C)	HUMIDITE (%)	INSOLATION (h)	VENT (m/s)	RG (J/cm <sup>2</sup> )
19/12/2000	0	0.5	9	74.3	8.9	0.8	1170.2
20/12/2000	0.3	2.4	14.1	54.3	8.1	4.3	1089.7
21/12/2000	0.2	0.7	11.6	79.5	1.1	0.8	391.3
22/12/2000	0	2.3	12	61.1	2.7	4.9	550.7
23/12/2000	0	2.4	13.7	62.8	3	5.1	580.6
24/12/2000	0.3	4.4	16.8	47.1	0.4	6.3	321.5
25/12/2000	2.3	1.8	13.4	75.8	3.9	5.4	670.8
26/12/2000	2.2	1.6	15.8	68.1	0.2	2.4	302
27/12/2000	9.7	3	13.8	69.3	2.2	8.3	502.1
28/12/2000	0	3.5	14.2	63.1	3.9	8.4	672.7
29/12/2000	0	4.3	15.8	61.9	7.4	10.1	1023.9
30/12/2000	11.2	4.1	14.6	69.9	2.7	12.5	554.4
31/12/2000	0	2.9	10.1	61.1	8.3	8.1	1117.6
01/01/2001	0	0.3	8.2	80.9	8.1	0.0	1104.5
02/01/2001	0	1.3	11.6	72.3	6.9	3.5	985.9
03/01/2001	0	0.9	12.2	80.6	7.5	2.5	1049.5
04/01/2001	0	1.1	12.5	76.4	5.2	2.4	818.6
05/01/2001	0	0.7	13.7	78.5	6.8	0.4	984.5
06/01/2001	0	2.4	17.8	54.5	8.9	3.4	1202.6
07/01/2001	5.6	1	11.7	85.9	0	3.8	293.5
08/01/2001	6.3	1.2	9.5	80.3	8.4	5.3	1159.7
09/01/2001	0	0.6	8.1	74.1	9.2	1.0	1246.8
10/01/2001	0	0.6	11.6	75.5	9.1	0.0	1241.4
11/01/2001	0	1.8	13.5	61.3	8.6	3.4	1194.5
12/01/2001	0	1.4	11.6	63.6	0.3	1.9	332.5
13/01/2001	7.8	0.6	10.6	94.4	0	4.0	302.9
14/01/2001	41.4	0.7	11.9	93.9	0	4.9	304.8
15/01/2001	14.5	0.6	11.6	91.4	1.8	1.5	497.1
16/01/2001	1.5	0.8	10.7	85.9	4.5	2.3	786.9
17/01/2001	0	0.8	10.4	85.4	3.8	2.0	716.4
18/01/2001	0	0.6	9.8	84.9	1.5	0.4	473.7
19/01/2001	17.4	1.2	11	87.4	1.5	6.8	476.7
20/01/2001	1.7	1.3	11.4	83.9	8	4.8	1183.8
21/01/2001	1.8	0.8	10.5	81.6	9.7	1.0	1375.5
22/01/2001	0	0.6	9.3	83.3	9	0.0	1306.7
23/01/2001	0	1.4	12.9	72.3	8.8	2.4	1292.4
24/01/2001	0	1.8	14.2	68.1	7.4	2.9	1145.3
25/01/2001	0	1.1	12.7	80.5	4	1.8	774.3
26/01/2001	2	2.2	12.9	74.9	6.4	6.0	1047.7
27/01/2001	1.5	2.7	15	73.6	1.3	7.4	481.1
28/01/2001	6.4	2.3	14.2	80	5.1	8.1	914.3
29/01/2001	21.5	1.3	9.4	85.9	0.4	6.4	386.1
30/01/2001	8.1	1.1	9	87.5	4.2	5.3	823.8

31/01/2001	0	1.8	9.9	80.1	5.9	6.5	1025.2
01/02/2001	0	1.5	11	83.6	6.7	4.9	1124.7
02/02/2001	0	0.8	8.7	81.1	9.5	0.0	1458.4
03/02/2001	0	0.9	8.5	85.4	9.8	0.9	1503.3
04/02/2001	0	0.9	9.6	87.3	7.8	0.5	1277.8
05/02/2001	0	1.5	11.9	80.4	9.9	2.5	1535.5
06/02/2001	0	1.6	13.3	69.3	9.9	1.4	1546
07/02/2001	0	5.5	18.9	33.5	8.8	6.0	1424.7
08/02/2001	0	3.3	15.1	60.5	8.2	5.4	1362.2
09/02/2001	7	2.2	11.7	76.4	7.5	5.6	1286.7
10/02/2001	0	1.5	11.1	82.5	7.7	3.4	1320.3
11/02/2001	0	1.2	10.6	89.5	9.6	0.8	1563.4
12/02/2001	0	1.1	9.1	86.8	9.4	0.5	1549.6
13/02/2001	0	1.3	9.2	79.6	10.3	0.9	1672.5
14/02/2001	0.9	0.9	9.1	87.6	4.3	0.9	932.4
15/02/2001	12.5	0.9	11.3	91.4	2.5	1.5	712.6
16/02/2001	1.7	1.1	11.6	88.1	1.8	2.4	629.5
17/02/2001	8.1	0.9	11.8	93.3	2.1	1.6	673
18/02/2001	21.4	1.5	11.5	85.1	7.4	2.4	1359.2
19/02/2001	0	1.4	9	84.9	9.4	1.6	1627.5
20/02/2001	0	1.3	8.2	88.1	10.1	1.0	1729.9
21/02/2001	0	1.3	8	82.8	10.5	0.6	1794.2
22/02/2001	0	1.6	9.1	78.3	10.7	1.5	1832.9
23/02/2001	0	1.9	11.3	70	10.1	1.4	1766
24/02/2001	0.5	1.5	10.9	81.5	2.6	3.3	778.8
25/02/2001	9.1	1.7	11.4	85	4.9	4.3	1093.2
26/02/2001	0	1.7	8.8	81.9	8.7	2.5	1613.6
27/02/2001	5	1.1	7	88.3	2.2	3.6	743
28/02/2001	21.8	1.4	8.6	87.5	2.3	5.6	762.5
01/03/2001	11.2	2.3	11.9	76	7.2	3.9	1450.7
02/03/2001	0	3.8	19.1	54	4.5	4.0	1085.8
03/03/2001	0	4.1	18.1	64	9.8	4.8	1833.4
04/03/2001	0	3.2	18	65.9	9.6	2.5	1817.2
05/03/2001	0	2.7	16.6	73.3	8.3	2.4	1645.4
06/03/2001	0	2.4	17.5	80.3	8.9	0.4	1741.2
07/03/2001	0	3.1	18.1	72.5	7.2	3.3	1509.6
08/03/2001	1.8	4.7	16.8	64.3	8.8	6.9	1749
09/03/2001	0	3	14.8	77.4	8.8	4.4	1759.9
10/03/2001	0	2.5	15.3	80.6	7.7	2.8	1611.3
11/03/2001	0	2.9	17.7	82.8	9.5	2.0	1883.7
12/03/2001	0	3.1	17.4	75.6	10.2	2.1	1997.5
13/03/2001	0	3.4	16	76.1	9.2	4.3	1862
14/03/2001	0	2.4	10.7	80.6	10.8	1.8	2109.8
15/03/2001	0	1.7	14.8	80.4	3.5	0.4	1036.2
16/03/2001	0	3.4	19.6	64.3	3.8	3.5	1087.7

**Cinétique de quelques paramètres physiologiques du blé dur *triticum durum* (variété vitron) sous contrainte hydrique dans la plaine de la Mitidja**

17/03/2001	0	2.2	15.2	74.9	1.3	3.4	719.3
18/03/2001	0	2.6	14.2	82	8.5	2.0	1810.4
19/03/2001	0	2.8	13.7	79.8	11	1.5	2199.3
20/03/2001	0	2.9	14.5	74.6	10.7	1.0	2165.4
21/03/2001	0.5	3.8	16.9	64.8	9.6	3.1	2008.5
22/03/2001	0	3.7	18.6	63.9	9.5	2.0	2003.7
23/03/2001	0	3.9	21	60.1	11	0.8	2245.4
24/03/2001	0	7	24.3	37.8	9.6	4.8	2039.8
25/03/2001	0	4.9	18.3	60.4	8	5.3	1801.2
26/03/2001	0	2.6	14.5	72.6	3	3.4	1029.5
27/03/2001	0	3.3	14.4	75	11.1	1.9	2305.1
28/03/2001	0	2.4	14.3	81.6	5.5	2.4	1434.6
29/03/2001	0	3.5	13.9	73.5	6.7	5.4	1631.4
30/03/2001	0	4.2	16.2	68	7.1	5.5	1702.7
31/03/2001	0	4.1	14.5	69.6	10.4	4.5	2235.9
01/04/2001	0	3.1	12.4	78.9	10.5	2.0	2261.6
02/04/2001	0	3.3	13	78.8	11.3	2.0	2399.5
03/04/2001	0.5	3.1	12.7	83	10.3	2.4	2248.6
04/04/2001	0	2.9	15	80.8	6.2	3.1	1596.5
05/04/2001	0	4	15.8	75.3	11.1	3.3	2396.5
06/04/2001	0	3.7	15.9	74	11.6	1.1	2487
07/04/2001	0	3.2	16.9	76.6	5.8	3.3	1551.9
08/04/2001	0	4.9	15.5	68	11.3	5.3	2456.8
09/04/2001	0	3.7	13.9	70.1	11	2.0	2416.6
10/04/2001	0	4	13.5	66.6	11.9	2.5	2573.1
11/04/2001	0	3.6	13.8	75.3	9.2	3.4	2137.3
12/04/2001	1.6	3.3	13	77.6	8.5	3.0	2029.2
13/04/2001	0	3.6	12.9	77.3	9.5	3.6	2201.9
14/04/2001	0	4.1	12.7	75.8	11.1	4.6	2474.9
15/04/2001	0	3.6	11.8	75.9	11.5	2.4	2549.3
16/04/2001	0	3.7	14.4	66.5	11.3	0.8	2523.8
17/04/2001	0	3.9	15.1	71.3	11	1.6	2481.3
18/04/2001	0	2.4	15.1	80.8	3	2.3	1147.9
19/04/2001	0.7	2.5	13.9	84.3	3.8	3.3	1286.6
20/04/2001	2.3	2.4	15.5	84.1	3.5	2.3	1240.5
21/04/2001	6.3	3.2	12.7	81.8	7.6	3.4	1936.2
22/04/2001	0.8	4.6	13.5	73.8	12.3	4.4	2735.8
23/04/2001	0	5.9	19.1	66.3	12.3	4.5	2742.7
24/04/2001	0	4.9	18.8	73.6	12.2	2.1	2732.5
25/04/2001	0	4.8	19.5	74.3	8.9	4.3	2178.4
26/04/2001	0	4.1	18	84	8.9	3.8	2183.8
27/04/2001	6.1	1.8	17.8	91	1	2.3	842.6
28/04/2001	3	4.1	16.6	84.5	9.3	4.3	2262.4
29/04/2001	0	4.4	15.2	74.4	12.2	2.0	2763.2
30/04/2001	0	3.7	16.6	79.8	6.5	3.9	1793

---

01/05/2001	18.1	1.3	11.2	89.5	0	1.5	682.8
02/05/2001	1.6	2.4	11.9	86.6	5.6	0.9	1646.7
03/05/2001	0	3.1	13	81.1	7	2.4	1891
04/05/2001	6.4	3.1	12.4	82	6	4.3	1722.8
05/05/2001	1.4	4.1	15.5	73.1	6.3	4.9	1778.1
06/05/2001	0	4.5	15.8	75.1	10.2	3.4	2454.2
07/05/2001	0	4.4	15.1	79.6	11.8	2.3	2734.6
08/05/2001	0	5.1	16	76.8	12.4	4.4	2842.5
09/05/2001	0	5.9	21.6	59.9	8.2	4.4	2120.2
10/05/2001	0	4.1	17.5	72.5	3.9	5.5	1379.2
11/05/2001	0.9	3.6	16.3	79	4.2	5.5	1433.8
12/05/2001	0	4.7	17.3	79.5	12	2.0	2789.1
13/05/2001	0	4.7	18.2	82.5	11.4	1.9	2688.6
14/05/2001	0	6.4	21	61.5	11.1	4.1	2639.8
15/05/2001	0	3	19.1	62.6	2.2	1.3	1096.2
16/05/2001	0	4.7	20.2	70	7.3	3.1	1985.2
17/05/2001	0	4.6	20.8	75.6	8.6	2.3	2213.9
18/05/2001	0	3.7	20.5	82.1	3.4	5.6	1311.1
19/05/2001	0	3.4	18.4	78.6	0	7.9	720.8
20/05/2001	0	4.5	18.2	80.3	6.7	6.0	1890.2

### Annexe 3 : Temperatures du couvert (°C) - essai 2000

**Cinétique de quelques paramètres physiologiques du blé dur triticum durum (variété vitron) sous contrainte hydrique dans la plaine de la Mitidja**

J.A.S	ETM	MOD	SEV	SEC
71	17.08	17.30	19.58	19.88
72	16.33	16.55	20.17	20.28
73	16.33	16.63	20.80	21.10
74	18.67	18.23	21.95	22.37
75	21.97	21.77	24.95	25.50
76	23.95	23.13	27.18	27.25
77	21.40	20.28	23.93	24.13
80	15.72	15.55	18.06	18.23
81	16.48	16.28	17.80	18.02
82	16.80	17.17	18.02	18.25
83	16.60	16.93	17.25	17.45
84	16.10	16.58	17.60	17.90
88	18.20	19.33	20.60	20.82
89	15.63	16.05	17.80	17.97
91	19.72	20.07	19.90	23.22
94	17.40	20.28	17.93	22.18
95	17.05	19.77	16.98	22.20
96	20.15	22.83	20.45	26.83
98	18.97	21.04	18.40	24.50
100	16.97	18.87	16.70	20.43
101	20.10	21.90	18.73	24.18
105	19.62	22.57	19.25	22.77
108	18.18	21.57	17.53	21.55
110	20.22	25.45	21.08	26.59
113	19.77	24.48	19.83	24.20
115	23.67	27.03	23.90	28.95
117	23.50	24.25	26.38	30.85
118	19.67	20.43	23.05	27.47
119	20.40	20.15	23.65	27.55
120	21.05	20.13	24.22	26.65
121	21.77	20.95	25.18	27.50
122	23.07	22.30	26.82	28.18
125	22.25	23.20	28.87	29.28
126	21.10	21.60	27.60	28.05
127	19.87	19.92	25.72	27.00
128	27.50	28.13	32.20	32.67
130	20.30	24.27	28.77	29.62
131	20.40	24.45	27.52	28.10
132	20.97	24.85	26.38	27.50
133	22.00	25.45	26.35	26.93
134	20.18	23.52	24.60	24.38
136	21.90	26.80	25.42	25.20
138	21.20	27.47	27.25	26.95
139	21.42	27.72	26.38	26.32



## Annexe 4 : Temperatures du couvert (°C) - essai 2001

Date	ETM	MOD	PLU	SEV
10/03/2001	20.10	21.00	21.40	21.50
11/03/2001	27.40	28.30	28.45	28.90
12/03/2001	31.90	32.70	32.90	33.40
13/03/2001	22.50	22.45	23.80	22.65
14/03/2001	18.85	18.65	18.78	17.58
19/03/2001	22.33	23.03	21.90	23.25
20/03/2001	33.30	33.28	35.13	34.85
22/03/2001	24.50	26.55	26.55	26.68
23/03/2001	39.70	40.33	41.03	42.00
24/03/2001	32.60	35.63	36.20	37.03
27/03/2001	22.43	24.45	24.40	24.28
31/03/2001	19.58	22.73	20.80	22.75
01/04/2001	21.13	23.88	26.10	24.15
02/04/2001	25.85	24.95	27.18	26.50
03/04/2001	23.98	24.50	24.95	27.00
04/04/2001	28.75	28.88	28.85	28.53
05/04/2001	27.85	29.08	29.95	30.10
06/04/2001	27.73	27.28	28.08	31.78
07/04/2001	32.93	32.68	32.80	32.53
08/04/2001	23.90	25.00	24.30	26.55
09/04/2001	20.63	22.18	24.85	24.68
10/04/2001	28.50	31.00	32.38	33.48
11/04/2001	20.63	21.68	21.88	23.90
12/04/2001	18.70	18.18	17.85	20.30
13/04/2001	22.05	23.98	24.38	24.78
14/04/2001	21.78	23.53	22.40	23.98
15/04/2001	21.25	21.88	22.45	22.73
16/04/2001	28.58	28.78	30.08	28.78
17/04/2001	26.98	27.30	27.43	27.25
22/04/2001	21.23	21.78	22.60	23.98
23/04/2001	32.30	33.58	34.40	32.53
24/04/2001	27.65	29.25	30.90	32.53
29/04/2001	28.08	27.68	26.50	25.55

## **Annexe 5 : Teneur relative en eau RWC (%)- essai 2000**

Date	26/03/2000					
BLOC	TRAIT	REP	PDS F	PDS T	PDS S	RWC
1	ETM	1	0.100	0.900	0.009	10.213
1	ETM	2	0.120	0.170	0.032	63.768
1	ETM	3	0.150	0.200	0.020	72.222
1	ETM	4	0.170	0.200	0.037	81.595
1	ETM	5	0.290	0.320	0.047	89.011
2	ETM	1	0.209	0.320	0.028	61.986
2	ETM	2	0.330	0.430	0.054	73.404
2	ETM	3	0.380	0.450	0.066	81.771
2	ETM	4	0.480	0.580	0.100	79.167
2	ETM	5	0.610	0.740	0.120	79.032
3	ETM	1	0.490	0.540	0.057	89.648
3	ETM	2	0.500	0.790	0.105	57.664
3	ETM	3	0.540	0.680	0.071	77.011
3	ETM	4	0.589	0.700	0.088	81.863
3	ETM	5	0.609	0.800	0.109	72.359
1	ETR1	1	0.030	0.060	0.009	41.176
1	ETR1	2	0.130	0.180	0.012	70.238
1	ETR1	3	0.260	0.310	0.037	81.685
1	ETR1	4	0.380	0.500	0.080	71.429
1	ETR1	5	0.450	0.500	0.100	87.500
2	ETR1	1	0.090	0.150	0.050	40.000
2	ETR1	2	0.120	0.180	0.034	58.904
2	ETR1	3	0.160	0.180	0.019	87.578
2	ETR1	4	0.190	0.220	0.035	83.784
2	ETR1	5	0.209	0.270	0.041	73.362
3	ETR1	1	0.039	0.080	0.004	46.053
3	ETR1	2	0.039	0.060	0.009	58.824
3	ETR1	3	0.050	0.090	0.008	51.220
3	ETR1	4	0.060	0.100	0.010	55.556
1	ETR2	1	0.090	0.130	0.013	65.812
1	ETR2	2	0.100	0.180	0.012	52.381
1	ETR2	3	0.130	0.190	0.027	63.190
1	ETR2	4	0.140	0.190	0.003	73.262
1	ETR2	5	0.210	0.240	0.052	84.043
2	ETR2	1	0.040	0.060	0.006	62.963
2	ETR2	2	0.100	0.200	0.014	46.237
2	ETR2	3	0.120	0.230	0.017	48.357
2	ETR2	4	0.125	0.230	0.024	49.029
2	ETR2	5	0.200	0.310	0.042	58.955
3	ETR2	1	0.049	0.100	0.018	37.805
3	ETR2	2	0.080	0.160	0.020	42.857
3	ETR2	3	0.110	0.190	0.026	51.220
3	ETR2	4	0.300	0.480	0.150	45.455

**Cinétique de quelques paramètres physiologiques du blé dur *triticum durum* (variété vitron) sous contrainte hydrique dans la plaine de la Mitidja**

1	SEC	1	0.090	0.120	0.019	70.297
1	SEC	2	0.160	0.180	0.020	87.500
1	SEC	3	0.160	0.180	0.023	87.261
1	SEC	4	0.220	0.240	0.055	89.189
1	SEC	5	0.280	0.310	0.055	88.235
2	SEC	1	0.020	0.070	0.003	25.373
2	SEC	2	0.080	0.100	0.023	74.026
2	SEC	3	0.110	0.140	0.019	75.207
2	SEC	4	0.120	0.160	0.021	71.223
3	SEC	1	0.060	0.120	0.007	46.903
3	SEC	2	0.250	0.380	0.055	60.000
3	SEC	3	0.390	0.520	0.083	70.252
3	SEC	4	0.400	0.540	0.075	69.892
Date	03/04/2000					
BLOC	PARCELLE	REP	PDS F	PDS T	PDS S	RWC
1	ETM	1	0.073	0.098	0.009	71.910
1	ETM	2	0.271	0.298	0.043	89.412
1	ETM	3	0.434	0.500	0.113	82.946
1	ETM	4	0.442	0.514	0.099	82.651
2	ETM	1	0.079	0.134	0.013	54.545
2	ETM	2	0.159	0.239	0.043	59.184
2	ETM	3	0.333	0.423	0.082	73.607
2	ETM	4	0.585	0.658	0.150	85.630
3	ETM	1	0.208	0.249	0.046	79.803
3	ETM	2	0.354	0.456	0.059	74.307
3	ETM	3	0.408	0.506	0.096	76.098
1	ETR1	1	0.028	0.037	0.009	67.857
1	ETR1	2	0.167	0.216	0.041	72.000
1	ETR1	3	0.205	0.218	0.047	92.398
1	ETR1	4	0.264	0.363	0.071	66.096
1	ETR1	5	0.383	0.407	0.094	92.332
2	ETR1	1	0.021	0.036	0.006	50.000
2	ETR1	2	0.025	0.055	0.006	38.776
2	ETR1	3	0.055	0.128	0.016	34.821
2	ETR1	4	0.083	0.128	0.024	56.731
3	ETR1	1	0.136	0.187	0.040	65.306
3	ETR1	2	0.176	0.233	0.057	67.614
3	ETR1	3	0.229	0.359	0.073	54.545
1	ETR2	1	0.060	0.087	0.016	61.972
1	ETR2	2	0.266	0.294	0.063	87.879
1	ETR2	3	0.271	0.338	0.086	73.413
2	ETR2	1	0.018	0.030	0.005	52.000
2	ETR2	2	0.085	0.111	0.026	69.412
2	ETR2	3	0.232	0.316	0.066	66.400

2	ETR2	4	0.249	0.319	0.080	70.711
3	ETR2	1	0.113	0.234	0.005	47.162
3	ETR2	2	0.219	0.363	0.034	56.231
3	ETR2	3	0.371	0.393	0.072	93.146
3	ETR2	4	0.386	0.444	0.069	84.533
1	SEC	1	0.032	0.062	0.009	43.396
1	SEC	2	0.107	0.189	0.026	49.693
1	SEC	3	0.155	0.175	0.044	84.733
1	SEC	4	0.190	0.219	0.052	82.635
2	SEC	1	0.025	0.047	0.008	43.590
2	SEC	2	0.078	0.113	0.026	59.770
3	SEC	1	0.022	0.051	0.013	23.684
3	SEC	2	0.028	0.048	0.007	51.220
3	SEC	3	0.029	0.091	0.016	17.333
3	SEC	4	0.052	0.072	0.022	60.000
Date	10/04/2000					
BLOC	PARCELLE	REP	PDS F	PDS T	PDS S	RWC
1	ETM	1	0.009	0.014	0.002	58.333
1	ETM	2	0.015	0.090	0.005	11.765
1	ETM	3	0.190	0.277	0.033	64.344
1	ETM	4	0.383	0.569	0.069	62.800
1	ETM	5	0.394	0.493	0.091	75.373
2	ETM	1	0.167	0.295	0.022	53.114
2	ETM	2	0.212	0.346	0.061	52.982
2	ETM	3	0.241	0.522	0.052	40.213
3	ETM	1	0.084	0.125	0.019	61.321
3	ETM	2	0.172	0.318	0.025	50.171
3	ETM	3	0.204	0.357	0.055	49.338
3	ETM	4	0.247	0.452	0.045	49.631
1	ETR1	1	0.016	0.030	0.011	26.316
1	ETR1	2	0.134	0.160	0.039	78.512
1	ETR1	3	0.147	0.240	0.033	55.072
2	ETR1	1	0.031	0.100	0.007	25.806
2	ETR1	2	0.036	0.050	0.008	66.667
2	ETR1	3	0.041	0.108	0.012	30.208
2	ETR1	4	0.049	0.134	0.014	29.167
2	ETR1	5	0.054	0.139	0.010	34.109
2	ETR1	6	0.058	0.120	0.015	40.952
3	ETR1	1	0.067	0.157	0.013	37.500
3	ETR1	2	0.081	0.187	0.063	14.516
3	ETR1	3	0.085	0.183	0.020	39.877
3	ETR1	4	0.214	0.387	0.059	47.256
1	ETR2	1	0.007	0.017	0.002	33.333
1	ETR2	2	0.074	0.131	0.023	47.222

**Cinétique de quelques paramètres physiologiques du blé dur triticum durum (variété vitron) sous contrainte hydrique dans la plaine de la Mitidja**

1	ETR2	3	0.089	0.193	0.025	38.095
1	ETR2	4	0.217	0.336	0.060	56.884
2	ETR2	1	0.080	0.185	0.023	35.185
2	ETR2	2	0.185	0.375	0.056	40.439
2	ETR2	3	0.215	0.382	0.057	48.615
3	ETR2	1	0.128	0.211	0.030	54.144
3	ETR2	2	0.147	0.352	0.026	37.117
1	SEC	1	0.008	0.016	0.003	38.462
1	SEC	2	0.041	0.142	0.013	21.705
1	SEC	3	0.059	0.197	0.016	23.757
1	SEC	4	0.110	0.250	0.034	35.185
2	SEC	1	0.030	0.100	0.011	21.348
2	SEC	2	0.086	0.143	0.038	45.714
2	SEC	3	0.100	0.213	0.030	38.251
2	SEC	4	0.195	0.225	0.025	85.000
3	SEC	1	0.071	0.192	0.017	30.857
3	SEC	2	0.109	0.200	0.038	43.827
3	SEC	3	0.176	0.273	0.053	55.909
Date	12/04/2000					
BLOC	PARCELLE	REP	PDS F	PDS T	PDS S	RWC
1	ETM	1	0.026	0.076	0.015	18.033
1	ETM	2	0.045	0.151	0.021	18.462
1	ETM	3	0.047	0.118	0.020	27.551
2	ETM	1	0.040	0.113	0.013	27.000
2	ETM	2	0.056	0.160	0.034	17.460
2	ETM	3	0.078	0.166	0.036	32.308
3	ETM	1	0.100	0.205	0.040	36.364
3	ETM	2	0.189	0.268	0.046	64.414
1	ETR1	1	0.018	0.062	0.009	16.981
1	ETR1	2	0.057	0.136	0.027	27.523
1	ETR1	3	0.066	0.252	0.033	15.068
2	ETR1	1	0.022	0.066	0.007	25.424
2	ETR1	2	0.025	0.072	0.011	22.951
2	ETR1	3	0.057	0.122	0.021	35.644
2	ETR1	4	0.078	0.166	0.027	36.691
3	ETR1	1	0.020	0.058	0.008	24.000
3	ETR1	2	0.052	0.100	0.025	36.000
3	ETR1	3	0.059	0.144	0.028	26.724
3	ETR1	4	0.060	0.161	0.022	27.338
1	ETR2	1	0.048	0.148	0.020	21.875
1	ETR2	2	0.066	0.216	0.035	17.127
2	ETR2	1	0.036	0.119	0.012	22.430
2	ETR2	2	0.046	0.116	0.019	27.835
2	ETR2	3	0.051	0.162	0.022	20.714

2	ETR2	4	0.067	0.186	0.033	22.222
3	ETR2	1	0.019	0.060	0.010	18.000
3	ETR2	2	0.042	0.148	0.023	15.200
3	ETR2	3	0.042	0.091	0.033	15.517
3	ETR2	4	0.077	0.128	0.032	46.875
1	SEC	1	0.029	0.117	0.016	12.871
1	SEC	2	0.077	0.126	0.023	52.427
1	SEC	3	0.080	0.190	0.029	31.677
1	SEC	4	0.100	0.198	0.039	38.365
2	SEC	1	0.022	0.068	0.010	20.690
2	SEC	2	0.022	0.057	0.008	28.571
2	SEC	3	0.042	0.086	0.011	41.333
2	SEC	4	0.079	0.166	0.036	33.077
3	SEC	1	0.026	0.122	0.012	12.727
3	SEC	2	0.031	0.106	0.017	15.730
3	SEC	3	0.052	0.162	0.024	20.290
Date	19/04/2000					
BLOC	PARCELLE	REP	PDS F	PDS T	PDS S	RWC
1	ETM	1	0.081	0.177	0.012	41.818
1	ETM	2	0.109	0.224	0.023	42.786
1	ETM	3	0.163	0.255	0.047	55.769
1	ETM	4	0.184	0.328	0.037	50.515
2	ETM	1	0.041	0.092	0.007	40.000
2	ETM	2	0.060	0.107	0.012	50.526
2	ETM	3	0.171	0.229	0.028	71.144
2	ETM	4	0.213	0.254	0.048	80.097
3	ETM	1	0.017	0.069	0.007	16.129
3	ETM	2	0.088	0.220	0.036	28.261
3	ETM	3	0.107	0.242	0.028	36.916
1	ETR1	1	0.144	0.261	0.029	49.569
1	ETR1	2	0.157	0.256	0.038	54.587
2	ETR1	1	0.035	0.080	0.009	36.620
2	ETR1	2	0.077	0.207	0.022	29.730
2	ETR1	3	0.077	0.172	0.021	37.086
2	ETR1	4	0.106	0.140	0.027	69.912
3	ETR1	1	0.137	0.325	0.027	36.913
3	ETR1	2	0.233	0.328	0.050	65.827
1	ETR2	1	0.060	0.146	0.012	35.821
1	ETR2	2	0.062	0.154	0.008	36.986
1	ETR2	3	0.159	0.239	0.026	62.441
1	ETR2	4	0.208	0.326	0.039	58.885
1	ETR2	5	0.211	0.373	0.050	49.845
2	ETR2	1	0.089	0.266	0.030	25.000
2	ETR2	2	0.224	0.340	0.048	60.274

**Cinétique de quelques paramètres physiologiques du blé dur *triticum durum* (variété vitron) sous contrainte hydrique dans la plaine de la Mitidja**

2	ETR2	3	0.279	0.367	0.060	71.336
3	ETR2	1	0.033	0.083	0.006	35.065
3	ETR2	2	0.087	0.129	0.022	60.748
1	SEC	1	0.047	0.116	0.012	33.654
1	SEC	2	0.071	0.136	0.017	45.378
1	SEC	3	0.190	0.341	0.054	47.387
2	SEC	1	0.100	0.157	0.019	58.696
2	SEC	2	0.110	0.237	0.027	39.524
2	SEC	3	0.118	0.168	0.029	64.029
3	SEC	1	0.076	0.266	0.023	21.811
3	SEC	2	0.169	0.267	0.039	57.018
Date	25/04/2000					
BLOC	PARCELLE	REP	PDS F	PDS T	PDS S	RWC
1	ETM	1	0.117	0.196	0.024	54.070
1	ETM	2	0.179	0.271	0.030	61.826
1	ETM	3	0.249	0.337	0.069	67.164
2	ETM	1	0.118	0.209	0.022	51.337
2	ETM	2	0.119	0.199	0.019	55.556
2	ETM	3	0.152	0.305	0.026	45.161
2	ETM	4	0.157	0.264	0.046	50.917
3	ETM	1	0.054	0.121	0.017	35.577
3	ETM	2	0.080	0.158	0.019	43.885
3	ETM	3	0.157	0.216	0.044	65.698
1	ETR1	1	0.122	0.179	0.034	60.690
1	ETR1	2	0.152	0.213	0.050	62.577
1	ETR1	3	0.160	0.190	0.089	70.297
2	ETR1	1	0.100	0.162	0.023	55.396
2	ETR1	2	0.122	0.186	0.027	59.748
2	ETR1	3	0.141	0.216	0.024	60.938
3	ETR1	1	0.053	0.108	0.018	38.889
3	ETR1	2	0.072	0.248	0.029	19.635
1	ETR2	1	0.107	0.250	0.035	33.488
1	ETR2	2	0.133	0.231	0.031	51.000
2	ETR2	1	0.125	0.209	0.020	55.556
2	ETR2	2	0.158	0.270	0.034	52.542
2	ETR2	3	0.190	0.269	0.043	65.044
3	ETR2	1	0.116	0.222	0.013	49.282
3	ETR2	2	0.157	0.263	0.025	55.462
3	ETR2	3	0.199	0.286	0.053	62.661
1	SEC	1	0.100	0.200	0.020	44.444
1	SEC	2	0.135	0.200	0.035	60.606
2	SEC	1	0.124	0.201	0.027	55.747
2	SEC	2	0.158	0.235	0.026	63.158
3	SEC	1	0.095	0.156	0.021	54.815



---

3	SEC	2	0.112	0.254	0.027	37.445
3	SEC	3	0.156	0.302	0.041	44.061

## **Annexe 6 : Teneur relative en eau RWC (%) - essai 2001**

**Cinétique de quelques paramètres physiologiques du blé dur *triticum durum* (variété vitron) sous contrainte hydrique dans la plaine de la Mitidja**

Date	10/03/2001					
Stade	Montaison					
BLOC	TRAIT	REP	PDS F	PDS T	PDS S	RWC
1	ETM	1	0.52	0.63	0.10	79.25
1	ETM	2	0.55	0.67	0.12	78.18
1	ETM	3	0.69	0.81	0.16	81.54
1	ETM	4	0.63	0.74	0.15	81.36
1	ETM	5	0.87	0.96	0.20	88.16
1	ETM	6	0.52	0.59	0.11	85.42
2	ETM	1	0.84	1.02	0.19	78.31
2	ETM	2	0.61	0.71	0.12	83.05
2	ETM	3	1.16	1.34	0.29	82.86
2	ETM	4	0.66	0.80	0.15	78.46
2	ETM	5	0.66	0.79	0.17	79.03
2	ETM	6	0.64	0.70	0.14	89.29
1	MOD	1	0.74	0.92	0.17	76.00
1	MOD	2	0.80	0.96	0.18	79.49
1	MOD	3	0.42	0.48	0.08	85.00
1	MOD	4	0.60	0.83	0.17	65.15
1	MOD	5	0.55	0.72	0.19	67.92
1	MOD	6	0.73	0.92	0.18	74.32
2	MOD	1	0.74	0.87	0.17	81.43
2	MOD	2	1.05	1.19	0.22	85.57
2	MOD	3	0.52	0.57	0.12	88.89
2	MOD	4	0.87	0.99	0.20	84.81
2	MOD	5	0.96	1.10	0.21	84.27
2	MOD	6	0.92	1.10	0.21	79.78
1	PLU	1	0.86	0.98	0.19	84.81
1	PLU	2	0.34	0.43	0.08	74.29
1	PLU	3	0.64	0.76	0.15	80.33
1	PLU	4	0.62	0.85	0.16	66.67
1	PLU	5	0.78	0.95	0.18	77.92
1	PLU	6	0.37	0.51	0.09	66.67
2	PLU	1	1.05	1.23	0.25	81.63
2	PLU	2	0.69	0.90	0.18	70.83
2	PLU	3	0.90	1.70	0.21	46.31
2	PLU	4	0.73	0.77	0.14	93.65
2	PLU	5	0.92	1.01	0.20	88.89
2	PLU	6	0.91	1.03	0.19	85.71
1	SEV	1	0.88	1.09	0.22	75.86
1	SEV	2	0.42	0.50	0.11	79.49
1	SEV	3	0.77	0.87	0.18	85.51
1	SEV	4	0.72	0.91	0.19	73.61
1	SEV	5	0.72	0.92	0.15	74.03
1	SEV	6	0.86	1.00	0.20	82.50

2	SEV	1	0.70	0.79	0.17	85.48
2	SEV	2	0.69	0.75	0.16	89.83
2	SEV	3	0.76	0.81	0.16	92.31
2	SEV	4	0.96	1.07	0.21	87.21
2	SEV	5	0.89	0.96	0.17	91.14
2	SEV	6	0.62	0.66	0.13	92.45
Date	24/03/2001					
Stade	Gonflement					
BLOC	TRAIT	REP	PDS F	PDS T	PDS S	RWC
1	ETM	1	0.43	0.55	0.11	72.73
1	ETM	2	0.60	0.76	0.15	73.77
1	ETM	3	0.63	0.84	0.16	69.12
1	ETM	4	0.87	1.16	0.21	69.47
1	ETM	5	0.72	0.92	0.19	72.60
1	ETM	6	0.52	0.69	0.14	69.09
2	ETM	1	0.30	0.46	0.08	57.89
2	ETM	2	0.49	0.66	0.14	67.31
2	ETM	3	0.41	0.55	0.12	67.44
2	ETM	4	0.88	1.15	0.22	70.97
2	ETM	5	0.40	0.55	0.09	67.39
2	ETM	6	0.60	0.83	0.17	65.15
1	MOD	1	0.74	0.90	0.20	77.14
1	MOD	2	0.73	0.95	0.19	71.05
1	MOD	3	0.38	0.45	0.10	80.00
1	MOD	4	0.53	0.69	0.19	68.00
1	MOD	5	0.42	0.52	0.09	76.74
1	MOD	6	0.42	0.53	0.10	74.42
2	MOD	1	0.55	0.84	0.15	57.97
2	MOD	2	0.60	0.95	0.18	54.55
2	MOD	3	0.41	0.57	0.10	65.96
2	MOD	4	0.52	0.67	0.12	72.73
2	MOD	5	0.48	0.65	0.12	67.92
2	MOD	6	0.67	0.83	0.17	75.76
1	PLU	1	0.43	0.58	0.10	68.75
1	PLU	2	0.39	0.50	0.08	73.81
1	PLU	3	0.59	0.77	0.13	71.88
1	PLU	4	0.68	0.92	0.16	68.42
1	PLU	5	0.53	0.70	0.13	70.18
1	PLU	6	0.64	0.90	0.14	65.79
2	PLU	1	0.58	0.80	0.13	67.16
2	PLU	2	0.48	0.68	0.10	65.52
2	PLU	3	0.54	0.69	0.13	73.21
2	PLU	4	0.43	0.64	0.09	61.82
2	PLU	5	0.49	0.68	0.11	66.67

**Cinétique de quelques paramètres physiologiques du blé dur *triticum durum* (variété vitron) sous contrainte hydrique dans la plaine de la Mitidja**

2	PLU	6	0.56	0.73	0.14	71.19
1	SEV	1	0.60	0.88	0.15	61.64
1	SEV	2	0.62	0.81	0.17	70.31
1	SEV	3	0.49	0.70	0.12	63.79
1	SEV	4	0.50	0.68	0.13	67.27
1	SEV	5	0.38	0.50	0.11	69.23
1	SEV	6	0.47	0.64	0.13	66.67
2	SEV	1	0.45	0.67	0.09	62.07
2	SEV	2	0.56	0.82	0.14	61.76
2	SEV	3	0.55	0.82	0.13	60.87
2	SEV	4	0.44	0.58	0.13	68.89
2	SEV	5	0.39	0.54	0.10	65.91
2	SEV	6	0.31	0.43	0.07	66.67
Date	01/04/2001					
Stade	Epiaison					
BLOC	TRAIT	REP	PDS F	PDS T	PDS S	RWC
1	ETM	1	0.36	0.53	0.12	58.54
1	ETM	2	0.46	0.61	0.12	69.39
1	ETM	3	0.73	1.04	0.20	63.10
1	ETM	4	0.66	1.04	0.20	54.76
1	ETM	5	0.76	1.09	0.21	62.50
1	ETM	6	0.59	0.81	0.16	66.15
2	ETM	1	0.96	1.48	0.27	57.02
2	ETM	2	1.22	1.55	0.25	74.62
2	ETM	3	1.01	1.36	0.21	69.57
2	ETM	4	0.99	1.42	0.27	62.61
2	ETM	5	1.00	1.49	0.32	58.12
2	ETM	6	0.81	1.10	0.25	65.88
1	MOD	1	0.66	0.92	0.20	63.89
1	MOD	2	0.70	1.12	0.19	54.84
1	MOD	3	0.37	0.55	0.16	53.85
1	MOD	4	0.85	1.25	0.19	62.26
1	MOD	5	0.69	0.96	0.15	66.67
1	MOD	6	0.84	1.14	0.18	68.75
2	MOD	1	0.75	1.00	0.20	68.75
2	MOD	2	0.79	1.09	0.17	67.39
2	MOD	3	0.65	0.92	0.16	64.47
2	MOD	4	1.02	1.49	0.27	61.48
2	MOD	5	0.86	1.35	0.24	55.86
2	MOD	6	0.57	0.88	0.13	58.67
1	PLU	1	0.60	0.83	0.14	66.67
1	PLU	2	0.92	1.27	0.20	67.29
1	PLU	3	0.79	1.04	0.25	68.35
1	PLU	4	0.75	1.02	0.22	66.25

1	PLU	5	0.58	0.81	0.17	64.06
1	PLU	6	0.79	1.15	0.23	60.87
2	PLU	1	0.70	0.97	0.17	66.25
2	PLU	2	1.06	1.37	0.32	70.48
2	PLU	3	0.98	1.35	0.26	66.06
2	PLU	4	1.21	1.71	0.30	64.54
2	PLU	5	1.09	1.49	0.21	68.75
2	PLU	6	0.66	0.88	0.17	69.01
1	SEV	1	0.89	1.29	0.29	60.00
1	SEV	2	0.52	0.80	0.19	54.10
1	SEV	3	0.57	0.92	0.20	51.39
1	SEV	4	0.70	0.99	0.18	64.20
1	SEV	5	0.70	0.97	0.16	66.67
1	SEV	6	0.65	0.94	0.17	62.34
2	SEV	1	1.03	1.27	0.27	76.00
2	SEV	2	0.96	1.28	0.26	68.63
2	SEV	3	0.78	1.05	0.19	68.60
2	SEV	4	1.00	1.44	0.27	62.39
2	SEV	5	1.06	1.56	0.34	59.02
2	SEV	6	0.78	1.08	0.25	63.86
Date	07/04/2001					
Stade	Floraison					
BLOC	TRAIT	REP	PDS F	PDS T	PDS S	RWC
1	ETM	1	0.68	0.83	0.20	76.19
1	ETM	2	0.54	0.66	0.14	76.92
1	ETM	3	0.83	0.96	0.23	82.19
1	ETM	4	0.89	1.09	0.25	76.19
1	ETM	5	0.87	0.95	0.21	89.19
1	ETM	6	0.92	1.02	0.26	86.84
2	ETM	1	0.65	0.74	0.15	84.75
2	ETM	2	0.70	0.65	0.14	109.80
2	ETM	3	0.56	0.78	0.14	65.63
2	ETM	4	0.84	0.99	0.23	80.26
2	ETM	5	1.16	1.39	0.24	80.00
2	ETM	6	0.83	0.96	0.20	82.89
1	MOD	1	0.87	0.84	0.21	104.76
1	MOD	2	0.57	0.73	0.16	71.93
1	MOD	3	0.57	0.72	0.17	72.73
1	MOD	4	0.90	1.08	0.20	79.55
1	MOD	5	0.75	0.92	0.19	76.71
1	MOD	6	0.62	0.71	0.16	83.64
2	MOD	1	0.66	0.84	0.19	72.31
2	MOD	2	0.76	0.92	0.20	77.78
2	MOD	3	0.82	0.90	0.16	89.19

**Cinétique de quelques paramètres physiologiques du blé dur triticum durum (variété vitron) sous contrainte hydrique dans la plaine de la Mitidja**

2	MOD	4	0.63	0.73	0.19	81.48
2	MOD	5	0.68	0.77	0.17	85.00
2	MOD	6	0.65	0.78	0.17	78.69
1	PLU	1	0.73	0.83	0.21	83.87
1	PLU	2	0.58	0.76	0.16	70.00
1	PLU	3	0.56	0.71	0.17	72.22
1	PLU	4	0.59	0.88	0.19	57.97
1	PLU	5	0.60	0.92	0.20	55.56
1	PLU	6	0.89	1.20	0.23	68.04
2	PLU	1	0.64	0.98	0.17	58.02
2	PLU	2	0.63	0.89	0.20	62.32
2	PLU	3	0.87	1.13	0.23	71.11
2	PLU	4	0.84	1.01	0.20	79.01
2	PLU	5	0.69	0.79	0.21	82.76
2	PLU	6	0.90	1.05	0.24	81.48
1	SEV	1	0.61	0.80	0.19	68.85
1	SEV	2	0.83	0.97	0.26	80.28
1	SEV	3	0.66	0.93	0.22	61.97
1	SEV	4	0.59	0.74	0.17	73.68
1	SEV	5	0.70	0.82	0.17	81.54
1	SEV	6	1.18	1.29	0.32	88.66
2	SEV	1	0.69	0.99	0.20	62.03
2	SEV	2	0.70	0.95	0.23	65.28
2	SEV	3	0.50	0.68	0.15	66.04
2	SEV	4	0.44	0.61	0.12	65.31
2	SEV	5	0.89	1.30	0.23	61.68
2	SEV	6	0.55	0.70	0.17	71.70
Date	14/04/2001					
Stade	Grain Laiteux					
BLOC	TRAIT	REP	PDS F	PDS T	PDS S	RWC
1	ETM	1	0.88	1.09	0.26	74.70
1	ETM	2	0.61	0.78	0.19	71.19
1	ETM	3	1.12	1.39	0.35	74.04
1	ETM	4	0.77	0.99	0.24	70.67
1	ETM	5	0.73	0.89	0.23	75.76
1	ETM	6	0.85	1.08	0.27	71.60
2	ETM	1	0.74	0.92	0.22	74.29
2	ETM	2	0.68	0.93	0.21	65.28
2	ETM	3	0.77	0.99	0.25	70.27
2	ETM	4	0.84	1.05	0.24	74.07
2	ETM	5	0.87	1.10	0.24	73.26
2	ETM	6	0.84	1.02	0.28	75.68
1	MOD	1	0.64	0.86	0.19	67.16
1	MOD	2	0.53	0.67	0.19	70.83

1	MOD	3	0.59	0.72	0.16	76.79
1	MOD	4	0.62	0.80	0.19	70.49
1	MOD	5	0.86	1.09	0.25	72.62
1	MOD	6	0.70	0.88	0.24	71.88
2	MOD	1	0.78	1.02	0.27	68.00
2	MOD	2	0.67	0.89	0.25	65.63
2	MOD	3	0.76	1.05	0.26	63.29
2	MOD	4	1.04	1.42	0.37	63.81
2	MOD	5	0.88	1.20	0.26	65.96
2	MOD	6	0.67	0.80	0.20	78.33
1	PLU	1	0.96	1.22	0.31	71.43
1	PLU	2	0.82	1.01	0.31	72.86
1	PLU	3	0.83	1.09	0.28	67.90
1	PLU	4	0.83	1.12	0.27	65.88
1	PLU	5	0.95	1.17	0.34	73.49
1	PLU	6	0.71	0.98	0.23	64.00
2	PLU	1	0.77	1.08	0.29	60.76
2	PLU	2	0.99	1.49	0.35	56.14
2	PLU	3	0.73	1.15	0.29	51.16
2	PLU	4	0.56	0.85	0.23	53.23
2	PLU	5	0.67	1.05	0.25	52.50
2	PLU	6	0.83	1.23	0.29	57.45
1	SEV	1	0.85	1.01	0.29	77.78
1	SEV	2	0.80	1.04	0.30	67.57
1	SEV	3	0.50	0.66	0.19	65.96
1	SEV	4	1.02	1.26	0.29	75.26
1	SEV	5	0.74	1.04	0.23	62.96
1	SEV	6	0.90	1.32	0.31	58.42
2	SEV	1	0.67	0.76	0.22	83.33
2	SEV	2	0.62	0.72	0.22	80.00
2	SEV	3	0.76	0.92	0.25	76.12
2	SEV	4	0.62	0.88	0.22	60.61
2	SEV	5	0.58	0.94	0.23	49.30
2	SEV	6	0.74	1.16	0.29	51.72

## Annexe 7 : Indice foliaire lai - essai 2000

**Cinétique de quelques paramètres physiologiques du blé dur *triticum durum* (variété vitron) sous contrainte hydrique dans la plaine de la Mitidja**

	ETM		
DATE	BLOC 1	BLOC 2	BLOC 3
01/03/2000	1.43		
12/03/2000	3.29	2.33	1.94
20/03/2000	4.11	4.50	5.98
26/03/2000	9.77	10.06	10.65
03/04/2000	7.17	8.90	8.60
10/04/2000	6.22	5.20	6.75
18/04/2000	4.33	5.08	4.42
25/04/2000	3.12	2.78	3.04
02/05/2000	1.47	1.48	2.93
07/05/2000	0.80	0.74	1.54
	SEV		
DATES	BLOC 1	BLOC 2	BLOC 3
01/03/2000	1.02		
12/03/2000	4.00	2.62	2.86
20/03/2000	8.90	3.96	4.85
26/03/2000	7.68	4.77	7.53
03/04/2000	4.99	9.90	6.04
10/04/2000	3.55	9.77	3.07
18/04/2000	1.97	3.12	0.32
25/04/2000	1.80	0.85	
02/05/2000	1.00	0.95	
	MOD		
DATES	BLOC 1	BLOC 2	BLOC 3
01/03/2000	1.12		
12/03/2000	3.49	2.18	2.64
20/03/2000	3.89	3.19	4.78
26/03/2000	5.22	5.35	7.74
03/04/2000	4.73	3.70	4.92
10/04/2000	3.99	2.35	2.27
18/04/2000	2.44	1.50	1.26
25/04/2000	1.35	0.60	0.64
02/05/2000	0.92		0.15
	PLU		
DATES	BLOC 1	BLOC 2	BLOC 3
01/03/2000	1.08		
12/03/2000	2.13	2.02	0.39
20/03/2000	2.50	2.06	4.64
26/03/2000	3.63	3.15	2.91
03/04/2000	3.04	2.93	1.78
10/04/2000	1.45	2.75	0.38
18/04/2000	1.53	1.41	0.18
25/04/2000	0.74	0.99	



## **Annexe 8 : Indice foliaire lai - essai 2001**

**Cinétique de quelques paramètres physiologiques du blé dur triticum durum (variété vitron) sous contrainte hydrique dans la plaine de la Mitidja**

	ETM			
Date	BLOC 1	BLOC 2	BLOC 3	BLOC 4
20/02/2001	1.36	1.36	1.36	1.36
03/03/2001	1.88	2.28	3.08	3.49
10/03/2001	3.84	3.89	4.74	5.44
19/03/2001	4.55	4.31	5.05	8.82
25/03/2001	7.05	5.97	8.01	9.46
02/04/2001	3.96	4.40	5.10	8.82
08/04/2001	3.55	3.80	4.74	5.74
17/04/2001	2.13	2.67	2.67	3.76
	MOD			
Date	BLOC 1	BLOC 2	BLOC 3	BLOC 4
20/02/2001	1.36	1.36	1.36	1.36
03/03/2001	1.44	1.78	2.02	3.32
10/03/2001	3.10	2.48	4.42	4.23
19/03/2001	5.86	3.27	5.72	4.29
25/03/2001	4.51	5.44	5.95	6.77
02/04/2001	3.10	2.59	5.73	
08/04/2001	2.26	2.25	4.87	3.31
17/04/2001	2.11	2.00	1.22	1.95
	SEV			
Date	BLOC 1	BLOC 2	BLOC 3	BLOC 4
20/02/2001	1.36	1.36	1.36	1.36
03/03/2001	3.26	2.12	2.26	3.09
10/03/2001	3.50	2.67	2.81	4.05
19/03/2001	4.93	5.18	4.08	4.29
25/03/2001	6.61	4.43	4.79	6.28
02/04/2001	4.40	2.04	4.25	4.78
08/04/2001	3.88	1.98	2.65	3.56
17/04/2001	2.02	1.13	2.07	1.821
	PLU			
Date	BLOC 1	BLOC 2	BLOC 3	BLOC 4
20/02/2001	1.36	1.36	1.36	1.36
03/03/2001	1.97	2.83	3.47	2.77
10/03/2001	3.44	4.65	4.63	4.93
19/03/2001	3.99	5.64	7.94	5.75
25/03/2001	7.05	4.27	7.94	6.16
02/04/2001	7.04	2.90	5.79	5.75
08/04/2001	2.99	1.56	2.51	3.87
17/04/2001	1.42	0.81	2.09	3.63

## **Annexe 9 : Hauteur de tige (cm) - essai 2000**

**Cinétique de quelques paramètres physiologiques du blé dur triticum durum (variété vitron) sous contrainte hydrique dans la plaine de la Mitidja**

	ETM		
DATE	BLOC 1	BLOC 2	BLOC 3
01/03/2000	14.5		
12/03/2000	20.0	24.0	21.0
20/03/2000	40.0	36.0	37.7
26/03/2000	45.0	41.5	47.3
03/04/2000	53.0	57.0	57.0
10/04/2000	70.0	61.0	63.5
18/04/2000	73.0	79.0	79.0
25/04/2000	77.0	80.0	79.9
02/05/2000	89.0	82.0	85.5
	SEV		
DATE	BLOC 1	BLOC 2	BLOC 3
01/03/2000	11.0		
12/03/2000	22.0	27.5	25.3
20/03/2000	37.0	36.5	32.0
26/03/2000	38.5	43.0	48.0
03/04/2000	50.5	50.0	53.0
10/04/2000	52.0	61.5	59.5
18/04/2000	68.5	65.0	61.6
25/04/2000	69.0	72.0	71.0
02/05/2000	70.6	73.0	
	MOD		
DATE	BLOC 1	BLOC 2	BLOC 3
01/03/2000	10.0		
12/03/2000	23.0	19.0	24.5
20/03/2000	38.0	24.6	30.0
26/03/2000	40.0	44.5	43.5
03/04/2000	52.0	62.0	55.0
10/04/2000	60.0	64.0	59.0
18/04/2000	63.0	67.0	66.0
25/04/2000	66.5	68.0	67.7
02/05/2000	73.0	70.0	70.0
	PLU		
DATE	BLOC 1	BLOC 2	BLOC 3
01/03/2000	10.5		
12/03/2000	19.0	20.0	21.0
20/03/2000	29.0	36.2	38.5
26/03/2000	38.0	48.0	42.0
03/04/2000	50.5	57.0	49.0
10/04/2000	63.0	65.0	53.5
18/04/2000	67.0	65.7	55.0
25/04/2000	68.5	69.0	64.5

## Annexe 10 : Hauteur de tige (cm) - essai 2001

	ETM			
Date	BLOC 1	BLOC 2	BLOC 3	BLOC 4
03/03/2001	24.0	18.0	22.0	25.0
10/03/2001	35.0	37.5	35.5	38.0
19/03/2001	42.0	49.0	54.5	52.5
25/03/2001	43.0	54.5	57.0	60.0
02/04/2001	56.5	62.5	73.6	74.0
08/04/2001	66.0	65.0	85.0	95.0
17/04/2001	71.2	80.0	95.0	112.0
	MOD			
Date	BLOC 1	BLOC 2	BLOC 3	BLOC 4
03/03/2001	18.0	23.5	24.5	29.0
10/03/2001	25.0	29.0	34.0	45.0
19/03/2001	39.0	45.5	53.0	56.0
25/03/2001	45.0	54.0	57.0	59.0
02/04/2001	48.0	60.5	60.0	60.0
08/04/2001	58.0	65.0	66.2	74.2
17/04/2001	63.5	68.3	77.0	
	SEV			
Date	BLOC 1	BLOC 2	BLOC 3	BLOC 4
03/03/2001	21.5	20.0	26.0	32.5
10/03/2001	34.0	34.0	34.5	42.0
19/03/2001	42.0	39.0	52.0	52.0
25/03/2001	48.5	41.0	57.5	56.0
02/04/2001	63.0	59.0	60.5	60.5
08/04/2001	65.5	64.2	66.0	67.0
17/04/2001	72.0	70.0	75.0	68.0
	PLU			
Date	BLOC 1	BLOC 2	BLOC 3	BLOC 4
03/03/2001	22.0	18.6	20.5	21.5
10/03/2001	33.0	36.0	34.0	44.2
19/03/2001	40.0	40.0	50.0	46.0
25/03/2001	49.5	52.0	60.0	45.5
02/04/2001	54.0	59.0	61.5	72.0
08/04/2001	69.0	72.5	63.0	75.4
17/04/2001	73.2	71.8	70.0	79.4

## Annexe 11 : Potentiel foliaire (Bar) - essai 2001

Date	MOD	ETM	SEV	PLU
02/04/2001	6.89	9.53	10.04	10.20
03/04/2001	12.31	7.67	12.16	16.95
07/04/2001	12.40	8.94	14.80	13.55
11/04/2001	15.05	13.65	27.57	15.75
21/04/2001	13.83	13.48	16.18	13.63
24/04/2001	13.50	12.93	14.83	17.15

## Annexe 12 : Glucose et proline - essai 2001

Date	17/03/2001						
Stade	Montaison	SUCRE			PROLINE		
TRAIT	BLOC	DO (nm)	Glucose	CSST	DO (nm)	Proline	CP
ETM	1	0.649	27.859	11.597	0.842	20.675	3.592
ETM	2	0.252	8.493	3.535	0.739	18.193	3.160
ETM	3	0.493	20.249	8.429	0.43	10.747	1.867
ETM	4	0.342	12.883	5.363	0.17	4.452	0.779
MOD	1	0.113	1.712	0.713	0.945	23.157	4.023
MOD	2	0.26	8.883	3.698	0.362	9.108	1.582
MOD	3	0.302	10.932	4.551	1.086	26.554	4.613
MOD	4	0.62	26.444	11.009	0.806	19.807	3.441
PLU	1	0.266	9.176	3.820	0.542	13.446	2.336
PLU	2	0.429	17.127	7.130	0.274	6.988	1.214
PLU	3	0.222	7.029	2.926	0.368	9.253	1.607
PLU	4	0.268	9.273	3.860	0.133	3.590	0.624
SEV	1	0.249	8.346	3.475	0.703	17.325	3.010
SEV	2	0.295	10.590	4.409	0.367	9.229	1.603
SEV	3	0.232	7.517	3.129	0.904	22.169	3.851
SEV	4	0.199	5.907	2.459	0.953	23.349	4.056
Date	25/03/2001						
Stade	Epiaison						
TRAIT	BLOC	DO (nm)	Glucose	CSST	DO (nm)	Proline	CP
ETM	1	0.296	10.639	4.429	0.177	4.651	0.808
ETM	2	0.309	11.273	4.693	0.144	3.855	0.670
ETM	3	0.291	10.395	4.327	0.293	7.446	1.293
ETM	4	0.325	12.054	5.018	0.218	5.639	0.980
MOD	1	0.339	12.737	5.302	1.248	30.458	5.291
MOD	2	0.368	14.151	5.891	1.428	34.795	6.045
MOD	3	0.368	14.151	5.891	0.794	19.518	3.391
MOD	4	0.461	18.688	7.780	0.402	10.072	1.750
PLU	1	0.319	11.761	4.896	0.437	10.916	1.896
PLU	2	0.215	6.688	2.784	0.25	6.410	1.113
PLU	3	0.304	11.029	4.591	0.563	13.952	2.424
PLU	4	0.488	20.005	8.328	0.29	7.373	1.281
SEV	1	0.384	14.932	6.216	0.701	17.277	3.001
SEV	2	0.605	25.712	10.704	0.777	19.108	3.319
SEV	3	0.248	8.298	3.454	1.108	27.084	4.705
SEV	4	0.691	29.907	12.450	0.45	11.229	1.951
Date	10/04/2001						
Stade	Floraison						
TRAIT	BLOC	DO (nm)	Glucose	CSST	DO (nm)	Proline	CP
ETM	1	0.348	13.176	5.485	0.755	18.578	3.227
ETM	2	0.334	12.493	5.201	0.774	19.036	3.307

**Cinétique de quelques paramètres physiologiques du blé dur *triticum durum* (variété vitron) sous contrainte hydrique dans la plaine de la Mitidja**

ETM	3	0.262	8.980	3.739	0.316	8.000	1.390
ETM	4	0.31	11.322	4.713	0.482	12.000	2.085
MOD	1	0.317	11.663	4.855	1.017	24.892	4.324
MOD	2	0.31	11.322	4.713	1.462	35.614	6.187
MOD	3	0.313	11.468	4.774	1.36	33.157	5.760
MOD	4	0.336	12.590	5.241	0.599	14.819	2.574
PLU	1	0.424	16.883	7.028	0.722	17.783	3.089
PLU	2	0.358	13.663	5.688	0.255	6.530	1.134
PLU	3	0.395	15.468	6.439	0.996	24.386	4.236
PLU	4	0.282	9.956	4.145	0.235	6.048	1.051
SEV	1	0.35	13.273	5.526	1.313	32.024	5.563
SEV	2	0.352	13.371	5.566	2.286	55.470	9.636
SEV	3	0.311	11.371	4.734	1.942	47.181	8.196
SEV	4	0.28	9.859	4.104	2.44	59.181	10.281
Date	18/04/2001						
Stade	Grain Laiteux						
TRAIT	BLOC	DO (nm)	Glucose	CSST	DO (nm)	Proline	CP
ETM	1	0.516	21.371	8.897	0.595	14.723	2.558
ETM	2	0.592	25.078	10.440	0.41	10.265	1.783
ETM	3	0.885	39.371	16.390	1.07	26.169	4.546
ETM	4	0.512	21.176	8.815	0.451	11.253	1.955
MOD	1	0.348	13.176	5.485	0.68	16.771	2.913
MOD	2	0.458	18.541	7.719	0.371	9.325	1.620
MOD	3	0.501	20.639	8.592	0.347	8.747	1.519
MOD	4	0.362	13.859	5.769	0.635	15.687	2.725
PLU	1	0.722	31.420	13.080	1.187	28.988	5.036
PLU	2	0.763	33.420	13.912	0.504	12.530	2.177
PLU	3	0.41	16.200	6.744	1.157	28.265	4.910
PLU	4	0.469	19.078	7.942	1.247	30.434	5.287
SEV	1	0.631	26.980	11.232	0.926	22.699	3.943
SEV	2	0.637	27.273	11.354	0.802	19.711	3.424
SEV	3	0.62	26.444	11.009	1.15	28.096	4.881
SEV	4	0.638	27.322	11.374	1.109	27.108	4.709

**Annexe 13 : Composantes de rendements - essai 2000**



TRAIT	BLOC	Nbre Grains/Epi	Poids Mille Grains (g)	Rendement Estimé (Qx/ha)	Rendement Mesuré (Qx/ha)
ETM	1	40.65	46.77	75.48	65.10
ETM	2	47.33	47.63	76.87	56.42
ETM	3	39.41	46.44	78.88	67.27
SEV	1	35.68	49.97	41.90	28.21
SEV	2	29.55	49.05	30.58	26.04
SEV	3	30.06	48.16	33.88	28.21
MOD	1	38.13	48.85	53.46	36.89
MOD	2	37.95	49.93	51.92	39.06
MOD	3	35.57	49.97	47.28	30.38
PLU	1	37.69	47.08	21.47	8.68
PLU	2	37.80	48.82	20.85	8.68
PLU	3	27.84	16.90	7.34	6.51

## Annexe 14 : Composantes de rendement- essai 2001

Traitement	Bloc	Nbre Grains/Epi	Poids Mille Grains ( g )	Rendement en Grains (Qx/ha)
ETM	1	42.23	50.02	75.71
ETM	2	45.37	44.92	90.00
ETM	3	45.03	44.63	93.89
ETM	4	39.66	48.44	72.54
MOD	1	40.34	53.41	52.40
MOD	2	40.81	51.28	48.22
MOD	3	30.00	39.58	30.40
MOD	4	31.09	58.25	51.00
PLU	1	38.08	50.99	54.68
PLU	2	34.13	31.00	34.26
PLU	3	31.00	49.33	58.72
PLU	4	38.76	49.54	45.47
SEV	1	33.41	50.28	39.78
SEV	2	36.53	46.18	48.37
SEV	3	36.50	60.54	69.30
SEV	4	18.05	39.79	18.85

