

*République Algérienne Démocratique Et Populaire*  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique*

*Université Badji Mokhtar – Annaba*

*Faculté des Sciences*

*Département de Biologie*

*Thèse de Doctorat en Sciences*

*Option : Biologie Végétale*

*THEME*

**Impact de l'application combinée d'un fertilisant  
phosphaté et trois pesticides sur une terre cultivée  
en blé dur (*Triticum durum* Desf)**

*Présentée par :*

*M<sup>elle</sup> KETIF AMEL*

*Devant le jury*

Président : Pr. Boudeleaa Mokhtar	Université Badji Mokhtar - Annaba
Directeur : Pr. Djamaï Rachid	Université Badji Mokhtar - Annaba
Examineur : Pr. Benslama Mohamed	Université Badji Mokhtar - Annaba
Examineur : Pr. Fadel Djamel	Université Chérif Messaadia - Souk Ahras
Examineur : Dr. Slimani Ali	Université Chadli Bendjedid - El Taref
Examineur : Dr. Grara Nedjoud	Université 8 Mai 45 - Guelma
Membre invité : M <sup>me</sup> . Seridi Souad	ITGC (Guelma)

**Année universitaire: 2015-2016**

## *Remerciements*

Bien qu'une thèse soit un travail individuel, nombreuses sont les personnes qui ont rendu possible la réalisation de ce travail et que je tiens à remercier ici.

Je remercie le Pr. Boudeleaa Mokhtar de l'université Badji Mokhtar -Annaba- d'avoir accepté de présider ce jury malgré ses responsabilités.

Au moment où j'apporte les dernières retouches à mon travail, je tiens à remercier mon directeur de thèse Pr. Djamaï Rachid de l'Université Badji Mokhtar -Annaba- de ses conseils précieux et sa disponibilité. C'est grâce à lui que le travail a pris cette forme. Travailler avec lui pendant toutes ces années ont des moments agréables.

J'exprime toute ma gratitude et mes remerciements au Directeur du Laboratoire sols et développement durable Pr. Benslama Mohamed de l'Université Badji Mokhtar –Annaba-. La mise à ma disposition de tous les moyens dont j'avais besoin pour travailler est un exemple de soutien considérable. Sa présence parmi le jury en tant qu'examineur est pour moi un honneur.

Je tiens à remercier le Pr. Fadel Djamel de l'Université Chérif Messaadia -Souk Ahras- d'avoir accepté de siéger dans le jury en tant qu'examineur. Je remercie également Dr. Slimani Ali de l'Université Chadli Bendjedid -El Taref-.

Mes sincères remerciements au Dr. Grara Nedjoud de l'Université 8 Mai 45 - Guelma- d'avoir bien voulu examiner ce travail.

Je remercie la directrice de l'Institut Technique des Grandes Cultures de Guelma, M<sup>me</sup> Seridi Souad et le personnel, ainsi que les agents de Fertil qui ont mis à ma disposition tous les moyens nécessaires pour la réalisation de ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de mes remerciements.

Mes remerciements au Pr. Abdenour Chérif de l'Université Badji Mokhtar –Annaba- pour sa collaboration et son aide dans la traduction de mes articles.

Mes remerciements vont également au Dr. Baarour Choukri, de l'Université Cherif Messaadia -Souk Ahras- pour son aide aux traitements statistiques, au Dr. Sifi Karima et Dr. Terfaya Moncef de l'Université Badji Mokhtar –Annaba- pour leurs conseils qu'ils trouvent ici l'expression de toute ma gratitude pour leur soutien moral, leur aide durant la rédaction de cette thèse et les encouragements qu'ils n'ont cessé de m'apporter.

Mes remerciements pour toutes les techniciennes du Département de Biologie.

Mes remerciements vont également à toute personne physique ou morale ayant contribué de près ou de loin à ce travail.

# Dédicace

*A la tendresse infinie, aux sacrifices non payés, au signe de l'amour sincère et fidèle.....à ma raison de vivre et de vaincre.....mes parents les plus chères,*

*A la fleure de la famille : Maysane,*

*A mes chers et adorables frères qui m'entourent avec amour : Hichem, Abdenour, Naceredine, Mohamed, Yousef,*

*A monsieur Terfaya Moncef qui m'a aidé beaucoup durant la rédaction,*

*A mes chers sœurs : Ismahane, Safa, et Karima*

*A mes belles sœurs Labiba, Ahlem, Zaineb,*

*A mes poussins : Arcelene, Adam Nazim, Amir, Iyad et Nizar,*

*A toute la famille,*

*A tous ceux que j'aime.*

*Je dédie ce modeste travail*



## Résumé

*Impact de l'application combinée d'un fertilisant phosphaté et trois pesticides sur une terre cultivée en blé dur (Triticum durum Desf)*

L'objectif de cette étude est de faire connaître l'impact de la fertilisation phosphatée sur une culture de *Triticum durum* variété GTA dur et l'effet de trois pesticides sur le sol et le végétal. L'étude a porté sur les caractéristiques physicochimiques du sol, biochimiques de la plante et agronomiques de la culture à quatre stades végétatifs qui sont l'avant semis, le tallage, l'épiaison et l'après récolte. Suivant les saisons, l'application de six doses variables du phosphore et une concentration fixe et identique des pesticides mélangés intervient dans l'influence de plusieurs phénomènes sur les paramètres mesurés.

Le pH, la conductivité électrique et le phosphore assimilable dans la solution du sol diminuent avec la dilution, l'abaissement des sels dissous, l'absorption racinaire des éléments minéraux ainsi que l'adsorption sur les particules du sol et la précipitation tout le long des stades étudiés.

La concentration en phosphore assimilable influe sur la synthèse des métabolites qui est plus activée au stade épiaison par rapport au tallage. L'étude statistique a montré que durant les quatre campagnes étudiées, les caractéristiques physicochimiques du sol sont en corrélation positive avec les paramètres physiobiochimiques et les rendements du blé.

L'étude sur les résidus des pesticides montre qu'il existe des différences significatives entre les différents stades végétatifs et les campagnes de prélèvements particulièrement 2009 - 2010 et 2011-2012.

La structure complexe et la demi-vie du Topik (Clodinofof-propagyl et Cloquintocet-mexyl) rend le pesticide le plus résistant aux conditions de dégradation.

Dans notre étude les doses idéales du superphosphate utilisées et qui ont donné les rendements les plus favorables sont 92 et 60 unités durant la campagne 2012-2013.

**Mots clés :** Sol, Engrais phosphaté, Résidus pesticides, Blé dur, Avant semis, Tallage, Epiaison, Après récolte et Statistica.

## Summary

*Combined impact of the application of phosphate fertilizer and three pesticides on cropland in durum wheat (Triticum durum Desf)*

The objective of this study is to know the impact of phosphorus fertilization on a culture of *Triticum durum* variety GTA and the effect of three pesticides on the soil and plant. The study covered on the physicochemical characteristics of the soil, biochemical plant and agronomic culture four vegetative stages which are before sowing, tillering, heading and after harvest.

According season, the application of six phosphorus variable doses and identical concentration of mixed pesticides intervenes in the influence of several phenomena on the measured parameters.

PH, electrical conductivity and available phosphorus in the soil solution decreases with dilution, the lowering of dissolved salts, root absorption of minerals and the adsorption and precipitation all along the stages studied.

The available phosphorus concentration affects the synthesis of metabolites that is activated at heading stage compared to tillering. The statistical study showed that during the four campaigns studied the physicochemical characteristics of the soil are positively correlated with physiobiochimiques parameters and wheat yields.

The study on pesticide residues shows that there are significant differences between the different vegetative stages and levies campaigns particularly 2009 - 2010 and 2011-2012.

The complex structure and the half-life of Topik (Clodinafop-propagyl and Cloquintocet-mexyl) make it the most resistant to degradative conditions pesticide.

In our study the ideal dose of superphosphate used and who have given the most favorable yields were 92 and 60 units during the 2012-2013 campaign.

**Keywords:** Soil, Fertilizer phosphate, Pesticides residues, *Durum wheat*, Before sowing, Tillering, Heading, After harvest and Statistica.

## ملخص

التأثير المزدوج لتطبيق الأسمدة الفوسفاتية وثلاثة المبيدات على الأراضي المزروعة بالقمح الصلب

(*Triticum durum* Desf)

الهدف من هذه الدراسة هو معرفة تأثير التسميد الفوسفاتي على الأراضي المزروعة بالقمح الصلب *Triticum durum*

صنف GTA ثلاثة مبيدات على التربة و النبات. وركزت الدراسة على الخصائص الفيزيائية للتربة، و النبات و الكيمياء الحيوية و الزراعية عند أربعة مراحل نباتية هي قبل البذر، التفريع، التراكم و بعد الحصاد.

حسب المواسم تطبيق ستة جرعات مختلفة من الفسفور و تركيز ثابت من المبيدات المختلفة لها مفعول على عدة ظواهر التي تؤثر على العوامل المقاسة.

حموضة الوسط، الناقلية الكهربائية و الفسفور المتوفرة في محلول التربة يتناقص مع التخفيف، تخفيض الأملاح الذائبة،

امتصاص الجذور للأملاح المعدنية كما الادمصاص على جزيئات التربة و الترسيب طوال مراحل دراستها.

تركيز الفوسفور المتوفر يؤثر على تركيب الأيض و هو أكثر نشاطا في مرحلة التفريع بالمقارنة مع التراكم.

وأظهرت الدراسة الإحصائية أنه خلال المواسم المدروسة الأربعة، الخصائص الفيزيائية للتربة ترتبط بشكل إيجابي مع الخصائص الفيزيوكيميائية و غلال القمح.

تظهر الدراسة على متبقيات المبيدات أن هناك فروقا ذات دلالة إحصائية بين مراحل مختلفة نباتية و مواسم أخذ العينات بشكل خاص

2010 - 2009 و 2012-2011.

البنية امعهه و بصف عمر

في دراستنا، الجرعات المثلثا TOPIK يجعله أكثر مقاومة لظروف التحلل بالمبيد 92 60

موسم 2012-2013

الكلمات المفتاحية: التربة، الأسمدة الفوسفاتية، متبقيات المبيدات، القمح القاسي، قبل البذر، التفريع، التراكم، بعد الحصاد

و Statistica.

## *Liste des tableaux*

<b>N°</b>	<b>Titres</b>	<b>Pages</b>
<b>1</b>	Les besoins azotés du blé et de l'orge établis par zones agro climatiques dans le Maghreb	<b>7</b>
<b>2</b>	Classement des cultures selon leurs exigences en K <sub>2</sub> O	<b>13</b>
<b>3</b>	Doses conseillées en K <sub>2</sub> O selon la teneur du sol en potasse	<b>14</b>
<b>4</b>	Teneurs moyennes du phosphore dans les organes végétaux	<b>28</b>
<b>5</b>	Les pesticides les plus utilisés en Algérie	<b>47</b>

## *Liste des tableaux*

### *Liste des tableaux de la campagne 2009-2010*

<b>N°</b>	<b>Titres</b>	<b>Pages</b>
<b>6</b>	Test des médianes de Kruskal-Wallis (pH <sub>eau</sub> )	<b>74</b>
<b>7</b>	Test des médianes de Kruskal-Wallis (pH <sub>KCl</sub> )	<b>75</b>
<b>8</b>	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Conductivité Electrique)	<b>76</b>
<b>9</b>	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Calcaire Total)	<b>77</b>
<b>10</b>	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Calcaire Actif)	<b>78</b>
<b>11</b>	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Porosité)	<b>79</b>
<b>12</b>	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Phosphore Assimilable)	<b>80</b>
<b>13</b>	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Humidité Hygroscopique)	<b>81</b>
<b>14</b>	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Carbone Organique)	<b>82</b>
<b>15</b>	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Matière Organique)	<b>83</b>
<b>16</b>	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Sables)	<b>84</b>
<b>17</b>	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Limons)	<b>85</b>
<b>18</b>	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Argiles)	<b>85</b>
<b>19</b>	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Chlorophylle a)	<b>91</b>
<b>20</b>	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Chlorophylle b)	<b>92</b>
<b>21</b>	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Chlorophylle a+b)	<b>93</b>
<b>22</b>	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Sucres Solubles)	<b>94</b>
<b>23</b>	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Proteines Totales)	<b>95</b>
<b>24</b>	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Proline)	<b>96</b>
<b>25</b>	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Nombre épis / m <sup>2</sup> )	<b>98</b>
<b>26</b>	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Longueur d'épis)	<b>99</b>
<b>27</b>	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Nombre de gains/épis)	<b>99</b>
<b>28</b>	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Poids de 1000 grains)	<b>100</b>
<b>29</b>	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Rendements)	<b>101</b>
<b>30</b>	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Résidus pesticides)	<b>103</b>

### *Liste des tableaux de la campagne 2010-2011*

<b>N°</b>	<b>Titres</b>	<b>Pages</b>
<b>31</b>	Test des médianes de Kruskal-Wallis (pH <sub>eau</sub> )	<b>109</b>
<b>32</b>	Test des médianes de Kruskal-Wallis (pH <sub>KCl</sub> )	<b>110</b>
<b>33</b>	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Conductivité Electrique)	<b>112</b>
<b>34</b>	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Calcaire Total)	<b>113</b>
<b>35</b>	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Calcaire Actif)	<b>114</b>

36	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Porosité)	115
37	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Phosphore Assimilable)	117
38	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Humidité Hygroscopique)	118
39	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Carbone Organique)	119
40	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Matière Organique)	121
41	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Chlorophylle a)	129
42	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Chlorophylle b)	130
43	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Chlorophylle a+b)	131
44	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Sucres Solubles)	132
45	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Proteines Totales)	133
46	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Proline)	134
47	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Nombre épis / m <sup>2</sup> )	137
48	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Longueur d'épis)	137
49	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Nombre de gains/épis)	138
50	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Poids de 1000 grains)	139
51	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Rendements)	140
52	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Résidus pesticides)	142

### *Liste des tableaux de la campagne 2011-2012*

N°	Titres	Pages
53	Test des médianes de Kruskal-Wallis (pH <sub>eau</sub> )	146
54	Test des médianes de Kruskal-Wallis (pH <sub>KCl</sub> )	148
55	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Conductivité Electrique)	149
56	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Calcaire Total)	150
57	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Calcaire Actif)	151
58	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Porosité)	152
59	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Phosphore Assimilable)	153
60	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Humidité Hygroscopique)	154
61	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Carbone Organique)	155
62	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Matière Organique)	156
63	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Chlorophylle a)	164
64	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Chlorophylle b)	165
65	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Chlorophylle a+b)	166
66	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Sucres Solubles)	167
67	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Proteines Totales)	168

### *Suite la liste des tableaux de la campagne 2011-2012*

N°	Titres	Pages
68	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Proline)	169
69	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Nombre épis / m <sup>2</sup> )	171
70	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Longueur d'épis)	172
71	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Nombre de gains/épis)	173
72	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Poids de 1000 grains)	174
73	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Rendements)	174
74	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Résidus pesticides)	177

## *Liste des tableaux de la campagne 2012-2013*

<i>N°</i>	<i>Titres</i>	<i>Pages</i>
75	Test des médianes de Kruskal-Wallis (pH <sub>eau</sub> )	182
76	Test des médianes de Kruskal-Wallis (pH <sub>KCl</sub> )	183
77	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Conductivité Electrique)	184
78	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Calcaire Total)	185
79	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Calcaire Actif)	186
80	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Porosité)	187
81	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Phosphore Assimilable)	188
82	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Humidité Hygroscopique)	189
83	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Carbone Organique)	190
84	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Matière Organique)	192
85	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Chlorophylle a)	197
86	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Chlorophylle b)	198
87	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Chlorophylle a+b)	199
88	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Sucres Solubles)	200
89	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Proteines Totales)	201
90	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Proline)	203
91	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Nombre épis / m <sup>2</sup> )	206
92	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Longueur d'épis)	206
93	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Nombre de gains/épis)	207
94	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Poids de 1000 grains)	208
95	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Rendements)	209
96	Test des médianes de Kruskal-Wallis (Résidus pesticides)	211

## *Liste des figures*

### *Suite de liste des figures*

<i>N°</i>	<i>Titres</i>	<i>Pages</i>
46	Teneur du sol en éléments grossiers	84
47	Projection des cases des facteurs 1 et 2	85
48	Analyse en composantes principales	85
49	Projection des cases des facteurs 2 et 3	86
50	Analyse en composantes principales	86
51	Projection des cases des facteurs 3 et 4	86
52	Analyse en composantes principales	86
53	Projection des cases des facteurs 4 et 5	86
54	Analyse en composantes principales	86
55	Projection des cases des facteurs 1 et 2	87
56	Analyse en composantes principales	87
57	Projection des cases des facteurs 2 et 3	87
58	Analyse en composantes principales	87
59	Projection des cases des facteurs 3 et 4	87

60	Analyse en composantes principales	87
61	Projection des cases des facteurs 4 et 5	88
62	Analyse en composantes principales	88
63	Projection des cases des facteurs 1 et 2	88
64	Analyse en composantes principales	88
65	Projection des cases des facteurs 2 et 3	88
66	Analyse en composantes principales	88
67	Projection des cases des facteurs 3 et 4	89
68	Analyse en composantes principales	89
69	Projection des cases des facteurs 4 et 5	89
70	Analyse en composantes principales	89
71	Effet du traitement sur la teneur en chlorophylle (a)	90
72	Effet du traitement sur la teneur en chlorophylle (b)	92
73	Effet du traitement sur la teneur en chlorophylle (a+b)	93
74	Effet du traitement sur la teneur en sucres solubles	94
75	Effet du traitement sur la teneur en protéines totales	95
76	Effet du traitement sur la teneur en proline	96
77	Projection des cases des facteurs 1 et 2	96
78	Analyse en composantes principales	96
79	Projection des cases des facteurs 1 et 2	97
80	Analyse en composantes principales	97
81	Effet du traitement sur le nombre d'épis/m <sup>2</sup>	98
82	Effet du traitement sur la longueur d'épis	98
83	Effet du traitement sur le nombre de grains /épis	99
84	Effet du traitement sur le poids de 1000 grains	100
85	Effet du traitement sur le rendement	101
86	Projection des cases des facteurs 1 et 2	101
87	Analyse en composantes principales	101
88	Projection des cases des facteurs 2 et 3	102
89	Analyse en composantes principales	102
90	Quantité des résidus des pesticides dans le sol pendant le tallage	103

*Suite de liste des figures*

N°	Titres	Pages
91	Quantité des résidus des pesticides dans le sol pendant l'épiaison	103
92	Projection des cases des facteurs 1 et 2	104
93	Analyse en composantes principales	104
94	Projection des cases des facteurs 1 et 2	105
95	Analyse en composantes principales	105
96	Projection des cases des facteurs 2 et 3	105
97	Analyse en composantes principales	105
98	Projection des cases des facteurs 1 et 2	105
99	Analyse en composantes principales	105
100	Projection des cases des facteurs 2 et 3	106
101	Analyse en composantes principales	106
102	Projection des cases des facteurs 3 et 4	106
103	Analyse en composantes principales	106
104	Variation du pH <sub>eau</sub> durant les stades de prélèvements	108

105	Variation du pH <sub>KCl</sub> durant les stades de prélèvements	109
106	Effet du traitement sur la conductivité électrique	111
107	Effet du traitement sur le calcaire total	112
108	Effet du traitement sur le calcaire actif	113
109	Effet du traitement sur la porosité	115
110	Effet du traitement sur le phosphore assimilable	116
111	Effet du traitement sur l'humidité hygroscopique	117
112	Effet du traitement sur le carbone organique	119
113	Effet du traitement sur la matière organique	120
114	Projection des cases des facteurs 1 et 2	121
115	Analyse en composantes principales	121
116	Projection des cases des facteurs 2 et 3	121
117	Analyse en composantes principales	121
118	Projection des cases des facteurs 3 et 4	122
119	Analyse en composantes principales	122
120	Projection des cases des facteurs 4 et 5	122
121	Analyse en composantes principales	122
122	Projection des cases des facteurs 1 et 2	122
123	Analyse en composantes principales	122
124	Projection des cases des facteurs 2 et 3	123
125	Analyse en composantes principales	123
126	Projection des cases des facteurs 3 et 4	123
127	Analyse en composantes principales	123
128	Projection des cases des facteurs 4 et 5	123
129	Analyse en composantes principales	123
130	Projection des cases des facteurs 1 et 2	124
131	Analyse en composantes principales	124
132	Projection des cases des facteurs 2 et 3	124
133	Analyse en composantes principales	124
134	Projection des cases des facteurs 3 et 4	124
135	Analyse en composantes principales	124

*Suite de liste des figures*

N°	Titres	Pages
136	Projection des cases des facteurs 4 et 5	125
137	Analyse en composantes principales	125
138	Projection des cases des facteurs 1 et 2	125
139	Analyse en composantes principales	125
140	Projection des cases des facteurs 2 et 3	125
141	Analyse en composantes principales	125
142	Projection des cases des facteurs 3 et 4	126
143	Analyse en composantes principales	126
144	Projection des cases des facteurs 4 et 5	126
145	Analyse en composantes principales	126
146	Effet du traitement sur la teneur en chlorophylle (a)	129
147	Effet du traitement sur la teneur en chlorophylle (b)	130
148	Effet du traitement sur la teneur en chlorophylle (a+ b)	131
149	Effet du traitement sur la teneur en protéines totales	132



150	Effet du traitement sur la teneur en sucres solubles	133
151	Effet du traitement sur la teneur en proline	134
152	Projection des cases des facteurs 1 et 2	134
153	Analyse en composantes principales	134
154	Projection des cases des facteurs 2 et 3	135
155	Analyse en composantes principales	135
156	Projection des cases des facteurs 1 et 2	135
157	Analyse en composantes principales	135
158	Effet du traitement sur le nombre d'épis /m <sup>2</sup>	136
159	Effet du traitement sur la longueur d'épis	137
160	Effet du traitement sur le nombre de grains / épis	138
161	Effet du traitement sur le poids de 1000 grains	139
112	Effet du traitement sur le rendement	140
163	Projection des cases des facteurs 1 et 2	140
164	Analyse en composantes principales	140
165	Projection des cases des facteurs 2 et 3	141
166	Analyse en composantes principales	141
167	Effet du traitement sur la quantité des résidus de pesticides	142
168	Projection des cases des facteurs 1 et 2	143
169	Analyse en composantes principales	143
170	Projection des cases des facteurs 1 et 2	143
171	Analyse en composantes principales	143
172	Projection des cases des facteurs 2 et 3	144
173	Analyse en composantes principales	144
174	Projection des cases des facteurs 1 et 2	144
175	Analyse en composantes principales	144
176	Projection des cases des facteurs 2 et 3	144
177	Analyse en composantes principales	144
178	Variation du pH <sub>eau</sub> durant les stades de prélèvements	146
179	Variation du pH <sub>KCl</sub> durant les stades de prélèvements	147
180	Effet du traitement sur la conductivité électrique	148

*Suite de liste des figures*

N°	Titres	Pages
181	Effet du traitement sur le calcaire total	150
182	Effet du traitement sur le calcaire actif	151
183	Effet du traitement sur la porosité	152
184	Effet du traitement sur le phosphore assimilable	153
185	Effet du traitement sur l'humidité hygroscopique	154
186	Effet du traitement sur la teneur en carbone organique	155
187	Effet du traitement sur la matière organique	156
188	Projection des cases des facteurs 1 et 2	157
189	Analyse en composantes principales	157
190	Projection des cases des facteurs 2 et 3	157
191	Analyse en composantes principales	157
192	Projection des cases des facteurs 3 et 4	157
193	Analyse en composantes principales	157
194	Projection des cases des facteurs 4 et 5	158

195	Analyse en composantes principales	158
196	Projection des cases des facteurs 1et 2	158
197	Analyse en composantes principales	158
198	Projection des cases des facteurs 2et 3	158
199	Analyse en composantes principales	158
200	Projection des cases des facteurs 3 et 4	159
201	Analyse en composantes principales	159
202	Projection des cases des facteurs 1 et 2	159
203	Analyse en composantes principales	159
204	Projection des cases des facteurs 2 et 3	159
205	Analyse en composantes principales	159
206	Projection des cases des facteurs 3 et 4	160
207	Analyse en composantes principales	160
208	Projection des cases des facteurs 4 et 5	160
209	Analyse en composantes principales	160
210	Projection des cases des facteurs 1 et 2	160
211	Analyse en composantes principales	160
212	Projection des cases des facteurs 2 et 3	161
213	Analyse en composantes principales	161
214	Projection des cases des facteurs 3 et 4	161
215	Analyse en composantes principales	161
216	Projection des cases des facteurs 4 et 5	161
217	Analyse en composantes principales	161
218	Effet du traitement sur la teneur en chlorophylle (a)	163
219	Effet du traitement sur la teneur en chlorophylle (b)	164
220	Effet du traitement sur la teneur en chlorophylle (a+ b)	165
221	Effet du traitement sur la teneur en protéines totales	166
222	Effet du traitement sur la teneur en sucres solubles	168
223	Effet du traitement sur la teneur en proline	169
224	Projection des cases des facteurs 1et 2	169
225	Analyse en composantes principales	169

*Suite de liste des figures*

N°	Titres	Pages
226	Projection des cases des facteurs 2 et 3	170
227	Analyse en composantes principales	170
228	Projection des cases des facteurs 1et 2	170
229	Analyse en composantes principales	170
230	Projection des cases des facteurs 2 et 3	170
231	Analyse en composantes principales	170
232	Effet du traitement sur le nombre d'épis / m <sup>2</sup>	171
233	Effet du traitement sur la longueur d'épis	172
234	Effet de traitement sur le nombre de grains / épis	173
235	Effet de traitement sur le poids de 1000 grains	173
236	Effet de traitement sur le rendement	174
237	Projection des cases des facteurs 1 et 2	175
238	Analyse en composantes principales	175
239	Projection des cases des facteurs 2 et 3	175

240	Analyse en composantes principales	175
241	Effet de traitement la quantité des résidus de pesticides au tallage	176
242	Effet de traitement la quantité des résidus de pesticides à l'épiaison	176
243	Projection des cases des facteurs 1et 2	177
244	Analyse en composantes principales	177
245	Projection des cases des facteurs 1et 2	178
246	Analyse en composantes principales	178
247	Projection des cases des facteurs 2 et 3	178
248	Analyse en composantes principales	178
249	Projection des cases des facteurs 3 et 4	178
250	Analyse en composantes principales	178
251	Analyse en composantes principales	178
252	Projection des cases des facteurs 4 et 5	179
253	Analyse en composantes principales	179
254	Projection des cases des facteurs 1 et 2	179
255	Analyse en composantes principales	179
256	Projection des cases des facteurs 2 et 3	179
257	Analyse en composantes principales	179
258	Variation du $pH_{eau}$ en fonction des stades de prélèvements	181
259	Variation du $pH_{KCl}$ en fonction des stades de prélèvements	182
260	Effet du traitement sur la conductivité électrique	184
261	Effet du traitement sur la teneur en calcaire total	185
262	Effet du traitement sur la teneur en calcaire actif	186
263	Effet du traitement sur la porosité	187
264	Effet du traitement sur la teneur en phosphore assimilable	188
265	Effet du traitement sur la teneur en humidité hygroscopique	189
266	Effet du traitement sur la teneur en carbone organique	190
267	Effet du traitement sur la teneur en matière organique	191
268	Projection des cases des facteurs 1 et 2	192
269	Analyse en composantes principales	192
270	Projection des cases des facteurs 2 et 3	192

*Suite de liste des figures*

N°	Titres	Pages
271	Analyse en composantes principales	192
272	Projection des cases des facteurs 3 et 4	193
273	Analyse en composantes principales	193
274	Projection des cases des facteurs 4 et 5	193
275	Analyse en composantes principales	193
276	Projection des cases des facteurs 1 et 2	193
277	Analyse en composantes principales	193
278	Projection des cases des facteurs 2 et 3	194
279	Analyse en composantes principales	194
280	Projection des cases des facteurs 3 et 4	194
281	Analyse en composantes principales	194
282	Projection des cases des facteurs 4 et 5	194
283	Analyse en composantes principales	194
284	Projection des cases des facteurs 1 et 2	195

285	Analyse en composantes principales	195
286	Projection des cases des facteurs 2 et 3	195
287	Analyse en composantes principales	195
288	Projection des cases des facteurs 3 et 4	195
289	Analyse en composantes principales	195
290	Projection des cases des facteurs 4 et 5	196
291	Analyse en composantes principales	196
292	Effet du traitement sur la teneur en chlorophylle (a)	197
293	Effet du traitement sur la teneur en chlorophylle (b)	198
294	Effet du traitement sur la teneur en chlorophylle (a + b)	199
295	Effet du traitement sur la teneur en sur les sucres solubles	200
296	Effet du traitement sur la teneur en protéines totales	201
297	Effet du traitement sur la proline	202
298	Projection des cases des facteurs 1 et 2	203
299	Analyse en composantes principales	203
300	Projection des cases des facteurs 2 et 3	203
301	Analyse en composantes principales	203
302	Projection des cases des facteurs 1 et 2	204
303	Analyse en composantes principales	204
304	Projection des cases des facteurs 2 et 3	204
305	Analyse en composantes principales	204
306	Effet du traitement sur le nombre d'épis/m <sup>2</sup>	205
307	Effet du traitement sur la longueur d'épis	206
308	Effet du traitement sur le nombre de grains / épis	207
309	Effet du traitement sur le poids de 1000 grains	208
310	Effet du traitement sur le rendement	209
311	Projection des cases des facteurs 1 et 2	209
312	Analyse en composantes principales	209
313	Projection des cases des facteurs 2 et 3	210
314	Analyse en composantes principales	210
315	Effet du traitement sur la quantité des résidus de pesticides pendant le tallage	211

*Suite de liste des figures*

N°	Titres	Pages
316	Effet du traitement sur la quantité des résidus de pesticides pendant l'épiaison	211
317	Projection des cases des facteurs 1 et 2	212
318	Analyse en composantes principales	212
319	Projection des cases des facteurs 1 et 2	212
320	Analyse en composantes principales	212
321	Projection des cases des facteurs 2 et 3	213
322	Analyse en composantes principales	213
323	Spectre d'absorbance de Clodinofof-propagyl et Cloquintocet-mexyl en fonction du temps	214
324	Projection des cases des facteurs 1 et 2	214
325	Analyse en composantes principales	214
326	Projection des cases des facteurs 2 et 3	214
327	Analyse en composantes principales	214
328	Projection des cases des facteurs 3 et 4	215
329	Analyse en composantes principales	215

<b>330</b>	Projection des cases des facteurs 4 et 5	<b>215</b>
<b>331</b>	Analyse en composantes principales	<b>215</b>
<b>332</b>	Projection des cases des facteurs 1 et 2	<b>215</b>
<b>333</b>	Analyse en composantes principales	<b>215</b>
<b>334</b>	Projection des cases des facteurs 2 et 3	<b>216</b>
<b>335</b>	Analyse en composantes principales	<b>216</b>
<b>336</b>	Projection des cases des facteurs 3 et 4	<b>216</b>
<b>337</b>	Analyse en composantes principales	<b>216</b>
<b>338</b>	Projection des cases des facteurs 4 et 5	<b>216</b>
<b>339</b>	Analyse en composantes principales	<b>216</b>

Remerciements	
Dédicace	
Résumés	
Liste des tableaux	
Liste des figures	

## *Sommaire*

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

### **Partie I : Synthèse Bibliographique**

#### **Chapitre I : La fertilisation**

1. Généralité sur la fertilisation minérale du blé.....	5
1.1. Besoins du blé en éléments fertilisants.....	5
1.2. Raisonnement de la fertilisation.....	6
2. Fertilisation azotée.....	6
2.1. Formes d'azote dans le sol.....	7
2.2. Carence et abondance de l'azote dans la plante.....	8
2.2.1. Carence.....	8
2.2.2. Abondance.....	8
2.3. Pratique de la fertilisation azotée.....	9
2.4. Quantité d'azote à apporter.....	9
2.5. Dates de l'apport azoté.....	9
2.6. Fertilisation azotée et son effet sur le rendement.....	10
2.7. Engrais azotés.....	10
3. Fertilisation Potassique.....	11

3.1. Formes du potassium dans le sol.....	11
3.1.1. Potassium dans la solution du sol.....	12
3.1.2. Potassium adsorbé.....	12
3.1.3. Potassium à l'intérieur des réseaux cristallins.....	12
3.1.4. Potassium non échangeable.....	12
3.2. Carence et abondance du potassium dans la plante.....	13
3.3. Exigence des cultures vis-à-vis du Potassium.....	13
3.4. Pratique de la fertilisation Potassique.....	13
3.4.1. Dose.....	13
3.4.2. Période d'emploi des engrais potassiques.....	14
3.4.3. Quantités de potasse à apporter.....	14
3.5. Réponse du blé à la fertilisation potassique.....	15
3.6. Engrais potassiques.....	15
3.7. Lessivage du potassium : un effet très marginal.....	15

## **Chapitre II : Le phosphore dans le sol**

1. Découverte et historique du phosphore.....	16
2. Phosphore et notre planète.....	16
3. Statut du phosphore dans le sol.....	16
3.1. Cycle biochimique du phosphore dans les écosystèmes cultivés.....	17
3.2. Formes de phosphore dans le sol.....	18
3.2.1. Phosphore total du sol.....	19
3.2.2. Formes organiques.....	19
3.2.3. Phosphore de la solution du sol.....	20
3.2.4. Phosphore du sol disponible aux plantes.....	21
3.2.5. Méthodes d'estimation du phosphore assimilable.....	21
3.2.6. Phosphore adsorbé et précipité.....	23
4. Phosphore dans le monde vivant.....	27
4.1. Prélèvement du phosphore par les plantes.....	27
4.2. Symptômes visibles carences en phosphore.....	28

4.3. Réponse de la plante à une carence en phosphore.....	28
5. L'apparition des fertilisants phosphatés.....	29
6. Engrais phosphatés.....	29
6.1 Engrais phosphatés simples.....	30
6.1.1. Phosphates moulus.....	30
6.1.2. Phosphates calcinés.....	30
6.1.3. Phosphal.....	30
6.1.4. Scories de déphosphoration.....	30
6.1.5. Superphosphate normal.....	30
6.1.6. Superphosphate concentré.....	31
6.1.7. Phosphate bicalcique.....	31
6.2. Engrais binaires.....	31
6.3. Engrais ternaires.....	32
7. Le phosphore origine de l'eutrophisation.....	32

### **Chapitre III : Les pesticides**

1. Définition des pesticides.....	34
2. Types de pesticides.....	34
2.1. Insecticides.....	34
2.2. Herbicides.....	34
2.3. Fongicides.....	34
3. Les propriétés physicochimiques des pesticides.....	34
4. Classification des pesticides.....	35
5. Mode d'emploi des pesticides.....	36
5.1. La pulvérisation.....	36
5.2. Le poudrage.....	36
5.3. La fumigation.....	36
5.4. L'enfouissement.....	36
5.5. L'enrobage.....	36
5.6. Les appâts.....	36



6. Utilisation des pesticides .....	36
6.1. Usage en agriculture.....	37
6.2. Usage pour la santé animale.....	37
6.3. Usage pour la santé publique.....	37
6. 4. Usage pour l'industrie.....	37
7. Devenir des pesticides dans l'environnement.....	37
7.1. La volatilisation.....	38
7.2. Ruissellement et lixiviation.....	38
7.3. Bioaccumulation.....	39
7.4. Dégradation.....	39
7.4.1 Dégradation abiotique.....	39
7.4. 2 Dégradation biotique (biodégradation).....	40
8. Dégradation dans la plante.....	42
9. Persistance.....	42
10. Toxicité des pesticides .....	42
10.1. Dispersion des produits.....	42
10.2. Non sélectivité.....	42
10.3. Toxicité de la matière active.....	43
10.4. Rémanence de la molécule et sa capacité d'accumulation dans la chaîne alimentaire .....	43
10.5. Forme et la préparation du pesticide .....	43
11. Impact des pesticides sur l'environnement.....	43
11.1. Impact sur l'écosystème.....	43
11.1.1. Sur l'eau.....	43
11.1.2. Sur l'air.....	44
11.1.3. Sur le sol.....	44
11.2. Impact des pesticides sur la biodiversité .....	44
11.2.1. Effets des pesticides sur la faune et la flore sauvages.....	45
11.3. Impact sur la santé humaine.....	45
12. Suivi des pesticides au niveau de l'environnement.....	46

13. Pesticides en Algérie.....	46
--------------------------------	----

## **Partie II : Partie Expérimentale**

### **Chapitre IV : Matériel et méthodes**

1. Situation géographique de l'ITGC.....	48
2. Pesticides.....	48
2.1. Topik.....	49
2.2. Zoom.....	49
2.3. Ortiva.....	50
3. Conduite de l'essai.....	50
3.1. Les traitements étudiés.....	51
4. Echantillonnage.....	52
4.1. Choix du site.....	53
4.2. Méthodes d'échantillonnage.....	53
4.2.1. Méthode d'échantillonnage du végétal.....	53
4.2.2. Périodes de prélèvement.....	53
4.2.3. Conditions de prélèvement des échantillons et transport.....	53
4.2.4. Méthode d'échantillonnage du sol.....	54
4.2.5. Périodes de prélèvement.....	54
4.3. Périodes de traitement.....	56
5. Méthodes d'analyses.....	57
5.1. Méthode d'analyses physicochimiques du sol.....	57
5.2. Dosage de résidus de pesticides par la méthode d'HPLC de partage.....	58
5.3. Analyses des paramètres physiobiochimiques du végétal.....	58
5.3.1. Analyses des paramètres physiologiques.....	59
5.3.2. Analyses des paramètres morphologiques.....	60
5.3.3. Analyses de paramètres physiobiochimiques des feuilles du blé.....	60

5.4. Etudes des paramètres agronomiques du rendement.....	61
5.5. Traitements statistiques des données .....	61

## **Chapitre V : Résultats et discussion**

1. Analyses préliminaires.....	63
1.1. Paramètres physiologiques et morphologiques de la graine.....	63
1.2. Avant traitement et installation de culture (septembre 2009).....	67
1.2.1. Caractéristiques physicochimiques du sol.....	67
Conclusion.....	72
2. Campagnes étudiées.....	73
2.1. Campagne 2009- 2010.....	73
2.1.1. Caractéristiques physicochimiques du sol.....	73
2.1.2. Caractéristiques physiobiochimiques de la plante.....	90
2.1.3. Paramètres agronomiques.....	97
2.1.4. Dosage des résidus de pesticides .....	102
Conclusion.....	107
2.2. Campagne 2010-2011.....	108
2.2.1. Caractéristiques physicochimiques du sol.....	108
2.2.2. Caractéristiques physiobiochimiques de la plante.....	128
2.2.3. Paramètres agronomiques.....	136
2.2.4. Dosage des pesticides.....	141
Conclusion.....	145
2.3. Campagne 2011-2012.....	146
2.3.1. Paramètres physicochimiques du sol .....	146
2.3.2. Caractéristiques physiobiochimiques de la plante.....	163
2.3.3. Paramètres agronomiques .....	171
2.3.4. Dosage des pesticides .....	176
Conclusion.....	180

2.4. Campagne 2012-2013.....	181
2.4.1. Caractéristiques physicochimiques du sol .....	181
2.4.2. Caractéristiques physiobiochimiques de la plante .....	196
2.4.3. Paramètres agronomiques.....	205
2.4.4. Dosage des pesticides .....	210
Conclusion.....	217
3. Discussion générale.....	219
Conclusion générale.....	226
Références bibliographiques.....	229
Annexes	

## Introduction générale

Le phosphore est après l'azote l'élément nutritif le plus important pour la croissance et le développement des plantes cultivées. Appliqué en excès par rapport aux besoins des cultures, il s'accumule dans la couche arable des sols et peut ainsi contribuer à l'eutrophisation des eaux de surfaces. Lorsqu'il est déficitaire, la production agricole peut être affectée. Il est important donc de trouver un équilibre entre l'approvisionnement et la demande en phosphore des sols, particulièrement dans les systèmes de cultures intensives (Achat, 2010).

Maintenir dans les sols cultivés le phosphore à des niveaux permettant de minimiser son transport sans affecter les rendements, nécessite aussi de revisiter les outils de diagnostic utilisés pour suivre les évolutions de phosphore dans le temps. Dans cette optique, les systèmes de cultures fertilisés de longues durées sont d'une grande importance. Des études ont montré qu'en absence d'application d'engrais, le phosphore du sol diminue et dans une certaine mesure affecte le rendement des cultures ceci résulterait d'une accumulation du phosphore dans la couche labourée. Cette accumulation augmenterait le risque de perte de phosphore vers les eaux de surface avec des conséquences sur le fonctionnement des écosystèmes.

Le bilan des éléments est un outil diagnostic permettant d'évaluer la durabilité des écosystèmes cultivés (Goodlass *et al* ,2003). Le bilan inclut les flux entrants et sortants des éléments dans le profil du sol dans les limites de la différence entre les apports et les exportations cumulés au sol associée au système de cultures (Tunney *et al.*, 2003). On peut trouver le phosphore dans les engrais, dans la fumure organique et d'autres sources telles que les matières résiduelles fertilisantes, les exportations incluent le phosphore prélevé dans les produits de récoltes, généralement les graines mais aussi les résidus de culture (Blanco-Canqui et Lai ,2008) ou les pertes par ruissellement, lixiviation et érosion éolienne (Heckrath *et al* ,1995). Lorsque les apports et l'exportation sont équilibrés, il est généralement admis que le système de culture est durable, mais cette assertion n'est pas correcte si le statut du phosphore est trop faible pour une croissance optimale, ou très élevé avec un risque de perte de ce dernier.

Parmi les outils de diagnostic utilisés pour suivre les évolutions de phosphore dans le temps, les méthodes de quantification de statut de ce dernier jouent un rôle majeur. Les méthodes les plus utilisées en Amérique du Nord et au Canada en particulier sont les méthodes Olsen (Olsen *et al*, 1954) et Mehlich-3 (Mehlich, 1984). Théoriquement, elles permettent de caractériser le phosphore du sol disponible aux plantes. La méthode d'extraction à l'eau (Fardeau *et al.*, 1981 ; Morel *et al.*, 2000 &

Gallet *et al.*, 2003) permet de déterminer la concentration des ions orthophosphates ( $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$  et  $\text{HPO}_4^{2-}$ ) en solution. Elle est d'une importance capitale puisque les plantes absorbent dans la solution les ions orthophosphates nécessaires à leur croissance et développement. La variation des ions phosphore au voisinage des racines des plantes crée dans la rhizosphère un gradient de concentration entre la solution et la phase solide du sol (Hinsinger et Gilkes, 1996). Le réapprovisionnement de la solution du sol en ions phosphore se fait à partir de la phase solide du sol. Le mécanisme dominant qui contrôle le transfert de ces ions à l'interface solide-solution du sol est la diffusion (Barber, 1995). Être capable de déterminer la fraction de phosphore de la phase solide qui est susceptible de passer en solution sous l'effet d'un gradient de concentration et par diffusion améliorerait notre quantification de la disponibilité du phosphore du sol aux plantes. Une telle caractérisation serait dite mécaniste puisqu'elle prendrait en compte le fonctionnement des racines des plantes et les processus dominants qui contrôlent le transfert des ions phosphore entre la phase solide et la solution, et vice-versa. On aurait ainsi deux indicateurs quantitatifs pour évaluer la disponibilité du phosphore du sol aux plantes. Le premier indicateur est la concentration des ions orthophosphates de la solution du sol, et le deuxième indicateur est la quantité d'ions phosphore de la phase solide capable de passer en solution sous l'effet d'un gradient de concentration ou le phosphore diffusable.

La méthode de dilution isotopique est utilisée pour déterminer la quantité brute d'ions phosphore transférables par diffusion à l'interface solide-solide du sol (Frossard *et al.*, 1995). A l'aide de cette méthode, les cinétiques de transfert de ces ions à l'interface solide-solution du sol ont été décrites en fonction du temps (Morel et Fardeau, 1991 & Morel et Planchette, 1994).

Si le diagnostic sur l'enrichissement en phosphore et ses causes sont relativement faciles à poser, l'application d'une thérapie est plus ardue. En milieu sur-fertilisé, la poursuite des pratiques actuelles d'apports d'engrais phosphatés n'est pas réaliste, car elle ne s'attaque pas au problème central de l'enrichissement excessif des sols au cours des années. Seule une réduction des apports de phosphore à un niveau inférieur aux besoins des plantes permettra à terme d'absorber les excédents accumulés et de revenir à des niveaux de fertilité phosphorique des sols ne présentant plus qu'un risque réduit pour les eaux. A l'opposé, l'arrêt immédiat des apports de phosphore aux régions sur-fertilisées aurait pour conséquence soit des modifications drastiques des pratiques agricoles (charge en bétail, intensité d'exploitation) et de l'occupation du territoire par des familles paysannes, soit la mise en place d'un commerce d'exportation des engrais de fermes vers des régions du pays dont les sols seraient capables d'utiliser efficacement le phosphore. Le chemin est balisé par les données scientifiques et les réalités agronomiques, environnementales, sociales et politiques.

Dans le cadre d'amélioration de la quantité et la qualité des rendements, les agriculteurs utilisent le traitement combiné des fertilisants phosphatés et des pesticides.

Au cours des ces dernières années, l'intérêt de l'opinion publique mais aussi des chercheurs à l'égard de l'utilisation des pesticides et de ses conséquences sur l'environnement n'a cessé d'augmenter. Les études les plus fréquentes concernant la présence de ces molécules dans le sol (Senesi, 1992), la contamination des eaux, la dégradation biotique et abiotique des produits antiparasitaires (Muller *et al.*, 1978 & Bollag, 1982), leur utilisation comme source de carbone par les micro-organismes présents dans le sol et enfin l'identification de résidus qui apparemment semblent avoir un lien avec elles (Bollag, 1982 & Calderbank, 1989).

En présence de xénobiotiques, une réduction du processus de minéralisation va se produire, puisqu'une grande partie de l'énergie activée de la biomasse microbienne sera consacrée aux nouveaux produits (Anderson et Domsch, 1990). Une telle situation peut avoir des conséquences négatives de manière définitive sur la fertilité des sols. De même, les processus d'humification peuvent apparaître altérés, avec pour conséquences un appauvrissement des propriétés physiques, chimiques et microbiologiques du sol (Kirchner *et al.*, 1997).

Par ailleurs, les cultures agricoles peuvent être également lésées par des concentrations élevées de xénobiotiques. Les dommages causés sur les plantes par la pollution des pesticides peuvent se manifester de plusieurs façons. Ils peuvent aller de marques visibles (lésions nécrotiques) à la mort prématurée des plantes en passant par un ralentissement de croissance et une baisse de rendement. Les symptômes peuvent aussi être lents à se manifester et entraîner le jaunissement ou la chlorose de la feuille. Les pesticides pénètrent dans les feuilles par les stomates et sont transportés à l'intérieur des cellules et peuvent ainsi nuire à la respiration normale et aux mécanismes de la photosynthèse en altérant la chlorophylle, le transport des électrons et la photophosphorylation oxydative. Ils peuvent également perturber l'activité biochimique dont la synthèse des glucides et quelques acides aminés.

En Algérie, la fabrication des pesticides a été assurée par des entités autonomes de gestion des pesticides : Fertial, Moubidal. Mais avec l'économie de marché actuelle, plusieurs entreprises se sont spécialisées dans l'importation d'insecticides, d'herbicides et fongicides.

Ainsi environ 400 produits phytosanitaires sont homologués en Algérie dont une quarantaine de variétés sont largement utilisées par les agriculteurs. Récemment dans notre pays, l'usage des pesticides ne cesse de se multiplier dans de nombreux domaines et en grandes quantités. C'est le milieu agricole d'abord

qui utilise des tonnes de pesticides. Ces produits sont consacrés en majorité pour le traitement des cultures, la lutte contre les rongeurs pour augmenter la production agricole. Ainsi l'épandage est courant sur les champs dans le but de détruire les parasites pour la protection des récoltes. Les analyses des résidus de pesticides pour évaluer les degrés de contamination des milieux naturels (cultures, eaux superficielles...etc...) ne sont pas faites systématiquement. Des analyses effectuées sur des échantillons d'eau prélevées dans la région de Staouali (Alger) et d'Annaba ont montré que dans plus de 30 % des échantillons, la contamination de certaines molécules organochlorées et organophosphorées dépasse les valeurs préconisées par l'OMS (Moussaoui *et al.*, 2001). Cette utilisation nationale des produits phytosanitaires dans les cultures, fait craindre une pollution massive des sols, des eaux superficielles, des nappes souterraines et de tous les milieux physiques dans toutes les régions du pays.

Cette situation est d'autant plus préoccupante que l'usage des pesticides doit être répété périodiquement. Cette répétition à long terme, entraîne nécessairement une accumulation des pesticides et de leurs résidus dans nos milieux naturels, mettant en danger toute la population par leur toxicité multiforme. Face à cette situation alarmante, l'étude des effets des pesticides sur les différents écosystèmes naturels est primordiale.

C'est donc, dans ce contexte que nous avons mené nos recherches, qui consistent à déterminer les effets de la fertilisation phosphatée et le traitement des pesticides (fongicides, herbicides) utilisés à large spectre dans notre région sur la culture du blé dur (*Triticum durum* Desf).

La première partie de travail est consacrée à la revue de la littérature. Dans un premier temps nous avons défini la fertilisation phosphatée. Par la suite, il est important également d'étudier le phosphore dans le sol, les méthodes d'estimation et les engrais phosphatés. En passant aux pesticides et leurs devenir dans l'environnement.

La deuxième partie correspond à l'étude expérimentale, avec la présentation des différents essais réalisés, de leurs résultats et de l'interprétation qu'on peut leur donner.

Une discussion générale et conclusion de recherche terminent cette thèse.

L'objectif des essais entrepris sur des terres agricoles cultivées par des semences de blé dur (*Triticum durum* Desf) soumises à différentes doses de superphosphate et à différentes campagnes (2009-2010, 2010-2011, 2011-2012 et 2012-2013) est de réaliser une étude plus ou moins approfondie, sur l'effet de ce fertilisant et les pesticides choisis, sur les caractéristiques physico chimiques du sol, les paramètres physio biochimiques du blé et le rendement appuyée par une bibliographie.



La deuxième partie de l'expérimentation traite le devenir des trois molécules Topik, Zoom et Ortiva dans le sol. L'utilisation de la chromatographie en phase liquide a permis de quantifier les résidus de ces pesticides dans le sol.

## **Chapitre I : La fertilisation**

### **1. Généralités sur la fertilisation minérale du blé**

Les plantes prélèvent les éléments minéraux du sol pour produire les composés organiques. Il est établi que plusieurs éléments sont nécessaires pour le fonctionnement normal de la machine biochimique de la plante. Les éléments nutritifs doivent être présents sous une forme assimilable pour que les végétaux les absorbent. La fertilisation minérale a pour but d'apporter le complément nécessaire au sol en vue de répondre aux besoins physiologiques des plantes pour une croissance et un développement optimum (Gondé *et al.*, 1968 & Prats *et al.*, 1971).

De nos jours, on connaît plus de 100 éléments chimiques, mais seulement 17 sont considérés essentiels en raison de leur importance pour la croissance et le développement des plantes (tableau 1). Les éléments sont classés en trois catégories : les éléments essentiels majeurs (Azote, Phosphore, Potassium), les éléments secondaires (Calcium, Magnésium et Soufre) et les oligoéléments (Fer, Zinc, Manganèse, Cuivre, Bore, Molybdène, Chlore et Nickel) (Remy et Viaux, 1980).

La diversité et l'importance des fonctions remplies par les éléments minéraux confirment la nécessité de s'assurer de la disponibilité de ces éléments en quantités suffisantes pour une production optimale des cultures. Parmi ces 17 éléments chimiques, le carbone, l'hydrogène et l'oxygène sont prélevés à partir de l'air et de l'eau. Les 14 autres éléments sont normalement absorbés par les racines des cultures (Prats *et al.*, 1971). Ces éléments nutritifs utilisés par les plantes proviennent essentiellement d'après Bockman *et al.*, (1990) de :

- Libération d'éléments issus des réserves du sol ;
- Décomposition des débris de végétaux ;
- Fumure organique;
- Engrais minéraux ;
- Fixation biologique de l'azote;
- Dépôts aériens.

#### **1.1 Besoins du blé en éléments fertilisants**

Les besoins du blé en éléments fertilisants d'après Benaouda et Karrou (1994) sont compris entre 2.8 à 3.2 kg d'azote, 1 à 1.6 kg de  $P_2O_5$ , 3 à 4.8 kg de  $K_2O$  par quintal de production (grain + paille). En terme de grain, les besoins du blé tendre par quintal récolté sont de l'ordre de 2 à 3 kg d'azote, 1.2 à 1.5 kg de phosphore et 1.5 à 2 kg de potassium (Laloux *et al.*, 1980 & Arvalis, 2005).

## 1.2 Raisonnement de la fertilisation

Le terme fertilisation regroupe toutes les actions réalisées sur le sol afin d'améliorer sa fertilité et donc sa productivité. Cependant, la fertilisation désigne surtout les apports d'engrais et de fumier. Pour atteindre les meilleurs rendements, il faut satisfaire les besoins des cultures en éléments fertilisants par des apports d'engrais en quantités suffisantes. Une bonne gestion de la fertilisation minérale est une étape importante de la conduite culturale pour améliorer le rendement et maximiser les gains à l'hectare. La dose totale de l'engrais à apporter doit fournir la différence entre les besoins de la culture et la quantité disponible de l'élément dans le sol.

Par ailleurs, l'intégration de l'application des engrais dans un ensemble de bonne pratique agricole permet de subvenir aux besoins des plantes en éléments nutritifs, en quantités suffisantes et dans des proportions équilibrées, sous des formes assimilables et au moment où les plantes manifestent leurs besoins avec l'importance du respect des conditions de culture régional tels que le climat, le type de sol, la pratique de l'irrigation, les variétés...etc. La meilleure recommandation pour chaque région devrait être déterminée en collaboration avec les centres et stations expérimentales de recherche locaux et régionaux (El Gharous *et al.*, 1993).

En générale, toute recommandation en matière de fertilisation ne peut se faire qu'après analyse du sol. En effet, l'analyse de sol est primordiale afin de déterminer les quantités disponibles en éléments minéraux dans le sol et calculer les apports nécessaires par espèce. Les méthodes d'analyses doivent être calibrées et adaptées aux types de sol des régions (Chellali, 2007).

## 2. Fertilisation azotée

L'azote est indispensable à la croissance et au développement des plantes. Il est à la base de la synthèse des acides aminés (composantes des protéines) et des acides nucléiques (base de l'information génétique). Dans le sol, l'azote se trouve sous forme organique (humus) ou minérale (ammonium  $\text{NH}_4^+$ , nitrate  $\text{NO}_3^-$ ). L'azote organique doit être transformé par les micro-organismes du sol en nitrates qui sont utilisables par les plantes, c'est ce qu'on appelle la minéralisation (Braun *et al.*, 1996).

Les besoins en azote d'une culture de céréales varient au cours du cycle de la culture en fonction des différentes phases de développement. Plusieurs auteurs (Monneveux, 1990; Gate, 1995 & Mossedeq et Moughli, 1999) ont pu évaluer les besoins en alimentation azotée des céréales sur différentes phases:

**-Phase levée-début tallage:** durant cette phase, les besoins en azote sont faibles. Les apports azotés au semis contribuent à augmenter la vigueur des plantes pendant cette phase;

**-Phase début tallage-début montaison:** la mise à la disposition des plantes de doses optimales d'azote pendant cette phase favorise l'émission et la croissance des talles;

**-Phase début montaison-floraison:** l'activité intense de croissance (élongation d'entre-nœuds et accumulation de la biomasse) se traduit par une forte consommation d'azote. L'absorption azotée atteint son maximum à la fin de cette phase (Zimaoui, 1996);

**-Phase floraison-début maturation:** l'absorption se ralentit du fait de l'arrêt de croissance des parties végétatives. L'absorption de l'azote à partir des fournitures du sol diminue progressivement, et on assiste à une translocation des composés azotés protéiques depuis les organes végétatifs vers les grains;

**-Phase maturation et sénescence des parties végétatives:** perte d'eau, voire de matière sèche et de matière azotée.

A travers cette dernière étude de l'absorption azotée au cours du cycle de la culture, il se dégage que la phase tallage –floraison est la plus importante.

**Tableau 1.** Les besoins azotés du blé et de l'orge établis par zones agro climatiques dans le Maghreb (Boulal *et al*, 2007)

Zones agro climatiques	Rendements en grains prévisionnels (qx/ha)	Besoins en azote (kg/ha)	
		Blé	Orge
Semi-aride	10	30-35	25-30
	20	60-70	50-60
	30	90-105	75-90
Humide et Sub-humide	40	120-140	100-120
	50	150-175	125-150
Irrigué	60	180-210	150-180
	70	210-245	175-210

## 2.1 Formes d'azote dans le sol

Dans le sol, l'azote se trouve essentiellement sous trois formes: organique, ammoniacale et nitrique. L'azote est assimilé par la plante sous forme nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) ou ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ). Les plantes peuvent utiliser ces deux formes à la fois dans leur processus de croissance. Cependant, la partie la plus importante de l'azote absorbé par la plante est sous forme nitrate. Cet ion est mobile et circule avec la solution du sol vers les racines de la plante. Sous certaines conditions de température, d'aération, d'humidité et de pH, les micro-organismes du sol changent toutes formes d'azote en nitrates (Soltner, 2005).

*La forme organique* représente presque 95% de l'azote total du sol, notamment sous forme de matière organique. Cet azote est minéralisé progressivement sous l'action de la flore microbienne (1 à 2 % par an) pour se retrouver en fin d'évolution sous forme nitrique ( $\text{NO}_3^-$ ).

*Les formes inorganiques* sont constituées par l'azote nitrique ( $\text{NO}_3^-$ ), l'azote ammoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ), l'azote gazeux ( $\text{N}_2$ ) et nitrite ( $\text{NO}_2$ ). La fraction de l'azote minéral dans le sol représente moins de 5% de l'azote total. L'azote minéral se trouve principalement sous forme d'ammonium et nitrate (El Alaoui, 2007).

*La forme ammoniacale* ( $\text{NH}_4^+$ ) est le résultat de la première transformation de l'azote organique du sol. Cette forme est soluble dans l'eau et bien retenue par le pouvoir absorbant du sol. Elle est transitoire et sera transformée ensuite en azote nitrique.

*La forme nitrique* ( $\text{NO}_3^-$ ) est la plus mobile dans le sol et par conséquent la plus accessible aux plantes.

L'absorption de l'ammonium ou de nitrates dépend des conditions du milieu. L'ion ammonium peut inhiber l'absorption des nitrates. Lorsque les deux formes sont présentes à des concentrations égales, l'absorption de l'ammonium par les plantules de blé dépasse généralement celle des nitrates. Par ailleurs, l'absorption de l'une ou de l'autre forme dépend de l'espèce et de l'âge de la plantule. Les céréales préfèrent la forme ammoniacale durant les premières phases de leurs croissances (Wilson, 1997).

## 2.2 Carence et abondance de l'azote dans la plante

### 2.2.1 Carence

En situation de carence azotée, les plantes restent chétives, les feuilles se dressent, deviennent plus raides et tournent au vert-clair, les pétioles et les nervures sont plus prononcées à cause du retard de

développement des parties succulentes par un tallage défectueux et une extension anormale du système racinaire par rapport au système aérien. La teneur en protéines est souvent élevée (Gervy, 1970).

### 2.2.2 Abondance

Les feuilles sont vert-foncées, les plantes sont succulentes et très digestibles et il y a réduction des parties ligneuses. La maturité et par conséquent la récolte sont retardées, car l'azote stimule la croissance végétative au détriment des organes de reproduction. En cas d'excès d'azote, les céréales sont sujettes à la verse (Rabat, 2003).

### 2.3 Pratique de la fertilisation azotée

Parmi les méthodes de raisonnement de la fertilisation azotée, il y a la méthode du bilan minérale prévisionnel. Le bilan est calculé entre un état initial, représenté par la sortie de l'hiver, époque pendant laquelle les quantités d'azote minéral dans le sol sont relativement stables et un état final au moment de la récolte de la culture. Il consiste à équilibrer les besoins de la culture par une quantité d'azote disponible, provenant des fournitures du sol et d'engrais (Lerot, 2006).

### 2.4 Quantité d'azote à apporter

En matière de fertilisation azotée, la dose à apporter dépend des conditions de conduite de la culture (en irrigué ou pluvial), du précédent cultural et de la variété cultivée. Une méthode estimative simplifiée permet de calculer la dose à apporter en tenant compte du bilan prévisionnel qui correspond à la différence entre les besoins de la culture en éléments fertilisants et la quantité d'azote dans le sol selon la formule suivante :

$$\text{Dose d'engrais} = \text{Besoins de la culture} - \text{fourniture d'azote par le sol}$$

-les fournitures d'azote par le sol sont déterminées par les résultats des analyses du sol,  
-les besoins du blé en azote varient de 3 à 3.5 kg par quintal de grains récolté (Boulal *et al*; 2007 & El Alaoui, 2007) :

$$\text{Dose d'azote à apporter (kg /ha)} = G \times (R-r) \text{ CUA}$$

-G : quantité d'azote requise pour la production d'un quintal de grains,  
-R: rendement en qx/ha ;  
-r: rendement permis par la fertilité propre du sol (témoin sans azote) en qx/ha ;  
-CUA: coefficient d'utilisation apparent d'azote de l'engrais.

## 2.5. Dates de l'apport azoté

L'étude des besoins des céréales en azote au cours du cycle de la culture conduit à fractionner les apports azotés. Ce fractionnement permet d'éviter des apports d'azote importants, de couvrir les besoins de la plante en cours de son cycle et de minimiser les risques de perte par lessivage. En effet, le raisonnement de ces apports permet à la plante d'utiliser au maximum les engrais azotés apportés. Pour cela, les apports d'engrais azotés doivent être effectués à des stades de développement de la culture et non pas par rapport à des dates calendaires (Wilson, 1997).

**-Dans les zones semi-arides**, les principales dates d'apport de l'azote se situent au semis et pendant le tallage (engrais de couverture). Ces apports azotés stimulent le tallage pour obtenir un nombre suffisant d'épis.

**-Dans les zones humides et subhumides**, les apports azotés sont fractionnés au semis et au tallage, et si les conditions pluviométriques le permettent un troisième apport est réalisé à la montaison. En effet, les apports d'azote au stade épiaison (apparition du premier entre-nœud) sont très importants car ils favorisent la "montée" d'un nombre maximum d'épis et améliorent le rendement.

**-En irrigué**, il a été préconisé d'apporter 180 à 200 unités d'azote par hectare en trois apports: 1/3 en montaison tout en tenant compte des résultats des analyses du sol (Wilson, 1997).

## 2.6 Fertilisation azotée et son effet sur le rendement

La plus grande partie des travaux réalisés sur la fertilisation azotée a mentionné un effet significatif de la dose d'azote sur le rendement en grain du blé et de l'orge (Mossedeq, 1990; Khatibi, 1993 & Benihya, 1993). Ces effets de la fertilisation se répercutent particulièrement sur les composantes du rendement. Le nombre de grains/m<sup>2</sup> est la composante la plus dépendante de la fertilisation azotée. Cette composante du rendement est déterminée par le nombre d'épis/m<sup>2</sup> et le nombre de grains/épis (Ben Fredj, 1999).

La dose d'azote de 120 kg/ha permet de réaliser le rendement maximum. Le nombre d'épis/m<sup>2</sup> et le nombre de grains/épis ont été déterminants pour la réalisation de bon rendement. En effet, il y a de bonnes corrélations entre ces deux composantes et le rendement grains. En effet, pour assurer un rendement de 50 qx/ha, il est nécessaire de réaliser un nombre de 350 épis/m<sup>2</sup> au minimum. De même, il faut viser un nombre de grains/épis égal à 43 (Badraoui *et al.*, 2001).

## 2.7 Engrais azotés

Les principaux engrais azotés sont: le nitrate d'ammonium ou ammonitrate, le sulfate d'ammonium et l'urée. Ces engrais sont aussi efficaces les uns que les autres, pourvus qu'ils soient utilisés de façon adéquate (Boulal *et al.*, 2007).

**-Le nitrate d'ammonium ou ammonitrate:** Il est présenté sous la formule  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  et contient 33 à 34% d'azote. L'ammonitrate est un excellent engrais de couverture. Il a une action rapide par sa partie nitrique et une action plus soutenue par sa partie ammoniacale. Cet engrais est exposé au risque de lessivage dans le sol.

**-Le sulfate d'ammonium :** utilisé comme engrais de fond, se présente sous la formule  $\text{NH}_4\text{SO}_4$  et contient 21% d'azote en plus de 23% de soufre. Il est sous forme de cristaux blancs, peu solubles et faiblement hygroscopiques. L'action de cet engrais est lente et assez progressive. En plus de sa faible solubilité, il est nécessaire de l'enfouir au moment du labour ou du hersage. Grâce à sa grande stabilité chimique, le sulfate d'ammonium se conserve plus facilement.

**-L'urée :**  $\text{NH}_2\text{-CO- NH}_2$ , titrant 46% d'azote est l'un des principaux engrais azotés. Il est utilisé comme engrais de couverture, et représente l'engrais azoté le moins cher. L'inconvénient majeur à l'utilisation de l'urée est sa tendance à perdre l'ammoniac par volatilisation quand il est appliqué en surface. Aussi, il est déconseillé d'apporter l'urée sur un sol en période sèche. Le plus commode est de l'épandre lorsqu' on attend une chute de pluie. L'urée s'entrepose facilement et ne présente aucun risque d'explosion.

## 3. Fertilisation potassique

Le potassium est l'un des trois principaux éléments nutritifs des céréales. Une bonne nutrition potassique améliore la résistance des cultures à la verse, aux maladies et la sécheresse. Le potassium existe au niveau du sol sous forme minérale. Il provient soit de la décomposition de la matière organique et des minéraux du sol, soit des engrais.

Le potassium est absorbé par la plante sous sa forme ionique  $\text{K}^+$ . Il est essentiel pour la transformation des sucres et pour la formation de l'amidon. Il intervient dans la régulation osmotique et ionique, ainsi que dans le processus d'ouverture et de fermeture des stomates. Le potassium est nécessaire pour plusieurs fonctions enzymatiques et pour le métabolisme des protéines et des carbohydrates (Eliard, 1979).



### **3.1 Formes du potassium dans le sol**

Pour raisonner la fertilisation potassique, il est nécessaire de connaître la dynamique du potassium dans le sol ainsi que les modalités de l'alimentation potassique des plantes. Dans le sol, le potassium se trouve sous quatre formes principales de valeur inégale pour la plante. Celles-ci seront traitées ci-après en plusieurs formes immédiatement disponibles pour la plante, soit respectivement: le potassium dans la solution du sol, le potassium adsorbé, le potassium à l'intérieur des réseaux cristallins et le potassium non échangeable (Schwartz *et al.*, 2005).

#### **3.1.1 Potassium dans la solution du sol**

Le potassium dans la solution du sol est directement absorbé par la plante. Cette fraction du potassium est la plus faible et la plus variable dans le sol. La vitesse de réapprovisionnement de la solution du sol en potassium est une caractéristique intrinsèque du sol. Cette capacité est appelée "le pouvoir tampon". Quand les plantes puisent leurs besoins en potassium du sol par absorption racinaire, les sols argileux réapprovisionnent plus rapidement la solution du sol en cet élément que les sols sableux.

#### **3.1.2 Potassium adsorbé**

Il existe un équilibre entre le potassium de la solution du sol et celui qui est adsorbé sur le complexe d'échange cationique, les deux états constituent un tout utilisable pour l'alimentation de la plante: c'est le potassium échangeable ou assimilable.

Le potassium échangeable correspond à la quantité de  $K^+$  de la solution du sol et celle adsorbée sur le complexe d'échange et qui est extractible avec une solution d'acétate d'ammonium normale et neutre. En utilisant l'acétate d'ammonium, 95% du potassium adsorbé sur le complexe argilo-humique du sol peuvent être extraits. Le potassium échangeable est un très bon indice de la disponibilité du potassium dans les sols.

#### **3.1.3 Potassium à l'intérieur des réseaux cristallins**

C'est le potassium interne qui intervient plus difficilement dans l'alimentation de la plante. En effet, les ions  $K^+$  ne restent pas tous adsorbés à l'extérieur du complexe d'échange, ils peuvent aussi pénétrer à l'intérieur entre les feuillets d'argile. On dit alors que le potassium est rétrogradé ou fixé sous forme non échangeable. Mais quand le potassium repasse à l'extérieur du complexe, il redevient utilisable par la

plante. On dit alors que le potassium est régénéré. Cette forme du potassium peut dans certaines conditions contribuer de manière significative à l'alimentation des plantes.

### 3.1.4 Potassium non échangeable

Les formes cristallines et volcaniques sont généralement riches en potasse (2 à 7% dans les feldspaths du granite), mais cette potasse se trouve sous forme pratiquement insoluble donc inutilisable par la plante. Toutefois, sous l'action des agents atmosphériques et des racines, une petite fraction pourrait être mise à la disposition des plantes (Prévost, 1990).

### 3.2 Carence et abondance du potassium dans la plante

Les symptômes visuels de déficience se caractérisent par des nécroses sur feuilles âgées. Une carence en potassium se montre clairement par une couleur verte foncée et des troubles d'évaporation dus à un fonctionnement défectueux de la régulation stomatique.

Sur céréales, les symptômes de carence se remarquent par un jaunissement de la pointe des feuilles. Sur maïs, on observe une ondulation de la feuille avec couleur plus claire. Sur pomme de terre, les folioles se courbent vers le dessus avec coloration vert bleu autour des nervures, puis brune au bord des feuilles. Sur vigne, on remarque une coloration violacée des feuilles (Moughli, 2000).

### 3.3 Exigence des cultures vis-à-vis du potassium

Il serait faux de croire que toutes les espèces ont la même exigence vis-à-vis de la fertilisation potassique. Les essais au champ montrent, en effet, que dans une même parcelle, l'impasse sur la fertilisation potassique n'a pas les mêmes conséquences sur toutes les espèces. La production de certaines est fortement pénalisée, alors que d'autres ne le sont pas ou peu. De même, certaines nécessitent souvent des apports importants d'engrais, alors que dans le même sol, d'autres satisfont de quantités moindres (Arvalis, 2005).

**Tableau 2.** Classement des cultures selon leurs exigences en  $K_2O$  (Arvalis, 2005)

Très exigeantes	Betterave, Pomme de terre.
Moyennement exigeantes	Colza, Luzerne, Maïs, Pois, Ray-Grass, Soja, Tournesol
Peu exigeantes	Avoine, Blé dur, Blé tendre, Orge, Seigle, Sorgho

### **3.4 Pratique de la fertilisation potassique**

#### **3.4.1 Doses**

Le raisonnement de la fertilisation potassique diffère selon que l'on dispose ou non de l'analyse chimique du sol. Pour les sols pauvres en potassium, la fumure potassique est la somme arithmétique de redressement et de fumure d'entretien. La fumure de redressement représente la quantité d'engrais à fournir au sol pour relever sa richesse à un niveau satisfaisant. La quantité à apporter pour combler un déficit de 10 ppm s'élève à environ 50 unités/ha. La fumure d'entretien est le produit du rendement escompté et quantité de potassium exportée par unité de rendement. En plus, il faudrait majorer la valeur obtenue pour tenir compte du pouvoir fixateur du sol qui est d'autant plus important que les sols sont argileux (Deblay, 2006).

Si l'on ne dispose pas d'analyses de sol, la fumure potassique est réduite au calcul de dose d'entretien, ce qui pourrait engendrer des risques, à savoir:

- Sur-fertiliser un sol bien pourvu, et par conséquent augmenter inutilement les charges.
- Sous-fertiliser un sol pauvre et contribué davantage à son appauvrissement.

#### **3.4.2 Période d'emploi des engrais potassiques**

Les engrais potassiques sont des engrais de fond et leur apport se fait avant ou au moment du semis. Les meilleurs résultats sont obtenus, quand on procède à l'enfouissement des engrais au moment des travaux préparatoires des sols, surtout dans le cas des sols pauvres. En sol riche, la date d'apport est moins cruciale et on peut même appliquer l'engrais en couverture lorsqu'on utilise des engrais composés. Dans ce cas, la date d'application doit être raisonnée en fonction de l'azote (Balleux et Lerberghe, 2001).

#### **3.4.3 Quantités de potasse à apporter**

Les recherches menées sur la fertilisation potassique ont montré que la plus part des régions céréalières sont suffisamment pourvues en potassium. Dans le cas des sols carencés en potassium, des apports d'entretien s'avèrent nécessaires. La quantité de potasse à apporter peut être calculée par la méthode simplifiée du bilan (Morel, 1989) :

$$\text{Dose d'engrais} = \text{Besoins de la culture} - \text{fourniture de potassium par le sol}$$

**Tableau 3.** Doses conseillées en K<sub>2</sub>O selon la teneur du sol en potasse (Arvalis, 2005).

	Teneurs en K <sub>2</sub> O échangeable		
	130 ppm	190 ppm	280 ppm
Maïs (100 qx/ha)	80	60	0
Blé (80 qx/ha)	40	0	0
Pois (60 qx/ha)	120	120	140

### 3.5 Réponse du blé à la fertilisation potassique

La réponse du blé au potassium sur un contenant 153 mg/kg a été négative. Les travaux antérieurs avaient montré le même résultat sur un sol contenant 140 mg/kg. Nous pouvons donc conclure qu'un sol ayant plus de 140 mg/kg peut être considéré bien pourvu en potassium pour la culture du blé (Diehl, 1974).

### 3.6 Engrais potassiques

Les teneurs en potassium des engrais potassiques sont exprimées en oxyde de potassium (K<sub>2</sub>O). Les principaux engrais potassiques sont le chlorure de potassium et le sulfate de potassium

**-Le chlorure de potassium (KCl) :** renferme 60% de K<sub>2</sub>O, il est soluble et moyennement hygroscopique.

**-Le sulfate de potassium (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) :** renferme 46 à 50% de K<sub>2</sub>O et apporte 17% de soufre.

La formule de conversion de la teneur du K<sub>2</sub>O en K est la suivante (Mathieu et Pieltain ,2009) :

$$\% \text{ K}_2\text{O} \times 0.83 = \% \text{ K}$$

### 3.7 Lessivage du potassium : un effet très marginal

Quant il pleut en hiver, une partie du potassium, c'est moins vrai pour le phosphore, peut être entraînée en profondeur. La quantité ainsi perdue dépend de la quantité d'eau drainante, de la texture, de la profondeur du sol, du couvert végétal, de son enracinement et de la concentration de la solution du sol. Un sol argileux est lourd et draine peu, un sol sableux peut entraîner un lessivage plus important, jusqu'à 60 kg/ha/an. Mais, dans la plus part des sols, avec une fumure adaptée, on estime le lessivage annuel moyen de la potasse à 10-20 kg/ha. Ce phénomène est donc marginal (Arvalis, 2005).

## **Chapitre II : Le phosphore dans le sol**

### **1. Découverte et historique du phosphore**

En 1669, un alchimiste de Hambourg, Henning Brandt, découvrit une extraordinaire substance (Gervy, 1970). Le hasard de ces travaux vers la recherche de la pierre philosophale, l'avait mis en présence du « Phosphore ». Ce mot fut rapidement adopté pour désigner un corps mystérieux, capable de luire dans l'obscurité et de s'enflammer spontanément au contact de l'air.

Kunckel, autre alchimiste, pris connaissance de cette découverte et voulut en connaître le secret. Il fait isoler le phosphore à partir l'urine. Mais en 1769 Scheel montra que le phosphore est un constituant de l'os, dès l'année suivante, il mit au point un procédé de préparation qui remplaça l'inconfortable méthode des alchimistes du 17<sup>ème</sup> siècle. Certes, des utilisations de fertilisation phosphatée ont été pratiquées avant que le phosphore ne soit isolé ; mais elles étaient empiriques et totalement inexplicables (Gervy, 1970).

### **2. Phosphore et notre planète**

La quantité totale du phosphore présent dans notre planète a été estimée de l'ordre de  $10^{19}$  tonnes dont un dix-millième,  $10^{15}$  tonnes se trouverait présent dans la croûte terrestre (Gervy, 1970).

Le phosphore de la lithosphère existe constamment sous une forme oxydée pentavalente correspondant à l'anhydride phosphorique  $P_2O_5$ . D'après certains auteurs, un état trivalent du phosphore, sous la forme de phosphore  $PH_3$ , serait toutefois présent dans les gaz des marais.

On sait que les phosphates condensés se forment par polymérisation de l'acide ortho phosphorique ( $H_3PO_4$ ), à la suite d'un départ de molécule  $H_2O$ . De tels phosphates ont été mis en évidence dans les tissus vivants ; mais dans l'eau et le sol, ils sont plus ou moins rapidement hydrolysés sous des influences chimiques et bactériennes (Gervy, 1970).

Plus de deux cent minéraux phosphatés ont été dénombrés dans la nature, seul le groupe des apatites qui a une réelle importance.

### **3. Statut du phosphore dans le sol**

Le phosphore représente environ 0.12 % des éléments constitutifs de l'écorce terrestre (Messiga, 2010). Les gisements de phosphore naturel dont la teneur est comprise entre 100 et 140 g par  $kg^{-1}$  constituent les sources de phosphore dans le monde (Morel, 2002). Les principaux gisements de phosphore se trouvent au Maroc (35%), en Chine (23%), en Afrique du Sud (9%) en Jordanie (9%), et aux Etats-Unis

(6.8%) (Messiga, 2010). Le phosphore dans les phosphates naturels est généralement sous forme apatique. Cette forme de phosphore est peu soluble à l'eau. Tous les engrais phosphatés sont produits à partir de l'acide phosphorique qui est obtenu en faisant réagir les phosphates naturels et l'acide sulfurique (Messiga, 2010).

Dans la couche arable des sols de grandes cultures des régions tempérées, le phosphore varie entre 100 et 2000 mg/kg de sol, ce qui représente entre 250 et 7000 kg de phosphore par hectare (Grant *et al.*, 2005). Les plantes prélèvent du sol en moyenne 30 kg de phosphore par hectare et par an pour satisfaire leurs besoins. Deux tiers environ des quantités prélevées sont exportées hors de la parcelle cultivée et le reste est restitué au sol par les résidus de culture (Messiga, 2010).

### **3.1 Cycle biochimique du phosphore dans les écosystèmes cultivés**

L'altération et l'érosion des roches ignées sous l'influence de divers facteurs climatiques et de l'eau ont probablement été les premiers moyens de diffusion du phosphore sur notre planète (Gervy, 1970).

Le cycle biogéochimique du phosphore dans les parcelles cultivées intègre l'ensemble des stocks de phosphore dans le sol (figure 1), les réactions de transformation et les flux impliqués dans la circulation entre les différentes composantes de l'écosystème (Messiga, 2010).

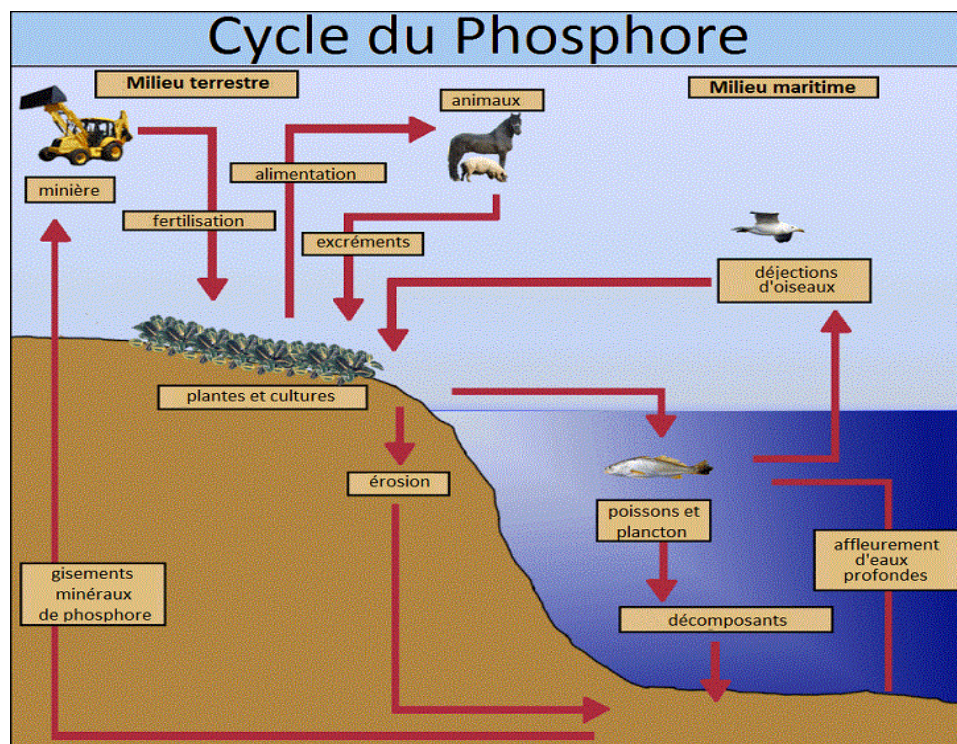
Le phosphore peut être introduit dans la parcelle cultivée sous la forme d'engrais minéraux ou de ferme (fumiers, fientes, lisiers), de phosphore contenu dans les semences, de matières résiduelles fertilisantes (boues de stations d'épuration, compost...), ou de dépositions atmosphériques (Morel, 2007). Les résidus de culture constituent aussi une source de phosphore du sol. Les différents compartiments que sont le phosphore minéral, organique et microbien interagissent sous l'effet de mécanismes physicochimiques, biologiques et biochimiques.

On peut citer les réactions d'échange d'ions, d'adsorption et de désorption, de précipitation et de solubilisation, de diffusion intra-particulaire, de minéralisation et d'immobilisation, d'oxydo-réduction, acido-basiques. Ces réaction peuvent entraîner la libération des ions phosphore depuis la phase solide vers la solution ou au contraire, soustraire des ions phosphore de la solution au profit de la phase solide (Messiga, 2010).

Une partie du phosphore du sol est exportée hors de la parcelle cultivée avec les produits récoltés, les parties aériennes ou simplement les graines. Les sorties de phosphore de la parcelle cultivée se font aussi sous forme de pertes par lixiviation, ruissellement de surface et de profondeur et écoulement préférentiel (Haygarth et Sharpley, 2000 & Simard *et al.*, 2000).

La différence entre les sorties et les entrées de phosphore à l'échelle de la parcelle cultivée est exprimée sous la forme d'un bilan de phosphore. Lorsqu'il est correctement estimé, il peut constituer un bon indicateur pour suivre les évolutions du statut de phosphore dans le temps (Meal *et al.*, 2008).

Le calcul du bilan de phosphore peut se faire de manière simple en intégrant uniquement les entrées de phosphore par les différentes sources d'engrais et les sorties par les produits récoltés (Blanco-Canqui *et al.*, 2008). Cependant, les nouvelles connaissances sur l'impact environnemental du phosphore, le rôle du phosphore dans l'eutrophisation des cours d'eau et lacs, impose une estimation des entrées et sorties de phosphore à l'échelle de la parcelle cultivée (Tunney *et al.*, 2003).



**Figure 1.** Cycle de phosphore dans le sol (Pellerin *et al.*, 2005)

### 3.2 Formes de phosphore dans le sol

Le phosphore est présent dans les sols cultivés sous trois formes : le phosphore inorganique qui représente 75% du phosphore total, le phosphore organique 20% et le phosphore associé à la biomasse microbienne 5% (Grant *et al.*, 2005).

Le phosphore inorganique dans le sol se trouve dans la solution du sol sous forme d'ions orthophosphates ( $H_2PO_4^-$  et  $HPO_4^{2-}$ ), il est aussi lié au fer, à l'aluminium et au calcium (Gervy, 1970 ; Pierzynsky *et al.*, 2005 & Achat, 2009). Le phosphore organique du sol est défini comme celui lié au carbone. Il provient des restes des animaux, des résidus de végétaux et est synthétisé par les

microorganismes du sol (Messiga, 2010). Il se trouve dans le sol sous forme de phosphate d'ester, d'inositol phosphate, d'acides nucléiques et de phospholipides (Corbridge, 2000). Les ions orthophosphates absorbés par les microorganismes du sol rentrent dans leur constitution en se liant au carbone par phosphorylation (Condrón *et al.*, 2005).

### **3.2.1 Phosphore total du sol**

La quantité de phosphore présent dans un sol est une conséquence directe de la richesse de la roche mère, mais cette conséquence est diversement modifiée par certains processus caractéristiques de l'évolution du sol, tels que l'accumulation de la matière organique, le lessivage (latérisation, podzolisation, décalcification), le mode de mise en valeur, etc...

Les teneurs en phosphore total des roches ignées sont plus élevées, elles atteignent couramment 1.5 à 4 % dans le cas des roches volcaniques et 1 à 3 % chez les roches cristallines (Gervy, 1970).

Dans les sols sédimentaires, les teneurs se situent généralement entre 0.3 et 0.8 %, quand il s'agit de sédiments provenant directement de roches volcaniques, la teneur en phosphore total du sol rejoint les ordres de grandeur qui caractérisent les roches volcaniques (Gervy, 1970).

### **3.2.2 Formes organiques**

Le phosphore organique peut être défini comme le phosphore présent dans un composé en tant que constituant, c'est-à-dire le phosphore ayant liaison avec le carbone ou l'hydrogène (Turner *et al.*, 2005). Le phosphore organique représente environ 20 % du phosphore total dans l'horizon arable des sols et peut atteindre jusqu'à 50 %. Sa teneur dans le sol est fonction de celle de la matière organique qui contient 0.5 % de phosphore (Messiga, 2010). Le phosphore organique du sol peut être regroupé en quatre classes (O'Halloran et Cad-Menun, 2007) :

- la classe de monoester d'orthophosphate qui sont des esters d'acide phosphorique incluant l'inositol phosphate, les sucres phosphatés, les phospho-protéines et les mono-nucléotides ;
- La classe des phosphates diester qui inclut l'ADN, l'ARN, les phospholipides et les composés aromatiques ;
- La classe des phosphonates qui inclut les acides phosphoniques et les phosphonolipides caractérisés par des liaisons C-P au lieu des liaisons esters ;
- La classe des orthophosphates anhydrides.



Ces formes de phosphore organique ont été mises en évidence grâce aux techniques telles que la résonance magnétique nucléaire au  $^{31}\text{P}$  et l'hydrolyse enzymatique (Condrón *et al.*, 2005). Les acides nucléiques sont plus abondants dans la matière organique fraîchement incorporée au sol, mais du fait de leur dégradation rapide, leur teneur dans le sol est généralement faible (Barber, 1995). La minéralisation de la matière organique contrôle la libération du phosphore organique dans la solution du sol. Les microorganismes jouent un rôle important dans la minéralisation du phosphore organique à travers des processus complexes qui sont encore très mal compris.

Ces processus peuvent cependant être séparés en trois catégories (Turner *et al.*, 2006) : l'acquisition du phosphore des formes stables, la minéralisation du phosphore des résidus ajoutés au sol et la minéralisation du phosphore de la biomasse microbienne.

Les microorganismes peuvent aussi retenir dans leurs cellules ce phosphore issu de la minéralisation, on parle alors d'immobilisation. Ce processus est très important notamment dans les sols des tropiques, parce qu'il empêche l'adsorption de ce phosphore par le sol (Messiga, 2010).

### **3.2.3 Phosphore de la solution du sol**

Les concentrations de phosphore dans la solution du sol sont généralement faibles (Barbier, 1995) et varient entre 0.02 et 1.2 mg/l. Les formes ioniques dominantes sont les ions  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  et  $\text{HPO}_4^{2-}$ . Ces formes sont influencées par le pH de la solution du sol. A des pH inférieurs à 7.2, la forme  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  prédomine et aux pH supérieurs à 7.2, la forme  $\text{HPO}_4^{2-}$  prédomine. A pH égale à 7.2 les deux formes s'équilibrent (Barber, 1995 & Pierzynski *et al.*, 2005 ).

Lorsque les sols reçoivent des apports de phosphore sous forme d'engrais, la concentration en ions phosphates de la solution du sol peut augmenter dépendamment du statut phosphaté et du type de sol (Kovar et Barber, 1988). Cette augmentation de la concentration en ions phosphates est bénéfique pour la croissance des plantes cultivées, mais peut aussi constituer un risque pour l'environnement (Messiga, 2010).

Les ions phosphates sont des molécules capables de se lier à d'autres entités chimiques pour former des complexes plus larges. Ils ont fortement tendance à se complexer avec des cations  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$  dans les sols alcalins et Fe et Al dans les sols acides. Dans les sols acides, les oxydes de Fe et d'Al sont très solubles et les concentrations des cations Al et Fe peuvent être élevées en solution. Dans les sols alcalins, les oxydes de Fe et d'Al sont peu solubles et le phosphore inorganique est essentiellement complexé au Ca et au Mg, de façon moins importante, au Mg. Cette spéciation dépend par ailleurs de la présence d'autres ligands compétiteurs et notamment des ligands organiques (Achat, 2009).

A l'interface solide-solution, de nombreux processus physico-chimiques (adsorption/désorption, précipitation/dissolution, diffusion) régulent la concentration des ions phosphates en solution (Morel, 2002).

### **3.2.4 Phosphore du sol disponible aux plantes**

La quantité de phosphore capable de participer à l'alimentation des végétaux, a été l'objet de longues et patientes recherches qui se sont principalement engagées dans la définition de réactifs chimiques propres à déceler la fraction de phosphore dite « assimilable ». A la notion de réserve globale de phosphore s'est très vite substituée celle de quantité facilement accessible aux racines des plantes, c'est-à-dire capable de participer à la fois à l'alimentation du végétal et au maintien de la concentration de la solution du sol en phosphore (Gervy, 1970).

La disponibilité de phosphore, définie comme le flux de phosphore susceptible d'être absorbé par une plante, est gouvernée par l'absorption racinaire et par la disponibilité chimique de phosphore dans le sol (Hinsinger *et al.*, 2007). Elle est aussi influencée par des processus physico-chimiques et biochimiques qui ont lieu dans la rhizosphère. Le siège du prélèvement de phosphore est la solution du sol. Les espèces absorbées par les racines sont les ions phosphates. Cette absorption entraîne une diminution de la concentration des ions orthophosphates dans la solution du sol. Le réapprovisionnement de la solution du sol se fait à partir de la phase solide du fait d'un gradient de concentration qui s'établit entre les deux phases. Quantitativement, la solution du sol ne joue qu'un rôle minime dans la nutrition phosphatée. Des études ont montré que environ 99 % du P prélevé des plantes au cours d'un cycle de culture proviennent de la phase solide (Grant *et al.*, 2005 & Morel, 2007).

Le transfert du phosphore de la phase solide vers la solution du sol se fait par diffusion et de nombreux mécanismes rhizosphériques peuvent intervenir dans ce changement de phase (Hinsinger, 1998).

### **3.2.5 Méthodes d'estimation du phosphore assimilable**

#### **3.2.5.1 Tests chimiques**

Les méthodes d'analyses diffèrent suivant les pays, les laboratoires et le type de sol. Les méthodes d'analyses ont en commun le but de faire connaître la part du phosphore présent dans le sol, considéré comme susceptible de participer à l'alimentation des plantes.

Parmi les réactifs utilisés, on peut citer (Gervy, 1970) :

-Acide citrique 1% : France, Royaume-Unis

- Acide citrique 2 % (Deyar) : France, Pays-Bas, sol acide ou très peu calcaire.
- Acide nitrique (Schlœsing-de Sigmond) : France
- Acide acétique 0.5 N : Royaume-Unis
- Acide sulfurique 0.2 N : Danemark
- Acide carbonique et bicarbonate de Mg (Dirks and Scheffer) : Suisse, Grèce
- Lactate de chaux et acide lactique pH= 3.7 (Egner)
- Citrates de soude : Sol calcaire
- Oxalate d'ammonium (Joret-Hébert) : Sol calcaire et limon au voisinage de la neutralité.
- 0.5 M  $\text{NaHCO}_3$  à pH 8.5 (Olsen)
- 0.03 M  $\text{NH}_4\text{F}$  + 0.025 M HCl (Bray 1)

### **3.2.5.2 Extraction en présence de résine synthétique**

L'agitation d'un échantillon de terre dans une solution aqueuse contenant des grains d'amberlite (résine synthétique électro-positive) permet de faire passer les ions phosphoriques dans la phase liquide et de les soutirer au moyen de la résine qui les fixe au fur et à mesure de leur mise en solution. Il suffit ensuite de séparer la résine enrichie en ions phosphoriques et de doser la quantité de phosphore qu'elle a retenue pour connaître celle que l'échantillon de terre peut donner (Gervy, 1970).

### **3.2.5.3 Méthode de dilution isotopique**

La méthode de dilution isotopique consiste en un marquage des ions orthophosphates du pool labile de la phase solide du sol par des ions orthophosphates radioactifs  $\text{P}^{32}$  et  $\text{P}^{33}$  (Fordeau *et al.*, 1985). Le  $\text{P}^{32}$  et  $\text{P}^{33}$  émettent chacun un rayonnement bêta et ont respectivement une demi-vie de 14.3 et 25.3 jours. Ces caractéristiques font de ces deux radio-isotopes des éléments à manipuler avec beaucoup de précaution. Le plastique et le plexiglas arrêtent la particule bêta (Messiga, 2010).

La dilution isotopique s'appuie sur le fait que les différents isotopes de  $\text{P}^{32}$  et  $\text{P}^{33}$  ont un comportement strictement identique et qu'il n'y a pas de discrimination isotopique durant les phénomènes étudiés. La mise en œuvre de cette technique dans l'évaluation de la disponibilité du phosphore des sols cultivés repose sur les résultats de nombreux travaux menés principalement en France. Ces résultats ont permis d'établir le poids respectif des différents mécanismes rhizosphériques dans l'acquisition et la

disponibilité du phosphore du sol. La diffusion et le gradient de concentration entre la phase solide et la solution étant les plus importantes. La détermination au laboratoire dans des suspensions de sol, de la quantité d'ions phosphates dissous et de la quantité d'ions phosphate diffusibles sur la période de culture permet de comprendre que l'origine du phosphore est l'ensemble de ces ions en solution et des groupements phosphates du sol qui diffusent à l'interface sol-solution (Messiga, 2010).

### **3.2.6 Phosphore adsorbé et précipité**

Le phosphore apporté au sol sous forme d'engrais peut réagir avec les oxydes, les hydroxydes de fer et d'aluminium (Hodford et Patrick, 1979) et les carbonates de calcium (Gervy, 1970). Ces réactions peuvent être une adsorption du phosphore à la surface de ces composés ou une précipitation sous forme de composés stables. L'adsorption du phosphore avec le fer et l'aluminium se déroule principalement dans les sols acides alors que celle des carbonates de calcium a lieu dans les sols alcalis. Malgré l'importance des études sur la compréhension des mécanismes d'adsorption et de précipitation du phosphore dans les sols de différents écosystèmes, il subsiste toujours une controverse sur la quantification de cet élément apporté au sol qui sera adsorbée ou précipitée (Barber, 1995). Des études ont montré qu'une augmentation équivalente à moins de 9 mg/l dans la solution du sol résulte en une adsorption de phosphore mais au-delà, ce dernier précipite avec les oxydes de fer et d'aluminium et les carbonates de calcium selon le type de sol (Messiga, 2010).

Le phosphore adsorbé joue un rôle important dans le réapprovisionnement de la solution du sol. En effet, lorsque la concentration en phosphore de la solution du sol diminue suite au prélèvement par les racines des plantes, cet élément adsorbé diffuse vers la solution afin de rétablir l'équilibre phosphaté entre celle-ci et la phase solide. Des études basées sur l'utilisation du  $P^{32}$  ont montré que le rétablissement de l'équilibre entre la solution et la phase solide est un processus qui se déroule en deux temps : une phase initiale caractérisée par un taux de diffusion rapide et une phase d'équilibration lente. Le phosphore adsorbé équilibre rapidement la solution pendant les premières 24 ou 48 heures est appelé arbitrairement phosphore labile alors que le phosphore de la phase lente est appelé non labile (Barrow, 1983 & Messiga, 2010). Il ressort ici une double classification du phosphore de la phase solide : le phosphore adsorbé et le phosphore précipité d'une part, le phosphore labile et non labile d'autre part. La deuxième classification revêt un grand intérêt du point de vue nutrition végétale puisqu'elle permet de comprendre la cinétique des ions phosphates entre la solution et la phase solide. Elle permet aussi de quantifier le stock d'ions phosphates du sol susceptible de contribuer à la nutrition des plantes cultivées (Messiga, 2010).

### 3.2.6.1 Précipitation-dissolution des ions phosphates

La précipitation du phosphore avec un cation est observée lorsque les concentrations de ces deux éléments sont suffisamment élevées. Elle entraîne une diminution de la concentration du phosphore en solution et la formation d'un solide dans lequel ce dernier et le cation sont présents en stœchiométrie caractéristique du minéral formé (Frossard *et al.*, 2004).

Les précipitations de phosphate de fer et d'aluminium que l'on rendait autrefois responsable d'importantes pertes de phosphore dans le sol. Pourtant la précipitation des sels de fer et d'alumine reste possible jusqu'à des pH faiblement acides mais elle se fait en partie avec l'anion OH<sup>-</sup>, à l'état hydrates et totalement sous cette forme quand le pH est alcalin (Gervy, 1970).

Lorsque le phosphore est apporté en présence de calcite pure (CaCO<sub>3</sub>), on observe une adsorption de P sur la surface de la calcite, puis un nucléus apparaît autour duquel commencent à précipiter du phosphate de calcium (Frossard *et al.*, 2004). Ils suggèrent que la formation du nucléus ne débute pas sur la phase solide, mais en solution. Ensuite apparaissent des composés tels que le phosphate monocalcique Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, le phosphate dicalcique dihydraté CaHPO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O, le phosphate amorphe tricalcique Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>. La précipitation des différents phosphates de calcium augmente lorsque le pH et les concentrations de P et de Ca augmentent (Lindsay *et al.*, 1989 & Frossard *et al.*, 2004).

Ces formes, citées ci-dessus ne font néanmoins pas partie des réserves inassimilables du phosphore existant dans le sol. Des modifications de pH, l'action de la matière organique, l'activité microbienne, la possibilité d'utilisation directe des phosphates minéraux par plusieurs espèces végétales font que ces formes de phosphore exercent un rôle non négligeable dans la nutrition des plantes (Gervy, 1970).

Quand le pH augmente, la solubilité des phosphates de Fe et d'Al augmente alors que celle des phosphates de Ca diminue (Hinsinger, 2001).

### 3.2.6.2 Adsorption-désorption des ions phosphates

#### -Adsorption des ions phosphates

L'adsorption-désorption est un processus important qui régule la concentration des ions phosphates en solution (Barrow, 1987). L'adsorption correspond à un passage de ces ions de la solution de sol vers la phase solide mettant en jeu des liaisons électrostatiques ou d'échange de ligands (Achat, 2009). Les ions phosphates sont chargés négativement, ils sont alors adsorbés par des constituants solides chargés positivement. L'adsorption est un phénomène de surface conduisant à l'accumulation d'ions à l'interface solide et liquide (Achat, 2009).

A des stades plus avancées de la pédogénèse, le phosphore libéré par dissolution de l'apatite va soit réagir avec des minéraux issus de l'altération des minéraux primaires comme les oxydes de fer ou d'aluminium, les argiles ou les carbonates ou être prélevé par les végétaux ou la microflore du sol et revenir au sol après avoir été recyclé dans des chaînes trophiques complexes (Syers et Curtin, 1989). L'adsorption de phosphore est plus forte sur les oxydes métalliques, suivant les argiles et les substances organiques. Parmi les oxydes métalliques, on observe une adsorption plus importante de phosphore sur la ferrihydrite suivie de la goethite, la gibbsite et l'hématite. Ces variations sont expliquées en première approximation par la densité des sites de sorption à la surface de l'oxyde et par sa surface spécifique (Achat, 2009 & Messiga, 2010). La présence de cations bivalents tels que le calcium ( $\text{Ca}^{++}$ ), accroît considérablement les possibilités d'adsorption de l'argile vis-à-vis des ions phosphoriques (Gervy, 1970).

L'adsorption de phosphore diminue lorsque le pH de la solution augmente, donc lorsque la surface de l'oxyde devient de plus en plus électro-négative. Elle diminue fortement lorsque des molécules simples comme le citrate, le malate, le succinate, le trans-aconitate ou le sulfate, ou des composés plus complexes tel que l'acide polygalacturonique. La diminution de l'adsorption de phosphore en présence de petites molécules chargées négativement s'explique par leur adsorption sur les mêmes sites que ceux utilisés par le phosphore et par une diminution de la charge de surface de l'oxyde (Achat, 2009).

#### **- Désorption des ions phosphates**

La désorption de phosphore de la phase solide d'un sol est gouvernée par le gradient de concentration existant entre la phase solide et la solution. Plus ce gradient est élevé, plus le flux de phosphore quittant la phase solide est important (Frossard *et al.*, 2004).

De nombreuses méthodes ont été utilisées pour caractériser les cinétiques de désorption de phosphore des sols : des extractions à l'eau ou avec du  $\text{CaCl}_2$  ; des extractions mettant en jeu un « puits » (résine anionique, papier imprégné d'oxyde de fer, oxydes de fer apportés dans un sac à dialyse, réacteur en flux continu) qui diminue la concentration du phosphore en solution, et des méthodes d'échanges isotopiques qui permettent de suivre les aller et retour de cet élément entre la phase solide et la solution (Sharpley, 1985).

Des résultats issus des approches convergent pour montrer que si la concentration du phosphore en solution suffisamment basse et si le temps de désorption est suffisamment long, une très large fraction de cet élément minéral, si ce n'est pas la totalité, peut être devenue disponible pour les racines. Par contre, la vitesse par laquelle ces ions vont quitter la phase solide pour arriver en solution est très

variable, dépendant des formes de phosphore présentes sur la phase solide et du chemin qu'il devra faire à travers les agrégats pour arriver en solution (Frossard *et al.*, 2004).

La désorption du phosphore intervient par échange de ligand. Elle a lieu du fait, soit d'un abaissement de la concentration en ion P en solution, soit d'une augmentation de la concentration en anion compétiteurs (Hinsinger, 2001)

### **3.2.6.3 Immobilisation du phosphore dans le sol**

Le phosphore organique diminue lorsqu'un sol est mis en culture sans apport d'engrais phosphaté, mais il augmente lorsque le sol cultivé retourne sous forme de prairie ou de jachère. Cette variation indique qu'il existe dans le sol différents pools de phosphore organique réagissant à différentes vitesses vis-à-vis des variations environnementales. A côté de la biomasse microbienne qui peut représenter 1 à 10 % du phosphore total d'un sol cultivé (Oberson et Joner, 2004 & Frossard *et al.*, 2004). Des pools de phosphore organique, peuvent rapidement stocker ce dernier et ensuite le libérer vers la solution. Enfin d'autres pools, contenant probablement dans la plus part des cas la majeure partie du phosphore organique, ne varient que très lentement dans le temps. Les facteurs contrôlant l'immobilisation de cet élément chimique dans le sol sont au niveau de l'horizon : la végétation, la biomasse microbienne, la faune du sol et les propriétés du sol, et à un niveau plus général : le type de sol, et son utilisation et le climat (Frossard *et al.*, 2004).

### **3.2.6.4 Minéralisation du phosphore organique du sol**

La minéralisation des racines, des résidus de culture ou de matière organique exogène peut par contre représenter une source significative de phosphore pour les plantes. Des résidus végétaux marqués au P<sup>32</sup> montrent que le prélèvement de phosphore issus de ces résidus par une plante test peut être similaire à celui observé en présence d'un engrais phosphaté soluble dans l'eau (Thibaud *et al.*, 1988 & Frossard *et al.*, 2004). Ce type d'observation a conduit à proposer, pour améliorer la nutrition phosphatée en milieu tropical humide, l'apport de résidus de plantes comme *Thitonia diversifolia* présentant des teneurs élevées en phosphore ou de faire pousser des jachères de courte durée qui peuvent le remonter et le déposer en surface sous forme de litière .

La biodégradation de résidus de culture, de racines ou de matières organiques exogènes est effectuée par des chaînes alimentaires complexes faisant intervenir des interactions entre la faune du sol (vers de terre), la microfaune (protozoaires, amibes), et la microflore (champignons et bactéries) dont le fonctionnement est fortement influencé par les conditions de température, humidité du sol, présence de carbone comme source d'énergie, structure du sol et d'autres éléments nutritifs (Frossard *et al.*, 2004).

## **4. Phosphore dans le monde vivant**

Le phosphore est un constituant essentiel du monde vivant, végétal et animal. Sur un plan quantitatif, le phosphore constitue le cinquième élément constitutif des êtres vivants, après le carbone, l'hydrogène, l'oxygène et l'azote. Mais sur un plan qualitatif, il joue un rôle central dans l'organisation de la vie telle que nous la connaissons. Il compose l'« épine dorsale » des molécules d'ADN et ARN et rentre dans la composition du carburant universel du vivant, l'adénosine triphosphate (ATP). Il joue aussi un rôle majeur dans l'architecture du vivant, que ce soit dans les os ou d'une manière plus générale dans les phospholipides qui composent les parois cellulaires. Le phosphore est un élément nutritif indispensable pour les plantes, car il intervient dans la respiration, la photosynthèse (production, stockage, transport et utilisation de l'énergie). Le phosphore favorise le développement racinaire et donc l'alimentation de la plante, sa croissance, sa précocité. Le phosphore joue un rôle dans la fructification et la reproduction des végétaux (Aubert, 2007).

### **4.1 Prélèvement du phosphore par les plantes**

Les besoins totaux maximum en phosphore des cultures annuelles, mesurés comme la quantité totale de phosphore présente dans les parties aériennes et racinaires de la culture au maximum d'absorption de phosphore, varie selon Jourdan *et al.* (1994) de 20 kg P/ ha/ an' pour la pomme de terre à 60 kg P/ ha/ an pour le lupin blanc. Le prélèvement de phosphore est faible pendant les stades précoces de développement de la culture, la plante utilise alors les réserves phosphatées présentes dans la graine. Par contre le rythme de prélèvement journalier de phosphore devient très élevé pendant la période de croissance rapide des cultures ; il peut atteindre jusqu'à 0.9 kg P/ ha / jour chez la betterave (Jourdan *et al.*, 1994). La betterave et la pomme de terre réagissent très rapidement et fortement par une baisse de rendement lorsque la disponibilité du phosphore du sol devient limitant, le colza réagit plus que les céréales et le blé plus que le maïs (Boniface et Trocmé, 1988 ; Johnston *et al.*, 2001 & Gallet *et al.*, 2003).



**Tableau 4.** Teneurs moyennes du phosphore dans les organes végétaux (Ryser *et al.*, 2001).

Cultures	Organes récoltés	Teneurs g/ kg/ MS (Gallet <i>et al.</i> , 2003)	Teneurs g/ kg/ MS (Ryser <i>et al.</i> , 2001)
Betterave	Racine	1.98	1.74 - 2.62
Mais	Grain	2.88	2.05 - 4.11
Pomme de terre	Tubercule	2.73	1.99 - 3.97
Soja	Grain	6.01	5.14 - 9.25
Blé	Grain	4.05	3.60 - 5.14
Orge	Grain	5.29	3.60 - 5.14
Colza	Grain	6.99	6.31 - 9.22
Prairie temporaire	Première coupe	3.64	3.06 – 4.15
Prairie permanente	Première coupe	2.31	3.06 – 4.15

#### 4.2 Symptômes visibles de carence en phosphore

Les signes généraux du manque de phosphore sont liés à un développement anormalement faible du végétal, cette réduction porte à la fois sur les parties aériennes et souterraines. Les feuilles se singularisent par leur port érigé et leur feuille généralement plus pointue que la normale, elle reste petites et tombent prématurément. Un retard dans l'éveil des bourgeons et une floraison réduite sont souvent observés sur les arbres et les arbustes (Gervy, 1970).

Des caractères plus spécifiques du manque de phosphore sont notés sur le feuillage qui prend une teinte plombée ou mate, vert bleuté avec parfois des colorations pourpres allant même jusqu'au rouge.

Sur les céréales (blé, orge et avoine), il s'agit principalement d'une coloration anormale du feuillage qui se manifeste par une teinte pourpre et un rougissement. Cette pigmentation se localise sur des lignes parallèles aux nervures et affecte parfois la tige de la céréale (Gervy, 1970).

### **4.3 Réponse de la plante à une carence en phosphore**

Chez les plantes carencées en phosphore, le faible flux de phosphore provenant de la racine par le xylème peut être compensé par une mobilisation du phosphore stocké dans les vacuoles et par une hydrolyse des formes organiques de phosphore présent dans les tissus âgés de la plante et leur transfert vers les parties en croissance. La carence en phosphore entraîne une diminution de la photosynthèse et une augmentation de la teneur en amidon des chloroplastes, liée à la diminution du transfert de triose phosphate vers le cytoplasme (Rausch et Bucher, 2002).

Une réaction connue des plantes suite à une carence en phosphore assimilable est l'augmentation des sécrétions racinaires. Ainsi, le lupin blanc développe des racines protéoïdes ayant une très grande surface et exsudant des flux importants d'acide citrique et de phosphatase dans la rhizosphère (Neumann et Martnoia, 2002). L'acide citrique dissout les phosphates de calcium initialement insolubles, le citrate complexe le Ca et le phosphore assimilable qui est ensuite prélevé par la racine (Frossard *et al*, 2004).

La libération de phosphatases permet l'hydrolyse de formes organiques des phosphates du sol entraînant la libération de phosphore assimilable est ensuite prélevé par la racine. L'acidification du sol liée à une sécrétion de protons dans la rhizosphère en réponse à une carence en phosphore assimilable a été observée chez le colza (Hinsinger, 2001).

## **5. L'apparition des fertilisants phosphatés**

Dès 1804, le genevois Théodor de Saussure, trouvant des concentrations beaucoup plus importantes de phosphore dans les cendres des végétaux que dans le sol, émettait l'hypothèse que des plantes absorbaient le phosphore à partir de dissolution du sol par les racines. En se basant sur ces travaux et ceux de Carl Spengel publiés en 1826, Justus Von Leibig publie en 1840 les principes de base de la nutrition minérale des cultures démontrant que les apports de phosphore étaient indispensables pour augmenter le rendement des cultures (Boulaine, 1992 & Robin et Blondel-Mégrelis, 2001).

Les travaux de Lawes et de Murray pendant la première moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle en Angleterre et en Ecosse permettaient de démarrer la production industrielle des engrais phosphatés minéraux à partir de la dissolution des os puis des phosphates naturels en milieu acide. Ce sont ces apports d'engrais phosphatés qui supprimant la carence en phosphore des cultures, ont permis une augmentation des rendements mettant enfin à la disposition de la population de plus en plus attirée vers les centres industriels une nourriture à meilleur marché (Boulaine, 1992).

## **6. Engrais phosphatés**

On peut trouver les engrais phosphatés sous plusieurs formes : simples, binaires et ternaires.

## **6.1 Engrais phosphatés simples**

### **6.1.1 Phosphates moulus**

Que ce soit sous forme brute, broyé ou pulvérisé, à l'état de noir animal ou de déchets de coutellerie, les os ont été les premiers engrais phosphatés employés.

### **6.1.2 Phosphates calcinés**

Le traitement physique subi par les phosphates naturels lors du broyage qui les transforme en phosphates moulus n'altère en rien la molécule apatite où l'anhydride phosphorique ( $P_2O_5$ ), se trouve combiné au calcium et généralement au fluor.

Les traitements chimiques ont précisément pour but de rompre son édifice moléculaire, d'en libérer le fluor et d'aboutir à la formation de phosphate calcique doué d'une solubilité variable, toujours supérieure à celle de l'apatite originelle (Gervy, 1970).

### **6.1.3 Phosphal**

C'est un engrais phosphaté calciné dont l'emploi s'est développé en France depuis 1950. D'autres pays d'Europe, d'Afrique et la Nouvelle Zélande en font également usage. Il résulte du traitement thermique d'un phosphate naturel, phosphate double de chaux et d'alumine au Sénégal. Mais ce traitement se fait sans adjonction de silicate ou de silice, ni de sels alcalins ou alcalino-terreux, il contient 34.6 % de  $P_2O_5$ , de couleur rouge due à l'oxyde de fer libéré lors du traitement, il est pratiquement neutre, sa dissolution dans l'eau pure donne une solution à  $pH = 7.1$  (Gervy, 1970).

### **6.1.4 Scories de déphosphoration**

Les scories de déphosphoration ou scorie Thomas, sont un sous-produit de l'industrie sidérurgique européenne. La France, l'Allemagne, l'Angleterre et la Suède sont les pays qui disposent de minerais de fer dont la teneur en phosphore atteint des valeurs rendant indispensable l'élimination de cet élément pour produire des aciers de qualité, il est soluble dans l'acide citrique, et titrant entre 16 et 20 % de  $P_2O_5$ , il s'utilise sous forme pulvérulente (Gervy, 1970).

### **6.1.5 Superphosphate normal**

Il résulte de la réaction d'attaque du phosphate naturel par l'acide sulfurique, c'est-à-dire qu'une molécule de phosphate tricalcique  $Ca_3(PO_4)_2$ , mise en présence de deux molécules d'acide sulfurique donne un mélange de phosphate mono-calcique  $CaH_4(PO_4)_2$  et de gypse  $CaSO_4, 2H_2O$ . C'est ce

mélange qui fut appelé longtemps « superphosphate de chaux », de nos jours le nom de « superphosphate normal » lui a été donné pour distinguer d'autres superphosphates plus riches en  $P_2O_5$ .

La teneur du superphosphate normale en  $P_2O_5$  soluble eau et citrate est comprise entre 16 et 24 %, lors des divers réactions chimiques confèrent au superphosphate une faible acidité libre qui va en diminuant lors du murissement et pendant la période de stockage en vrac (Gervy, 1970).

#### **6.1.6 Superphosphate concentré**

Le superphosphate concentré s'est d'abord fait connaître sous les appellations de « Superphosphate double », puis de « Superphosphate triple » ; récemment, en 1965, il a été jugé préférable de lui appliquer la dénomination de « Superphosphate concentré ».

Son dosage est habituellement compris entre 43% et 48% de  $P_2O_5$  soluble eau et citrate, ce qui correspond au triplement du  $P_2O_5$  d'un superphosphate normal 15% aujourd'hui disparu. Le superphosphate 18 % étant le plus répandu dans la catégorie « superphosphate normal ».

La différence fondamentale qui sépare le superphosphate normal et le superphosphate concentré réside dans le remplacement de l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) qui permet l'obtention du premier, par l'acide phosphorique ( $H_3PO_4$ ). La quasi-totalité du  $P_2O_5$  de ces engrais est engagée dans le phosphate monocalcique soluble eau (Gervy, 1970).

#### **6.1.7 Phosphate bicalcique**

Le phosphate dicalcique ( $H_2CaPO_4$ ) est rarement rencontré à l'état naturel ; il se présente sous forme de cristaux incolores, blancs ou jaunâtres. Il résulte d'une réaction d'attaque d'un phosphate tricalcique naturel ou d'un phosphate d'os avec l'acide phosphorique. Son dosage habituel est compris entre 36% et 40 % de  $P_2O_5$  soluble dans le citrate de Joulie (citrate d'ammoniaque alcalin) (Gervy, 1970).

### **6.2 Engrais binaires**

On trouve surtout, le superphosphate ammonié, dont le phosphate mono-ammonique  $(NH_4) H_2PO_4$ , le phosphate di-ammonique  $(NH_4)_2 H_2PO_4$ , les phosphates et les polyphosphates d'ammoniaque. On trouve aussi les nitro-phosphatages et les complexes NP et les engrais binaires phosphates et potassique, dont le phosphate monopotassique  $KH_2PO_4$  (Gervy, 1970).

### **6.3 Engrais ternaires**

Engrais à trois éléments, les ternaires sont une des principales sources de  $P_2O_5$  pour l'agriculture. L'acide phosphorique des engrais ternaires pulvérulents à son caractère de solubilité lié à l'engrais phosphaté qui l'apporte dans le mélange. Dans les engrais complexes,  $P_2O_5$  est le plus souvent sous forme soluble eau et citrate d'ammonique, lié à des combinaisons chimiques qui résultent des réactions nombreuses et des équilibre qui s'établissent entre les substances qui servent à les fabriquer, dont principalement (Gervy, 1970) :

- Acide sulfurique, phosphorique, nitrique séparés ou associés ;
- Phosphates naturels ;
- Sels de potasse : chlorures, sulfates ;
- Ammoniac, nitrate d'ammoniaque.

### **7. Le phosphore origine de l'eutrophisation**

Si le potassium ne présente aucun risque pour l'environnement, il n'est pas le même pour le phosphore. Certes, ce dernier indispensable à la vie des végétaux et des animaux, n'est pas en lui-même dangereux. Cependant, il peut être à l'origine des phénomènes d'eutrophisation lorsqu'il est rejeté en trop grande quantité dans les eaux des lacs et des rivières.

L'eutrophisation se manifeste par un dérèglement des écosystèmes aquatiques qui conduit à la prolifération des algues. Les eaux deviennent alors progressivement impropres pour les usages habituels (captage d'eau potable, pêche, tourisme,..). La croissance des algues est régie par le rapport des concentrations en azote et phosphore de l'eau (N/P). Or, le phosphore est naturellement peu abondant dans les eaux douces à tel point que sa faible présence y limite le développement des algues, tout apport extérieur ne peut donc que contribuer à accroître la teneur des eaux en phosphore et enclenchera de ce fait le processus d'eutrophisation (Arvalis, 2005).

L'intensification de la production agricole se traduit par une forte augmentation des teneurs en phosphore des horizons de surface des sols cultivés et des prairies et par une augmentation des pertes en phosphore vers les écosystèmes aquatiques par érosion, ruissellement, lessivage ou lixiviation (Frossard *et al.*, 2004).

Le phosphore provenant des eaux usées des habitants et des industries a été largement éliminé et ce sont à présent les apports de phosphore provenant de l'agriculture qui expliquent les teneurs trop élevées en phosphore des lacs et donc leur statut eutrophe (Braun *et al.*, 1994).

Le respect des règles de fertilisation peut contribuer à limiter ces risques d'origine agricole en évitant une cause de problème : la surfertilisation (Arvalis, 2005).

## **Chapitre III : Les pesticides**

### **1. Définition des pesticides**

Le terme pesticide désigne un produit chimique employé contre les parasites animaux et végétaux des cultures susceptibles d'être nuisibles à l'homme ou à l'environnement (Periquet, 1989).

Les pesticides appartiennent à la grande famille des produits phytosanitaires (relatifs aux soins à donner aux végétaux), qui englobe plus largement les pesticides et d'autres produits chimiques ou naturels.

### **2. Types de pesticides**

Il existe plusieurs types de pesticides, mais les grands groupes de ces produits chimiques sont :

#### **2.1 Insecticides**

Produits capables de provoquer la mort des insectes, parmi les insecticides on peut citer : les carbamates, les pyréthrine, les organophosphorés et les organochlorés.

#### **2.2 Herbicides**

Produits chimiques complexes destinés au contrôle des mauvaises herbes et végétaux ligneux. Les herbicides agissent sur une cible biochimique d'action, parfois plusieurs, la conséquence est généralement le blocage d'une fonction avec des répercussions dommageables pour la cellule végétale.

#### **2.3 Fongicides**

Produits chimiques utilisés pour lutter contre les champignons et les moisissures. Ils sont le plus souvent de nature synthétique (Regnault-Roger, 2005). Les fongicides ont plusieurs actions, biochimiques, sur les métabolites, et sur les liaisons vanderwals, hydrogènes, ioniques et covalentes (Devillers, 2005).

### **3. Propriétés physico-chimiques des pesticides**

Les pesticides regroupent une grande diversité de structures chimiques et chaque molécule constitue une entité qui se caractérise par un ensemble de propriétés bien spécifiques (taille moléculaire, encombrement stérique, basicité ou acidité, constante de dissociation, coefficient de partage octanol-eau, solubilité dans l'eau, tension de vapeur) (Bidleman, 1988 & Koskinen *et al.*, 1990).

En milieu acide, les bases faibles prédominent sous forme protonée, tandis que les acides faibles sont sous forme non dissociée (Calvet, 1989). Le caractère hydrophobe d'un pesticide augmente lorsque sa

solubilité dans l'eau diminue, il en résulte une rétention plus intense par la matière organique du sol (Baily et White, 1970 & Calvet *et al*, 2006).

La force d'attraction entre la molécule adsorbée et une surface argileuse est directement proportionnelle à son pôle dipolaire et inversement proportionnelle à sa constante diélectrique. Plus un cation a un pouvoir de polarité élevé, plus l'adsorption sera importante (Baily et White, 1970).

La taille de la molécule va avoir un effet sur l'adsorption par le volume et la surface qui lui sont associés. Le volume aura une influence en particulier sur la capacité des produits organiques à être adsorbés et sur les surfaces internes des minéraux. L'orsqu'on examine l'adsorption d'un composé, les caractéristiques de la molécule pesticide ne doivent pas être considérées de manière individuelle, car elles interagissent simultanément.

#### **4. Classification des pesticides**

Les pesticides peuvent être classés selon :

##### ***-La nature chimique***

On distingue des produits inorganiques, des produits organiques, des produits extraits des plantes, des produits de synthèse, des médiateurs chimiques et autres.

##### ***-Les activités biologiques***

On parle des composés à action purement physique ou des produits à action physiologique ou biologique.

##### ***-Le mode de pénétration***

On distingue les pesticides d'ingestion, d'inhalation et les systémiques qui sont absorbés par les végétaux dont la sève devient toxique pour le prédateur. De la même façon on distingue les insecticides de contact et ceux de la translocation interne.

##### ***-L'effet obtenu***

On parle d'insecticides ou de fongicides polyvalents, herbicides totaux, produits sélectifs ou spécifiques.

##### ***-L'utilisation***

Les pesticides peuvent être utilisés soit en traitement préventif (prophylactiques) soit en traitement curatif (thérapeutique) dont l'effet peut être local (topique) ou général (systématique).



### ***-Epoque d'application***

Pesticides de post-semis ou de pré-semis, et de post ou prélevée.

## **5. Mode d'emploi des pesticides**

Les principales méthodes utilisées sont :

### ***-Pulvérisation***

Le produit en solution ou en suspension dans un volume d'eau déterminé est projeté en gouttelettes aussi fines que possible formant brouillard.

### ***- Poudrage***

Le produit actif mélangé avec un support pulvérulent et projeté par un ventilateur sur les plantes.

### ***- Fumigation***

Le produit actif ou son support sont rendus gazeux par vaporisation ou chauffage et se répandent sur la surface ou denrée, ou dans l'enceinte fermée (serre).

### ***- Enfouissement***

C'est le cas pour certains produits de destruction des parasites vivants dans le sol, qui peuvent même être mélangés aux engrais (Aldrin, Heptachlore.....).

### ***-Enrobage***

Est pratiqué, en particules pour les semences, soit avec des liquides, soit avec des poudres.

## **5.6. Les appâts**

Les pesticides sont supportés par un produit qui sert d'appât en attirant le parasite à détruire (destruction des limaces, des corbeaux, des rongeurs) (Gondé *et al*, 1962).

## **6. Utilisation des pesticides**

Il ya une croissance très importante de l'utilisation des pesticides surtout dans les pays en voie de développement.

### **6.1. Usage en agriculture**

Même si les grandes famines tendent à disparaître, la pénurie alimentaire reste de manière chronique et constitue un des problèmes de notre temps. On estime que 50% de la population mondiale ne reçoit pas une ration alimentaire suffisante. L'Afrique étant le continent le plus touché. La solution à ce problème impose l'augmentation et la rentabilité des cultures. L'homme doit donc protéger ses récoltes contre les ravageurs et en même temps accroître la productivité de ses cultures.

En effet la production agricole mondiale subit une baisse de 40% due aux dégâts des parasites et des ravageurs de culture. Ces pertes sont plus importantes dans les pays en voie de développement. En Afrique la production agricole subit une perte annuelle de 42% dont 13% due aux insectes, 13% aux maladies fongiques et 16% aux mauvaises herbes. Ceci explique la nécessité d'une protection phytosanitaire efficace et adéquate (Gilles, 1991).

### **6.2. Usage pour la santé animale**

Un certain nombre de maladies du cheptel sont traitées par des insecticides et des acaricides, en l'occurrence la gale et la teigne. Les animaux sont souvent traités par des insecticides chimiques. La désinfection des locaux d'élevage entre aussi dans ce cadre, elle se fait par le phosphore d'aluminium et le phosphore de zinc.

### **6.3. Usage pour la santé publique**

La santé publique tire profit de l'utilisation des pesticides dans l'éradication des maladies transmises par les vecteurs et dans la lutte contre les moustiques. En effet des maladies telles que le paludisme, la bilharziose, le typhus et la peste ont pu être éradiquées ou du moins, vu leur endémicité fortement diminuée par une lutte anti vectorielle par les pesticides. En 1935 on dénombrait 6000 cas de peste en Afrique, à la suite de traitement raticide, on ne dénombrait plus que 4000 en 1949 (Lamrini, 1978).

### **6.4. Usage pour l'industrie**

C'est un usage moindre par rapport à l'usage agricole et animal. Il concerne surtout le stockage des denrées alimentaires et des produits altérables par l'attaque de certaines moisissures.

## **7. Devenir des pesticides dans l'environnement**

Les pesticides qui sont employés se retrouvent à l'état de traces plus au moins importantes dans quasiment tous les écosystèmes de notre planète. Ils prennent plusieurs chemins tels que la dispersion, la bioaccumulation et la dégradation (abiotique et biotique). Les matières actives phytosanitaires sont

appliquées le plus souvent sous forme de liquide pulvérisé sur les plantes et/ou sur le sol. Dans certains cas elles sont incorporées dans le sol, injectées ou déposées sous forme de granulés.

La moitié du produit peut être entraînée par le vent en dehors de la zone à traiter (Pimentel et Levitan, 1986). Ces pesticides peuvent influencer sur les effets environnementaux en modifiant le mode de dispersion du produit ou sa persistance (Levitan, 1995). Les matières actives peuvent se volatiliser, ruisseler ou être lessivées et atteindre les eaux de surface ou souterraines.

### **7.1. Volatilisation**

C'est l'une des causes principales de fuites de pesticides hors de la zone cible, ces pertes dépassent souvent en importance celles dues à la dégradation chimique, ou au ruissellement et à la lixiviation (Taylor et Spencer, 1990) ; les molécules pesticides peuvent être véhiculées fort loin par les courants aériens et compensés par la dilution très rapide dans l'atmosphère.

La constante de Henry, rapport de la pression de vapeur à la solubilité dans l'eau, rend mieux compte du taux de volatilisation d'une substance que sa seule pression de vapeur (Jury, 1984 ; Spencer et Cliath, 1990 & Dabéne et Marié, 1993). On a d'autre part, rapporté que les vapeurs pouvaient être concentrées dans les gouttelettes de brouillard puis redéposées sur les végétaux (Glotfelty, 1987).

### **7.2. Ruissellement et lixiviation**

L'eau peut entraîner la dispersion des pesticides dans le milieu par lavage des feuilles, ruissellement et lixiviation. Le ruissellement contribue à la pollution des eaux de surface tandis que la lixiviation contribue surtout à celle des eaux profondes (Leonard, 1990). Le ruissellement peut être défini comme le mouvement de l'eau à la surface du sol, et des matières dissoutes et suspendues qu'elle contient éventuellement (Leonard, 1990). Cet écoulement peut entraîner des pesticides dissous, en suspension ou adsorbés sur les sédiments. Leonard (1979), à partir des données de nombreux bassins versants, a trouvé que la concentration en pesticides dans les écoulements de surface était fortement corrélée aux concentrations mesurées dans les 10 mm supérieurs du sol. Leur incorporation réduira les risques de perte par ruissellement (Larson, 1995).

Les matières actives solubles peuvent être entraînées dans le sol par lixiviation durant la pluie mais cependant, si le délai entre le traitement et la première pluie est bref, la concentration dans l'eau de ruissellement peut être plus forte pour les produits solubles. La mobilité des pesticides provoque le risque de pollution des eaux souterraines (Jury, 1987 & Gustafon, 1989).

### 7.3. Bioaccumulation

Toute substance qui contamine le milieu naturel peut être concentrée par les êtres vivants grâce aux échanges permanents avec le milieu extérieur et aux divers processus métaboliques. Cette concentration se fait selon un niveau variable suivant le maillon de la chaîne trophique considéré et qui subit les effets à long terme. Les végétaux absorbent les pesticides par le système racinaire. Cette accumulation dans la biomasse des producteurs primaires à un taux bien supérieur à celui du sol, constitue le premier maillon de la concentration des chaînes trophiques alimentaires. Il y a également une concentration verticale des toxiques, le long des chaînes trophiques, et le plus haut coefficient de concentration se trouve au niveau du dernier maillon.

Ces concentrations en résidus totaux chez les prédateurs peuvent être suffisantes pour compromettre leur reproduction et même dans certains cas plus rares, faire périr les adultes. Une faible contamination initiale peut conduire à des cas de stérilité ou de mortalité en bout de chaîne (Digeronimo, 1987).

Une étude a montré que le DDT présent à un taux d'environ  $2.10^{-6}$  ppm dans l'eau, passe à  $4.10^{-2}$  ppm dans le plancton, 1,5 ppm chez les poissons de taille moyenne et enfin à 20 ppm pour les oiseaux de proie de ces poissons. La concentration est passée donc de  $2.10^{-6}$  ppm à 20 ppm ; soit multipliée par un facteur de 10 millions (Lafont, 1975).

### 7.4. Dégradation

La dégradation constitue le processus qui conduit à la dispersion réelle de la matière active, soit par transformation partielle ou totale de la molécule d'origine en molécules inorganiques tel que :  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $NO_3$  (Yajuraju, 1994 & Calvet *et al.*, 2006). Du point de vue environnemental la dégradation doit être considérée en prenant compte les voies métaboliques. Lorsqu'elle est rapide et totale, elle contribue à la réduction du risque de dispersion de la matière active ou de ses métabolites. Dans la nature, il existe deux types de dégradation : dégradation abiotique et dégradation biotique.

#### 7.4.1 Dégradation abiotique

Elle regroupe les processus de transformation physiques et chimiques subis par les pesticides (Ristori et Fusi, 1995).

- **Dégradation chimique** : peut se faire dans la solution du sol ou dans l'eau, l'hydrolyse acide ou basique est la réaction la plus fréquente. Elle conduit le plus souvent à des produits intermédiaires polaires (Calvet *et al.*, 2006) et donc des hydrosolubles que le composé parent (Senesi, 1993). Dans le sol, le rôle de l'acide humique dans la transformation abiotique des pesticides est moins étudié que

celui des argiles (Amstrong, 1991 & Metinnen, 1993). Pour les argiles, la transformation est en fonction du cation ou du métal de transition impliqué dans l'adsorption (Fusi, 1991 & Fusi, 1993). Hormis son influence sur l'état d'ionisation de la matière active, le pH agit sur les processus de dégradation dont le mécanisme peut être différent selon que le milieu est acide ou basique (Hequet, 1995). Dans certains cas, les molécules d'eau se comportent en catalyseurs de l'hydrolyse abiotique, lorsqu'elles sont sous forme hautement polarisée à la surface d'un oxyde (Wolf, 1990). Le pH et la température semblent également avoir un impact sur le processus d'hydrolyse qui est favorisé lorsque cette dernière augmente (Taylor, 1995 ; Dominique, 2000 & El Bakouri, 2002).

**-Dégradation physique :** premier facteur nécessaire à une transformation physique est un facteur qui apporte l'énergie. Le processus est basé sur une interaction entre la lumière et la matière ; la lumière se manifestant par une radiation électromagnétique (Somasundaram et Coats, 1990). Les pesticides sont absorbés souvent à des longueurs d'ondes différentes et la photo-dégradation peut être extrêmement significative à la surface des plantes, des débris végétaux, dans l'eau, dans l'atmosphère, où la durée de vie va également dépendre des conditions météorologiques et même à la surface du sol (Chester, 1989 & Cui, 2002).

#### **7.4.2 Dégradation biotique (biodégradation)**

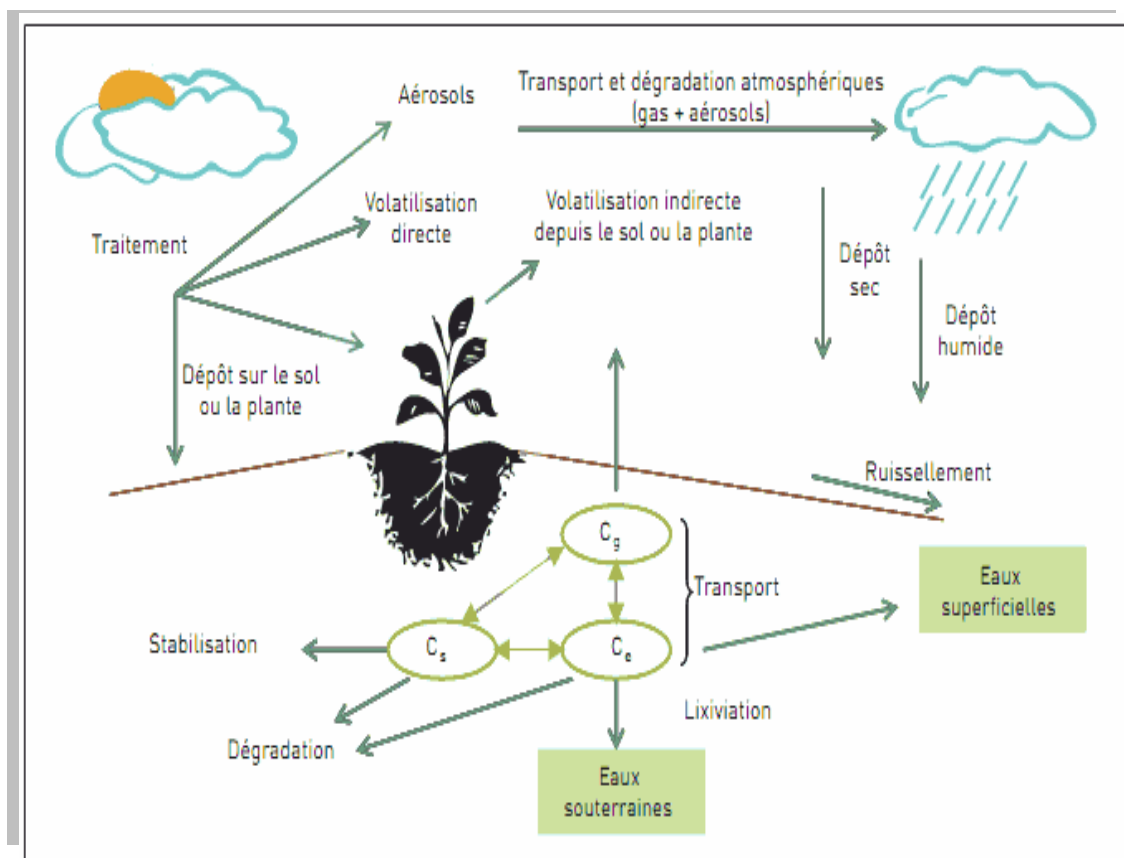
La dégradation biotique est réalisée par les micro-organismes. Dans la nature, il existe des souches qui sont résistantes aux effets des pesticides. Cette résistance se définit comme la capacité de certains individus, dans une population génétiquement hétérogène de survivre à des doses normalement létales de biocides (Gobat 2003). L'application régulière et intensive des pesticides peuvent entraîner l'apparition de souches résistantes des organismes visés : insectes, champignons phytopathogènes, rongeurs, mauvaises herbes .....etc.

On entend par résistance, la faculté qu'acquière certains individus, races ou souches, de tolérer une dose de substance toxique qui aurait provoqué un effet létale chez la majorité des organismes composant la population normale de la même espèce (Albin, 1999). La résistance aux pesticides est l'expression de la capacité des organismes à s'adapter à de nouvelles conditions. Cette résistance dépend de plusieurs facteurs :

- *Les mutations* : à l'origine de nouveaux allèles des gènes existants.
- *La sélection* : tire les gènes les mieux adaptés à l'environnement.

- *La migration* : les nouveaux gènes se disposent hors de leur zone géographique d'origine (Leveque et Mouwolo, 2001).

L'acquisition de la résistance à un pesticide est principalement liée à deux mécanismes : la modification du site d'action et la détoxification accrue (Leclech, 1998). Dans ce cas, ces micro-organismes sont capables de dégrader les pesticides. On peut définir la biodégradation comme la destruction partielle ou totale d'une substance sous l'effet du métabolisme de ces micro-organismes. Cette substance est une source de carbone fournissant l'énergie nécessaire aux réactions chimiques (Burgher, 1998).



**Figure 2.** Principaux processus impliqués dans les transferts des pesticides et leur dispersion dans l'environnement (Lichiheb *et al.*, 2015).

## **8. Dégradation dans la plante**

La biodégradation des pesticides dans la plante reste mal étudiée de nos jours. A l'intérieur de la plante les produits phytosanitaires peuvent être dégradés sous l'action d'enzymes ou de réactions simples, cependant la persistance de certaines molécules dans les plantes peut être observée. Certains auteurs, ont mis en évidence la persistance du méthyle- parathion et parathion dans des plantes (Hayes et Laws, 1990). Dans une autre étude réalisée par d'autres chercheurs, il a été observé la présence de la dichloroaniline et de certains de ces complexes avec des constituants organiques de plantes parmi les métabolites du propanil (Gerald et Mansager, 2006). La présence de la végétation favorise l'infiltration des pesticides. En plus, la perte des pesticides par infiltration pouvait atteindre jusqu'à 99 % si la zone traitée était herbacée (Wang *et al.*, 2014 & Lichiheb *et al.*, 2015).

## **9. Persistance**

Quand les pesticides ne sont pas dégradés ou partiellement dégradés, ils se stabilisent dans les sols en se liant essentiellement à la matière organique. Ces liaisons sont plus au moins fortes et évoluent dans le temps. D'autre part, la persistance d'un produit est influencée par les conditions environnementales (température, humidité, pH) et par l'activité de la biomasse microbienne et par la présence d'autres pesticides ou substances chimiques dans le sol (Albin, 1999).

## **10. Toxicité des pesticides**

Plusieurs phénomènes peuvent accroître l'impact des pesticides sur la faune et la flore.

### **10.1 Dispersion des produits**

Lors du traitement d'une culture par les pesticides, une proportion non négligeable de produit est disséminée dans l'environnement au-delà des zones traitées. La dispersion peut être aggravée par les conditions d'application : mauvaise préparation, matériel défectueux, mauvaise application, conditions météorologiques défavorables (vent, pluie, etc.).

### **10.2 Non sélectivité**

Rares sont les pesticides qui ont un effet sélectif, c'est-à-dire ciblé sur les fonctions fondamentaux du métabolisme (photosynthèse, croissance, reproduction, ...etc.) communs aux espèces visées ou non.

### **10.3 Toxicité de la matière active**

La matière active est variable d'un groupe d'espèces à un autre. Par exemple, l'insecticide diazinon est cent fois plus toxique pour les oiseaux que pour les mammifères.

### **10.4 Rémanence de la molécule et sa capacité d'accumulation dans la chaîne alimentaire**

Certains pesticides comme les organochlorés (DDT ou lindane) sont peu ou pas dégradés dans le sol et les milieux contaminés. De ce fait, ces pesticides vont s'accumuler dans les plantes, voire dans les graisses animales, et donc se concentrer tout le long de la chaîne alimentaire.

### **10.5 Forme et préparation du pesticide**

L'incorporation des pesticides dans les semences accroît les risques d'exposition à ces produits (par ingestion notamment). Les aérosols et les préparations liquides augmentent ces risques. Les pesticides, même utilisées de manière adéquate peuvent présenter des risques importants.

## **11. Impact des pesticides sur l'environnement**

Les produits phytosanitaires ou pesticides, sont utilisés à plus de 90% par l'agriculture, pour protéger les cultures et améliorer les rendements agricoles. Mais des transferts involontaires et non contrôlés des produits appliqués sur les parcelles peuvent contaminer les différents compartiments environnementaux (eau, air, sol), induisant une pollution diffuse susceptible de toucher également des organismes vivants non ciblés par les traitements (Garric, 2008). La "contamination" est définie comme la présence anormale de substances, micro-organismes... dans un compartiment de l'environnement. Pour tous les pesticides de synthèse, on peut donc parler formellement de contamination y compris pour les sols agricoles, même si la présence de pesticides y est attendue et volontaire (ce qui n'est pas le cas pour les milieux aquatiques). Le terme de "pollution" désigne la présence de substances au-delà d'un seuil pour lequel des effets négatifs sont susceptibles de se produire (Aubertot *et al*, 2005).

### **11.1. Impact sur l'écosystème**

#### **11.1.1. Sur l'eau**

La contamination des eaux de surfaces et souterraines par les pesticides est due, au lessivage de résidus de pesticides, entraînés hors des parcelles par les eaux d'infiltration et de ruissellement. Habituellement, seuls quelques pour mille à quelques pour cent de la quantité de produits appliqués sur les cultures se retrouvent dans les eaux. Cependant, l'état général de la qualité des masses d'eau s'en ressent. La présence de pesticides dans les eaux pose des problèmes d'ordre de santé publique et affecte l'équilibre des écosystèmes aquatiques (Garric, 2008). L'introduction directe est, en général, ponctuelle et peu



fréquente, elle peut résulter d'accidents mais aussi correspondre à des traitements de cultures inondées ou situées à proximité d'un cours d'eau. Le cas général reste celui de l'introduction indirecte liée au traitement d'une zone éloignée du milieu aquatique. La contamination des ressources en eaux «brutes», utilisées pour la production d'eau potable provient du lessivage des végétaux traités et des sols par la pluie qui ensuite ruisselle dans les eaux de surface (rivières, fleuves, lacs ...) et des phénomènes d'infiltration qui s'effectuent vers les eaux souterraines (Lardy-Fontan, 2009).

### **11.1.2. Sur l'air**

Lors d'un épandage aérien, près de 50% du produit n'atteint pas la cible et se disperse dans l'air environnant. A cette contamination directe, il faut ajouter les molécules provenant de l'évaporation, une fois le pesticide disposé sur la plante, le sol ou l'eau. Toutes ces molécules peuvent se retrouver dans des nuages qui poussés par les courants aériens, vont contribuer ultérieurement à la précipitation qui iront contaminer d'autres contrées (Regnault -Roger, 2005).

### **11.1.3. Sur le sol**

Le sol est formé d'éléments minéraux et organiques ainsi que des organismes vivants et sa microflore est essentielle au maintien de sa fertilité (Lafont, 1975). Cependant, la cause de la contamination des sols résulte d'une pollution diffuse due à l'usage systématique des engrais et des pesticides en agriculture. Elle concerne de très vastes surfaces dans le monde car ces substances sont utilisées sur des millions de Km<sup>2</sup> tant dans les pays industriels que dans ceux en voie de développement (Ramade, 2005).

La texture et la structure du sol, ainsi que la nature des molécules utilisées déterminent la vitesse à laquelle les pesticides disparaîtront ou sa maintiendront dans le sol traité. Les sols argileux tendent à absorber d'avantage les pesticides, alors que les sols sablonneux facilitent leur descente vers la nappe phréatique. D'autre part, alors que les constituants organiques de l'humus contribuent à dégrader certaines molécules, les organismes comme les vers de terre tendent à les accumuler, surtout dans leur partie lipophile. Plusieurs pesticides se minéralisent assez rapidement par hydrolyse et / ou photolyse (Regnault- Roger, 2005).

## **11.2. Impact des pesticides sur la biodiversité**

Plusieurs phénomènes peuvent en effet accroître l'impact des pesticides sur la faune et la flore sauvages. Parmi ceux-ci, retenons notamment :

### -□ *Dispersion des produits*

Lors du traitement d'une culture par des pesticides, une proportion non négligeable de produit est disséminée dans l'environnement, au-delà des zones traitées ;

### - *Non sélectivité*

Rares sont les pesticides qui ont un effet sélectif, c'est-à-dire ciblé sur une seule espèce ou un groupe d'espèces, car ils interviennent sur des processus fondamentaux du métabolisme (photosynthèse, croissance, reproduction, etc.) communs aux espèces visés et aux autres espèces ;

### -*Toxicité*

La toxicité de la molécule active et de ses produits de dégradation est variable d'un groupe d'espèces à un autre;

**-*Rémanence de la molécule et sa capacité d'accumulation dans la chaîne alimentaire*** : certains pesticides comme les organochlorés (DDT ou lindane par exemple) sont peu ou pas dégradés dans le sol et les milieux contaminés (eau, etc.). De ce fait, ces pesticides vont s'accumuler dans les plantes, voire dans les graisses animales, et donc se concentrer tout au long de la chaîne alimentaire (Digeronimo, 1987).

#### **11.2.1. Effets des pesticides sur la faune et la flore sauvages**

Ce sont surtout des espèces au sommet de la chaîne alimentaire (mammifères, oiseaux, etc.) qui témoignent des problèmes posés par les pesticides. Mais les insectes (notamment butineurs comme les abeilles et papillons) et les animaux à sang froid (reptiles et amphibiens) sont les plus touchés. Ainsi, des micro-organismes à la baleine bleue, toutes les espèces sont des victimes, actuellement ou à venir des millions de tonnes de pesticides déversées sur la planète (El Bakouri, 2002).

#### **11.3. Impact sur la santé humaine**

L'utilisation importante des produits phytosanitaires en agriculture a engendré la contamination de l'environnement. A la suite de leur application, ces molécules sont susceptibles de quitter leur site d'application et sont alors considérées comme des micropolluants organiques à l'origine de la pollution de tous les compartiments environnementaux. Du fait de leur écotoxicité, de leur potentiel de bioaccumulation. et de leurs actions endocriniennes, ces molécules présentent un risque pour l'environnement en général. Ainsi, de nombreuses études ont montré la contamination de l'air et des précipitations. Les ressources en eau sont aussi concernées par cette pollution.

Les pesticides sont plus ou moins toxiques à l'égard de l'homme qui peut les absorber par contact (voies cutanée et oculaire), inhalation (voie respiratoire) ou ingestion (voie digestive). Les personnes qui manipulent des pesticides doivent observer un minimum de règles de protection lors de la préparation des produits et du matériel, pendant et après les traitements. Cela explique que l'évaluation de ces risques constitue un important volet de la procédure d'homologation des produits phytosanitaires. L'organisation mondiale de la santé (OMS) a estimé qu'il y a chaque année dans le monde 1 million de grave empoisonnement par les pesticides avec quelques 220000 décès (Calvet *et al.*, 2005).

## **12. Suivi des pesticides au niveau de l'environnement**

Le suivi des pesticides au niveau de l'environnement est complexe : d'une part cela demande des techniques d'analyses spécifiques et coûteuses, d'autre part il existe une grande diversité de matières actives, nécessitant des capacités analytiques très différentes. Certaines matières actives sont très difficiles à analyser car elles ont des caractéristiques physico-chimiques qui rendent leur extraction ou leur détection difficile.

Le problème devient encore plus complexe si l'on s'intéresse à l'analyse des produits de dégradation, qui peuvent être plus toxiques que le pesticide lui-même. Les contrôles effectués ont permis de voir que la qualité des eaux superficielles est menacée régulièrement par l'utilisation de pesticides. L'agriculture y est intensive, principalement avec la culture du maïs, pour lequel l'atrazine est le plus utilisé.

Cette molécule se retrouve ensuite dans de nombreuses rivières et arrive à atteindre des concentrations élevées après des épisodes pluvieux. Certains effets de ces produits phytosanitaires sont connus dans le milieu "eau douce", car au vu de la législation et des enjeux liés à l'eau potable, des études ont été menées pour certaines matières actives. Par contre, dans les milieux "estuariens" et "marins" il existe très peu d'études sur la flore et la faune. La matière active peut être transformée par l'organisme en des composés encore plus toxiques (activation) ou moins toxiques (détoxication). Dans toutes les populations de parasites, on a observé une diminution des effets des pesticides utilisés pendant longtemps, il s'établit une résistance du ravageur. La persistance des pesticides dans l'écosystème nous accuse vis-à-vis des générations futures (Moussaoui *et al.*, 2001).

## **13. Pesticides en Algérie**

Dans notre pays, l'usage d'insecticides, des fertilisants, des engrais, des détergents et autres produits phytosanitaires se répand de plus en plus avec le développement de l'agriculture, mais aussi dans le cadre des actions de lutte contre les vecteurs nuisibles.

La loi phytosanitaire n° 87-17 du 01 Août 1987 relative à la protection phytosanitaire (J.O.1995) instaure les mécanismes qui permettent une utilisation efficace des pesticides et sans retombées néfastes. Cette loi régit les aspects relatifs à l'homologation, l'importation, la fabrication, la commercialisation, l'étiquetage, l'emballage et l'utilisation des pesticides. La fabrication des pesticides en Algérie est assurée par l'entité autonome de gestion des pesticides : MOUBYDAL. Il s'agit essentiellement de formulation de produits « Les matières actives non importées ». L'année 1996 a vu l'ouverture du marché national aux importateurs qui ont fortement concurrencé la production nationale, cette dernière concerne essentiellement les fongicides et les insecticides.

Les produits les plus utilisés par les agriculteurs dans notre pays sont : le Méthyle Parathion, le Sandofane, le Ripos, la Deltametrine et le Syperas (source : Direction Régionale Alphyte Oran). Après une étude d'un état des lieux sur l'utilisation des pesticides par les agriculteurs et auprès des revendeurs, les résultats ont montré que sur 403 pesticides homologués en Algérie, une quarantaine de produits phytosanitaires sont utilisés par les agriculteurs dont six sont très largement utilisés (Dahoun *et al.*, 2006).

**Tableau 5.** Les pesticides les plus utilisés en Algérie (Bouziani, 2009)

Noms commerciaux	Types	Matières actives
<b>Probinébe</b>	Fongicide	Probinébe
<b>Manébe</b>	Fongicide	Manébe
<b>Lannate</b>	Insecticide	Méthomyl
<b>Karaté</b>	Insecticide	Lamda cyhalathrine
<b>Decis</b>	Insecticide	Delthamitrine
<b>2,4 D</b>	Herbicide	Acide dichloro-2,4 phenoxyacetique

Selon le cadastre national des déchets dangereux, il existe 2360 tonnes de pesticides périmés repartis sur 500 sites détenus majoritairement par les anciennes entreprises nationales et usines de produits phytosanitaires (ONAPSA, FERTIAL.....).

## Chapitre IV. Matériel et méthodes

Notre étude est s'effectue au niveau de l'Institut Technique des Grandes cultures de Guelma durant 04 ans (Septembre 2009- Avril 2013). Notre travail est réalisé suivant un protocole établi par l'ITGC.

### 1. Situation géographique de l'ITGC

La station expérimentale « ITGC », Institut Technique des Grandes Cultures de Guelma se situe au centre du chef-lieu de la wilaya, atteignant un point culminant de 250m (figure 3). Les coordonnées de l'air d'étude sont comprises selon la projection UTM, fuseau 32 (feuille de Guelma NOS. 5-6, échelle 1/25 000) entre :

X= 360 930- 362 255 m

Y= 4 035 650- 4 036 415 m



**Figure 3.** Situation géographique de l'ITGC de Guelma (Google Earth, 2011)

### 2. Pesticides

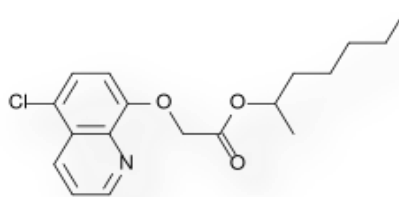
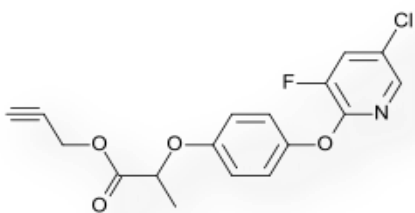
Les pesticides utilisés, nous ont été procurées par la station d'ITGC (Guelma). Ce sont des composés utilisés à grande échelle pour les cultures des céréales :

-Deux herbicides : **Topik** avec deux matières actives : clodinafop-propargyl (80g) et cloquintocet-mexyl (20g) et **Zoom** avec deux matières actives : triasulfuron (4.1%) et dicamba (65%).

-Un fongicide : **Ortiva** avec la matière active azoxystrobine.

## 2.1. Topik

Herbicide sélectif, utilisé pour la lutte contre la folle avoine, Phalaris et Ray-grass dans les cultures de blés et triticales. Il augmente la métabolisation de la substance active en accélérant son hydrolyse par la plante.



**Figure 4.** Structure chimique de Clodinafop-propargyl. **Figure 5.** Structure chimique de Cloquintocet-mexyl (Safener)

-Matière active : Clodinafop-propargyl

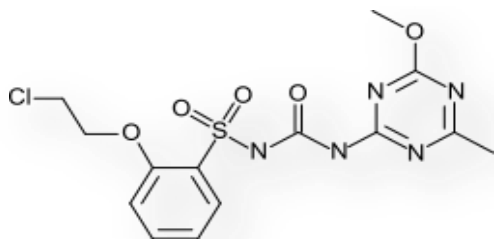
-Formule brute :  $C_{14}H_{11}ClFNO_4$ .

-Matière active : Cloquintocet-mexyl (Safener)

-Formule brute  $C_{11}H_8ClNO$

## 2.2. Zoom

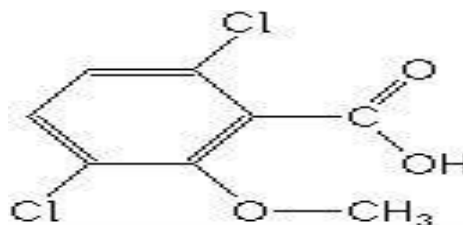
C'est un herbicide sélectif, absorbé et transporté par les feuilles et les racines. Le Zoom fait partie des herbicides hormonaux ou phytohormones. A doses infimes, il peut stimuler ou interrompre la croissance des dicotylédones.



**Figure 6.** Structure chimique de Triasulfuron.

-Matière active: Triasulfuron

-Formule brute:  $C_{14}H_{16}ClN_5O_5S$



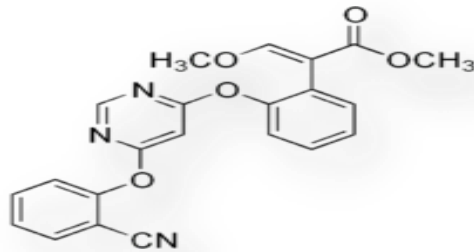
**Figure 7.** Structure chimique de Dicamba

-Matière active: Dicamba (65%).

-Formule brute :  $C_8H_6Cl_2O_3$

### 2.3. Ortiva

C'est un fongicide inhibiteur de la respiration, à large spectre à base de strobilurine utilisé principalement pour les céréales.



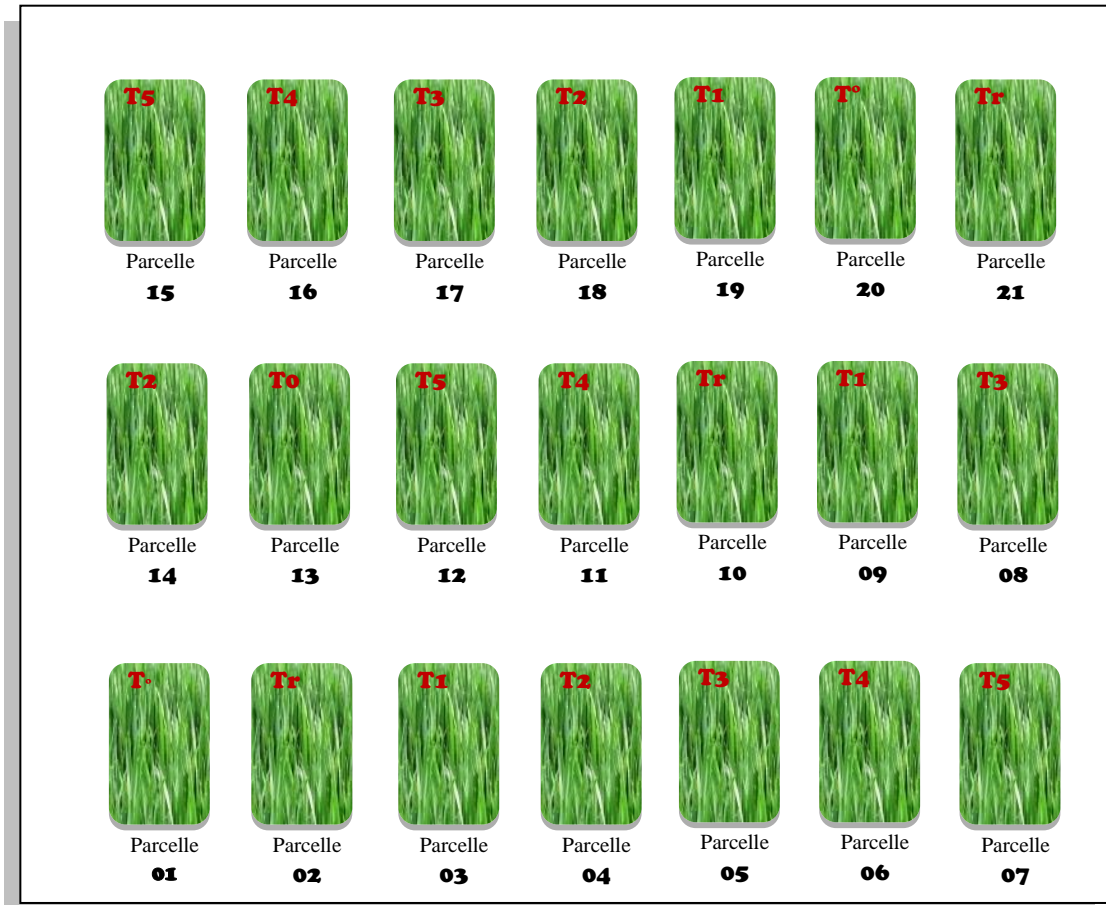
**Figure 8.** Structure chimique d'Azoxystrobine

-Matière active: Azoxystrobine.

-Formule brute : C<sub>22</sub>H<sub>17</sub>N<sub>3</sub>O<sub>5</sub>.

## 2. Conduite de l'essai

Sur une surface de 2607 m<sup>2</sup>, s'étale le champ d'expérimentation qui est divisée en sept (7) blocs y compris un témoin. Chaque bloc est constitué de trois (3) parcelles qui sont réparties aléatoirement dont la longueur de chaque'une est de 10 m, tandis que leur largeur est de 3 m. Les sept (7) blocs de l'expérimentation sont fertilisés avec différentes traitements (doses) d'engrais phosphatés, les trois sous-parcelles de chaque bloc reçoivent la même dose.



**Figure 9.** Répartition des doses de phosphate dans les sous parcelles  
(Dispositif expérimentale en bloc aléatoire complet).

### 3.1. Les traitements étudiés

Essai (espèce blé): **azote « dose fixe » et phosphore « dose variable »**

Bloc témoin : T<sub>0</sub>: 90 unités d'azote + 0 unités de phosphore (Parcelles : 1-13-20)

Bloc1 : Tr: (doses appliquée par l'agriculteur de la région) 92 unités de phosphore (Parcelles : 2-10-21)

Bloc2 : T1: 90 unités d'azote + 30 unités de phosphore (Parcelles : 3-09-19)

Bloc3 : T2: 90 unités d'azote +45 unités de phosphore (Parcelles : 4-14-18)

Bloc4 : T3: 90 unités d'azote +60 unités de phosphore (Parcelles : 5-08-17)

Bloc5 : T4: 90 unités d'azote +25 unités de phosphore (Parcelles : 6-11-16)

Bloc6 : T5: 90 unités d'azote +22 unités de phosphore (Parcelles : 7-12-15)





**Figure 10.** Labour des sols de la station (Ketif, 2013)



**Figure 11.** Irrigation d'appointe (ITGC, 2012)

#### **4. Echantillonnage**

Quatre points sont à prendre en considération :

- Le choix du site ;
- La méthode d'échantillonnage ;
- Le stade d'échantillonnage ;
- Prélèvement et transport.

## **4.1 Choix du site**

L'échantillonnage du sol et du végétal s'effectuera au centre de la parcelle sur une zone homogène en évitant les bordures.

## **4.2. Méthodes d'échantillonnage**

### **4.2.1. Méthode d'échantillonnage du végétal**

Au niveau de chaque parcelle élémentaire, prélever 10 plants dans 01 mètre pris au hasard dans les 8 rangs du milieu (figure 12).

Couper la partie aérienne de la plante à l'aide des ciseaux à environ 5 - 8 cm au dessus du sol tout en évitant la contamination par les particules de sol.

L'échantillonnage s'effectue à l'aide d'un matériel qui doit être propre lors de son utilisation, on cite :

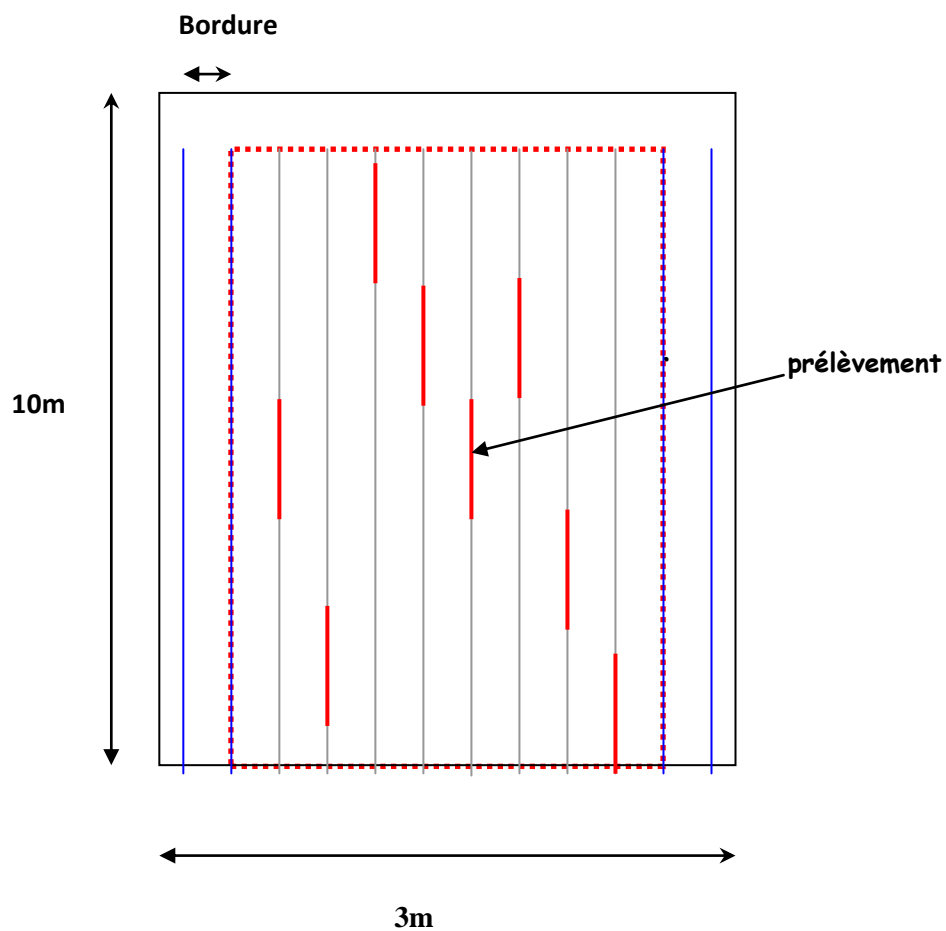
- Un sécateur ou simple paire de ciseaux ;
- Sachet en papier de dimensions 20x30cm ;
- Caisse en carton pour le transport des échantillons ;
- Etiquettes et marqueur pour l'identification de l'échantillon.

### **4.2.2. Stades de prélèvement**

Les deux stades de prélèvement les plus distinguées pour le *Triticum durum* sont : stades tallage et épiaison.

### **4.2.3. Conditions de prélèvement des échantillons et transport**

Pour le végétal, la propreté doit être de rigueur, puisque les échantillons sont destinés à l'analyse. Si les organes prélevés sont souillés, les laver à l'eau, les égoutter (panier à salade par exemple) et les faire sécher une journée dans un endroit bien ventilé. De même, si les organes prélevés sont humides ou gorgés d'eau, les faire sécher dans les mêmes conditions avant envoi. Bien référencer les sachets et envoyer rapidement aux laboratoires (figure13).



**Figure 12.** Schéma de la méthode d'échantillonnage dans la parcelle élémentaire

-	Nom de la ferme.....
-	Nom de l'essai.....
-	Type de culture.....
-	Traitement.....
-	Répétition N°.....
-	Date de prélèvement
-	période.....
-	Coordonnées de la parcelle
-	X = .....
-	Y = .....
-	Numéro de la parcelle
-	Poids frais de l'échantillon.....

**Figure 13.** Modèle de fiche de prélèvement des échantillons

#### 4.2.4. Méthode d'échantillonnage du sol

En ce qui concerne le sol, à l'aide d'une tarière et à une profondeur de 30 cm, on prélève les échantillons sols, et les conserver dans des sachets en papier de dimensions 20x30cm en utilisant des étiquettes et marqueur pour l'identification.

#### 4.2.5. Stades de prélèvement

Le sol est prélevé en quatre (4) stades :

- Stade avant semis
- Stade tallage
- Stade épiaison
- Stade après récolte



**Figure 14.** La tarière pour prélèvement du sol (Ketif, 2013)



**Figure 15.** Parcelles expérimentales au stade tallage (Ketif, 2013)



**Figure 16.** Parcelles expérimentales au stade épisaison (Ketif, 2013)

### 4.3. Périodes de traitement

Le traitement est appliqué à différentes dates qui sont les suivantes :

- Epannage du phosphore avant les semis : mois d'Octobre.
- Semis : mois de Novembre.
- Traitements par les pesticides : à l'aide d'un pulvérisateur



**Figure 17.** Les échantillons du sol (Ketif, 2013)

## 5. Méthodes d'analyses

Les analyses physicochimiques du sol ont été réalisées dans le laboratoire d'ecopedologie, le dosage des résidus des pesticides au niveau des laboratoires de Fertial et les paramètres physio biochimiques et agronomiques du végétal ont été effectuées dans le laboratoire de physiologie végétale.

### 5.2.Méthode d'analyses physico-chimiques du sol

Afin de déterminer un certain nombre de paramètres physico-chimiques du sol, les échantillons de sols ramenés au laboratoire ont subi les étapes suivantes :

-Séchage à l'air libre.

-Broyage.

-Tamisage à 2mm.

Les paramètres physicochimiques du sol sont les suivantes :

**-pH<sub>eau</sub> et pH<sub>KCl</sub>**

Le pH<sub>eau</sub> et le pH<sub>KCl</sub> du sol sont mesurés à l'aide d'un pH mètre.

**-Conductivité électrique**

La mesure de la conductivité électrique s'effectue à l'aide d'un conductivimetre.

**-Humidité hygroscopique**

Elle est mesurée à l'aide d'une étuve.

**- Calcaire total**

Le dosage du calcaire total s'effectue par la méthode tétrimétrique.

**-Calcaire actif**

Le dosage du calcaire actif est réalisé par la méthode Druineau-Galet.

**- Carbone organique**

Le carbone organique est mesuré par la méthode Anne.

$$\% \text{ matière organique} = \% \text{ carbone} \times 1,72$$



### **-Porosité**

La porosité est calculée à partir de la densité réelle et apparente.

$$(D_r - D_a/D_r) \times 100$$

### **-Granulométrie**

L'analyse granulométrique a été effectuée par la méthode internationale, à l'aide de la pipette de Robinson.

### **-Phosphore assimilable**

Le phosphore est dosé par la méthode Joret-Hebert. Pour obtenir la quantité de phosphore en mg/kg de sol, on utilise la courbe de référence suivante :

$$Y = 0.295 X + 0,026$$

## **5.2. Dosage de résidus de pesticides par la méthode d'HPLC de partage**

Le dosage de résidus de pesticides a été effectué au niveau de laboratoire de FERTIAL. Pour extraire les pesticides des sols, la procédure suivante a été adoptée. Une masse de 10g de chaque un des sols est mise en contact avec 200ml de Toluène. Le mélange est mis en agitation pendant 12h. Le surnageant est récupéré après centrifugation à 4500 t/min. Après filtration (sur des membranes de PTEF pour tous les pesticides), les pesticides sont analysés.

## **5.3. Analyses des paramètres physio biochimiques du végétal**

Nous avons retenu une espèce végétale, le blé dur : *Triticum durum* variété GTA dur ; Le blé est une céréale cultivée pour la production de semoule et la fabrication des pâtes alimentaires. Il se différencie du blé tendre par son grain à albumen vitreux et sa plus haute teneur en protéines. Plus sensible au froid que le blé tendre, sa culture est plus développée autour du bassin méditerranéen et dans les pays à climat tempéré chaud, comme l'Australie et l'Argentine notamment (Olsson, 2000).

Le blé occupe annuellement une superficie de 3500.000 ha, soit près de 46% de la surface agricole utile. La production nationale des céréales à paille des dernières années a été caractérisée par des rendements bas, oscillant entre 5 et 11 qx/ha, conduisant à une production nationale variant entre 10 et 38 millions de quintaux dont 4 à 13 millions de quintaux pour le blé dur et 1 à 5 millions de quintaux pour le blé tendre. Cette production est très instable d'une année à une autre à cause de certaines contraintes (Ketif, 2008).

– **Classification classique** du *Triticum durum* Desf

Règne : Plantae

S / R : Tracheobionta

Division : Magnoliophyta

Classe : Liliopsida

S / Cl : Commelinidae

Ordre : Poales

Famille : Poaceae

Genre : *Triticum*

Esp : *Triticum durum* Desf.

Variété : GTA dur

### **5.3.1. Analyses des paramètres physiologiques**

Pour tester la viabilité, la viguerie et la qualité des semences utilisées, il faut d'abord passer par :

#### **5.3.1.1. Test de viabilité et vigueur (Tétrazolium)**

La viabilité d'un lot de semences, de même que la germination maximale possible à attendre, sont indiquées par les résultats de l'essai de viabilité.

#### **5.3.1.2. Pourcentage de la germination**

Il arrive souvent que des graines pleines qui apparaissent saines ne germent pas, parce qu'elles n'ont pas été fécondées ou encore parce qu'elles sont trop vieilles. Le moyen le plus sûr pour apprécier la qualité d'une récolte de semences est par conséquent d'en faire effectivement germer un échantillon (Jacques, 1994). Le pourcentage de germination est déterminé après 48, 72, 96, et 120 heures de traitement. (Ben Hamouda *et al*, 2001)

#### **5.3.1.3. Poids de 1000 grains (PMG)**

C'est un critère d'un grand intérêt dans les expérimentations agronomiques. Il permet de caractériser une variété, de mettre en évidence des anomalies comme l'échaudage, d'étudier l'influence des traitements



en végétation ou des éditions climatiques qui toutes modifient la masse de 1 000 grains (Godon et Loisel, 1997).

### **5.3.2. Analyses des paramètres morphologiques**

#### **5.3.2.1. Nombre moyen de racines (NMR)**

Le nombre moyen de racines est déterminé sur des germinations de 2 à 5 jours.

#### **5.3.2.2. Longueur moyenne des racines (LMR)**

Les paramètres d'élongation racinaire sont déterminés sur des germinations de 2 à 5 jours.

### **5.3.3. Analyses de paramètres physio-biochimiques des feuilles du blé**

Les paramètres étudiés sont : la chlorophylle, les sucres solubles, les protéines totales et la proline. Ils sont quantifiés à partir des feuilles par spectrophotométrie.

On a fait deux prélèvements de feuilles vertes pendant la conduite de la culture, à partir des sept (7) blocs de l'essai.

-Premier prélèvement pendant le stade tallage.

-Deuxième prélèvement pendant le stade épiaison.



**Figure 18** .Les échantillons végétaux (Ketif, 2012).

#### **5.3.3.1. Dosage de la chlorophylle**

La méthode utilisée pour l'extraction de la chlorophylle est établie par Mackiney, (1941) et améliorée par Holden (1975).

#### **5.3.3.2. Dosage des sucres solubles**

Les taux de sucre sont dosés par la méthode de Shields et Barnett (1960).

#### **5.3.3.3. Dosage des protéines totales**

La technique utilisée pour le dosage des protéines totales est celle de Bradford (1976).

#### **5.3.3.4. Dosage de la proline**

La proline a été quantifiée par la technique de Monneveux et Nemmar (1986).

### **5.4 Etudes des paramètres agronomiques du rendement**

Les paramètres agronomiques suivants pour chaque parcelle ont été étudiés :

- Nombre de plants/m<sup>2</sup>
- Longueur d'épis (cm)
- Nombre de graines par épi
- Poids de 1000 graines (en g)
- Rendement (qx/ha)

### **5.5 Traitements statistiques des données**

Concernant les paramètres physiologiques de la graine, les résultats obtenus ont été traités par le test d'analyse de variance à deux facteurs de classification, avec (n=3). A l'aide du logiciel de statistique «MINITAB».

Le logiciel statistique, «STATISTICA» est utilisé pour les tests non paramétriques de Kruskal Wallis. On a effectué les tests suivants :

- un test de comparaison entre des médianes des différentes doses (traitements) du phosphore, dans le même stade de prélèvement.

- un test de comparaison entre les stades de prélèvement.

-Une Analyse de la composante principale (ACP) est réalisée sur les résultats des 04 ans d'expérimentation, afin d'étudier l'interaction entre les différents paramètres étudiés

## Chapitre V. Résultats et discussion

### 1. Analyses préliminaires

#### 1.1. Paramètres physiologiques et morphologiques de la graine

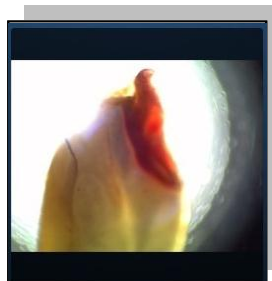
La variété GTA est la variété de blé dur la plus précoce. Elle est d'origine mexicaine (Cimmyt) et a été introduite en Algérie par l'ITGC (Institut Technique des Grandes Cultures). Elle est de paille courte (moins de 90 cm) et résistante à la verse. Elle présente de bonnes caractéristiques technologiques, et particulièrement dans la fabrication du pain et des pâtes (Hamadache, 2001). Avant l'installation de la culture, il faut vérifier la qualité de graines utilisées pour obtenir des résultats fiables. Plusieurs tests appliqués sur les grains de GTA dur ont été effectués : viabilité et vigueur, pourcentage de germination, poids de 1000 grains, longueur et nombre moyen des racines.

##### 1.1.1. Test de viabilité et vigueur (Tétrazolium)

Après l'application du test de la viabilité au chlorure du tétrazolium, il apparaît une coloration rouge vif au niveau des tissus embryonnaires qui indique que les grains de blé sont viables, vigoureux et capables de germer (figure 19 et figure 20).



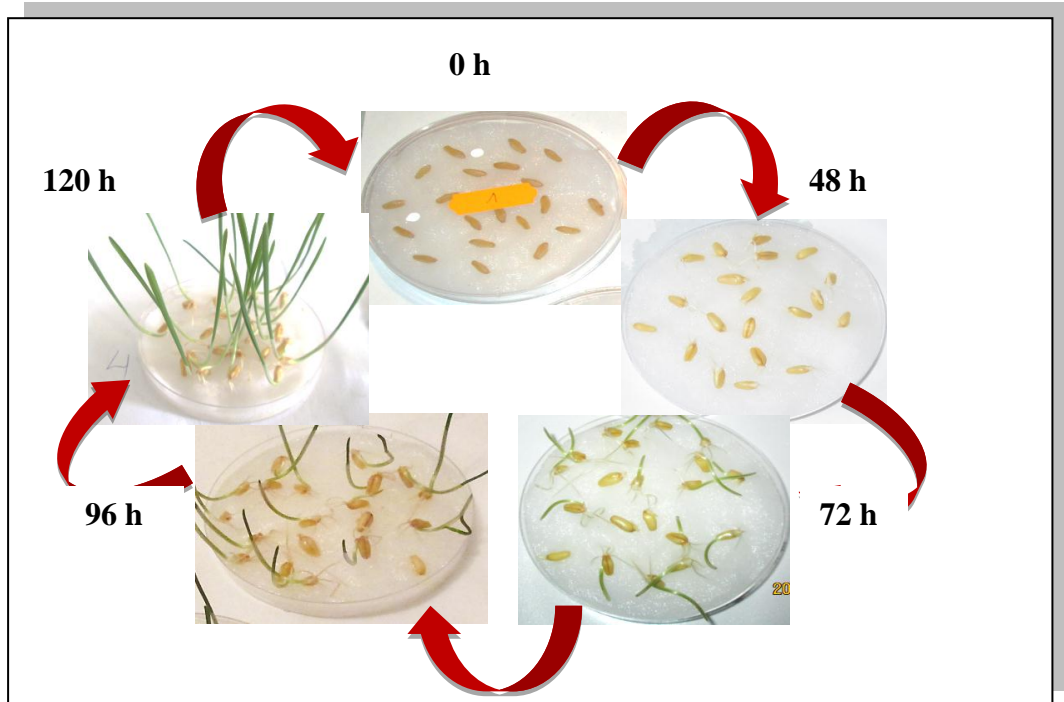
**Figure 19** .Test de viabilité au chlorure de tétrazolium



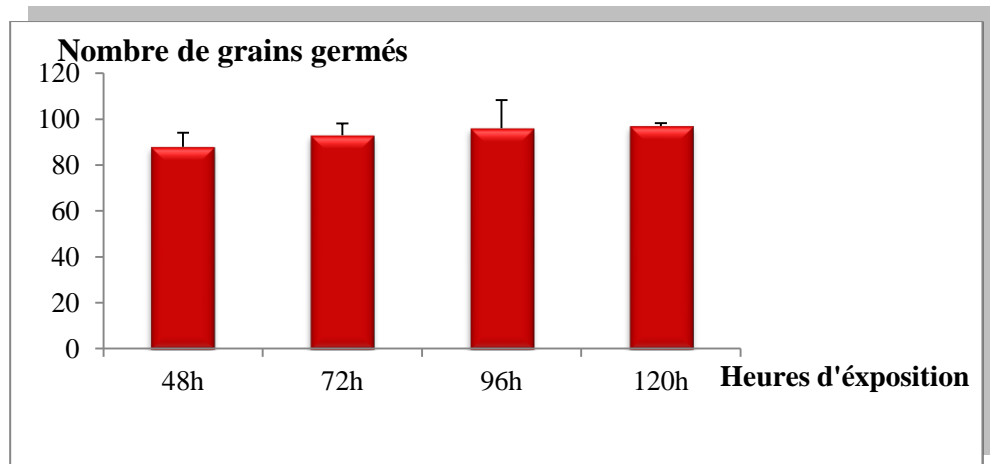
**Figure 20**. Grain traité par chlorure de tétrazolium sous microscope binoculaire (G × 40)

### 1.1.2. Pourcentage de germination

Il existe une augmentation du nombre des grains germés pendant les 4 jours de la réalisation du test de germination jusqu'à 97% sur une période de 120h (figure 21).



**Figure 21.** Amélioration de la germination des grains de blé pendant 4 jours



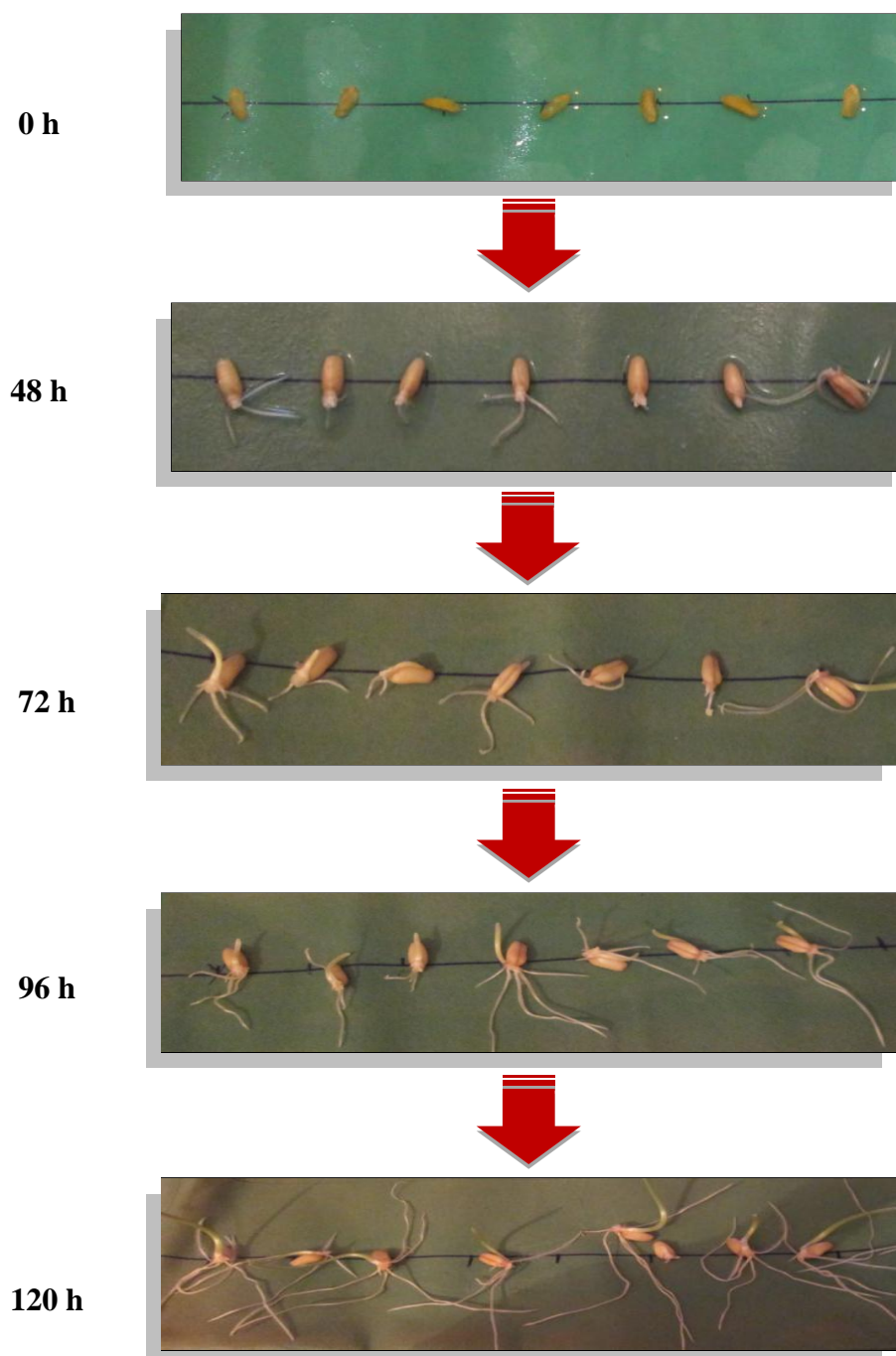
**Figure 22.** Test de germination

### 1.1.3. Poids de 1000 grains

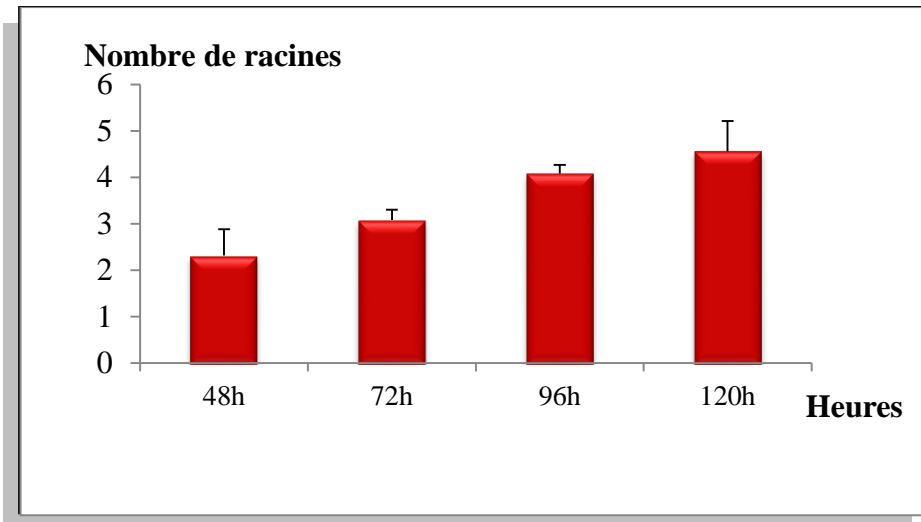
Le poids de 100 grains choisis aléatoirement de la variété GTA dur est déterminé, le poids de 1000 grains est obtenu en multipliant le résultat par 10, ce qui nous donne un poids de 1000 grains égale à 439.8 g.

### 1.1.4. Nombre moyen des racines (NMR)

La figure 23 montre la croissance des racines (nombre et longueur).



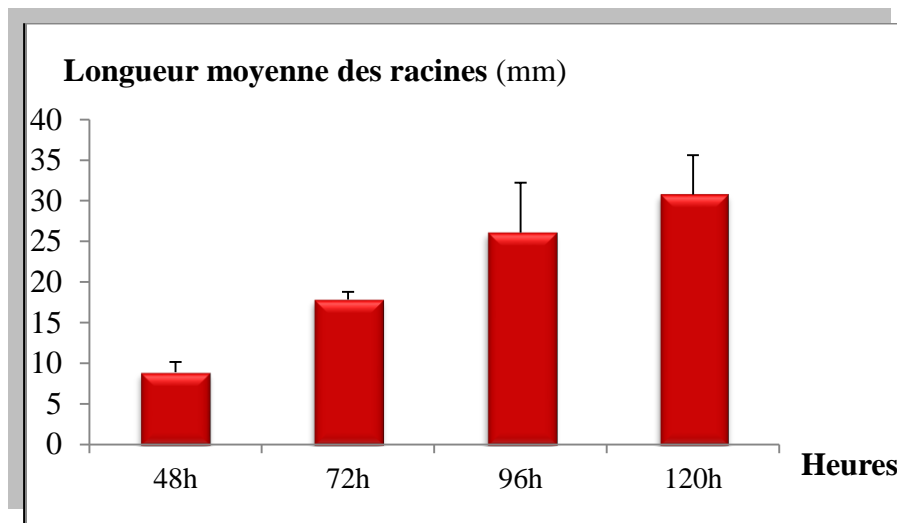
**Figure 23.** Tests du nombre et longueur moyenne des racines



**Figure 24.** Nombre moyen des racines

Il existe une augmentation du nombre moyen des racines au cours du temps avec une moyenne de 4 à 5 racines par grain pendant les 120 heures (figure 24).

#### 1.1.5. Longueur moyenne des racines (LMR)



**Figure 25.** Longueur moyenne des racines

Un développement de la croissance des racines qui arrive jusqu'à 30.760 mm sur une période de 120 heures (figure 25).

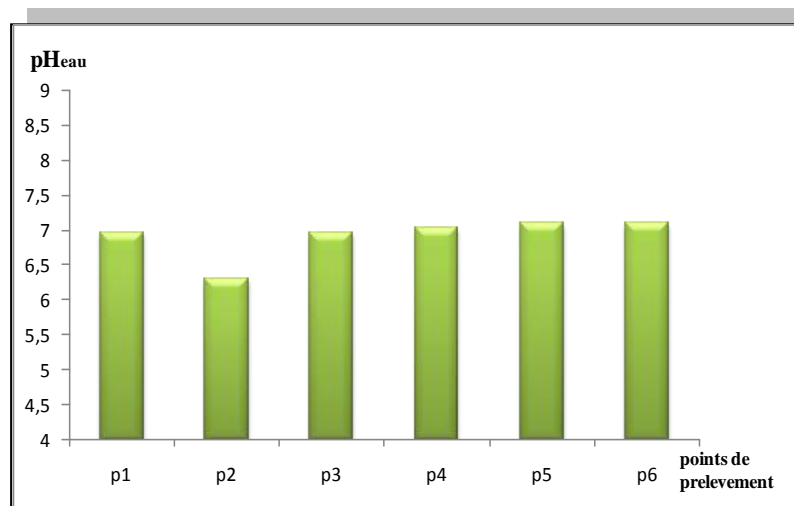
## 1.2. Avant traitement et installation de culture (septembre 2009)

Avant traitement et installation de culture du blé dur par une méthode diagonale, nous avons choisi 6 points de prélèvement des échantillons sols. Les caractéristiques suivantes ont été étudiées:

### 1.2.1. Caractéristiques physicochimiques du sol

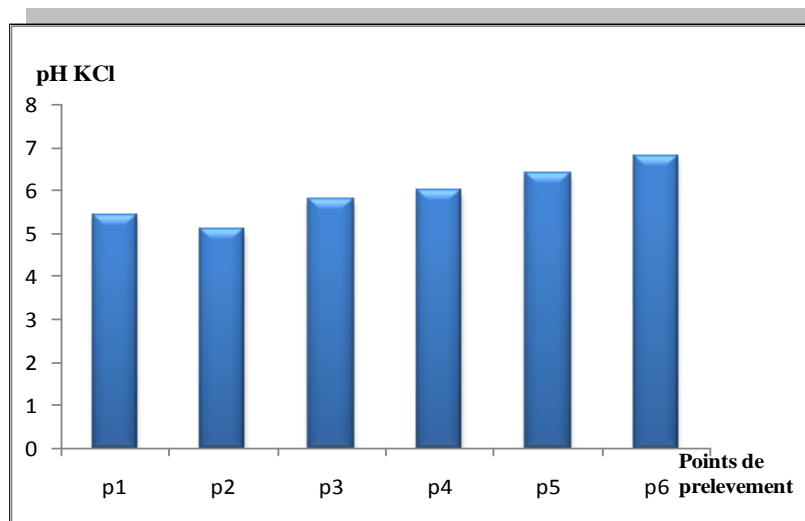
#### 1.2.1.1. $pH_{eau}$

Le pH du sol reflète les conditions physicochimiques de la solution du sol, exerce un effet direct sur la biodisponibilité des nutriments à travers des phénomènes de solubilisation propres à chaque élément. Pour les terres agricoles, les éléments minéraux sont facilement biodisponible dans une gamme de pH entre 6 et 7 (Merelle, 1989 & Vilain, 1997).



**Figure 26.**  $pH_{eau}$  du sol avant traitement

#### 1.2.1.2. $pH_{KCl}$



**Figure 27.**  $pH_{KCl}$  du sol avant traitement

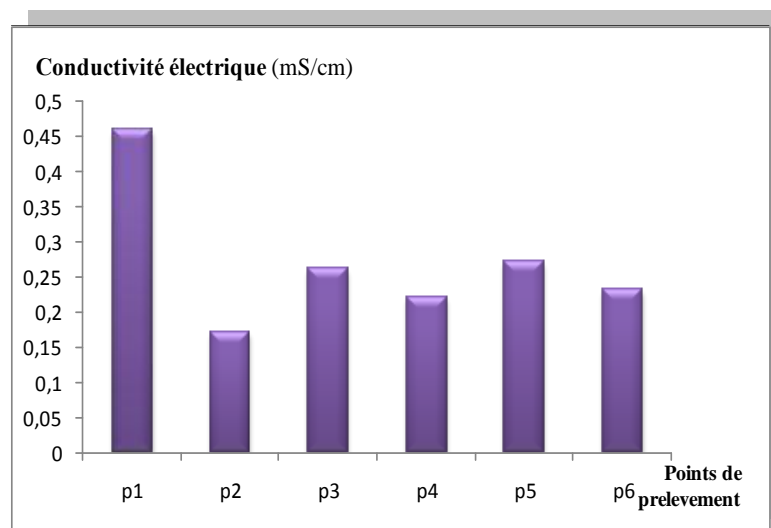


Les valeurs du  $pH_{eau}$  sont variables, la plus haute valeur à 7,1 se trouve au niveau du p6, tandis que la plus faible est enregistrée au niveau du p2, avec un pH de l'ordre de 6,28 (figure 26). Les valeurs du  $pH_{KCl}$  varient entre 5,1 et 6,8, la plus grande valeur est enregistrée par en 6 et la plus petite en p2 (figure 27).

Les nutriments du sol sont d'avantage disponible à un pH variant de 5,5 à 7 (Baise, 1988). D'après nos résultats, on peut dire que nos sols sont favorables pour une mise en culture agricole.

### 1.2.1.3. Conductivité électrique (CE)

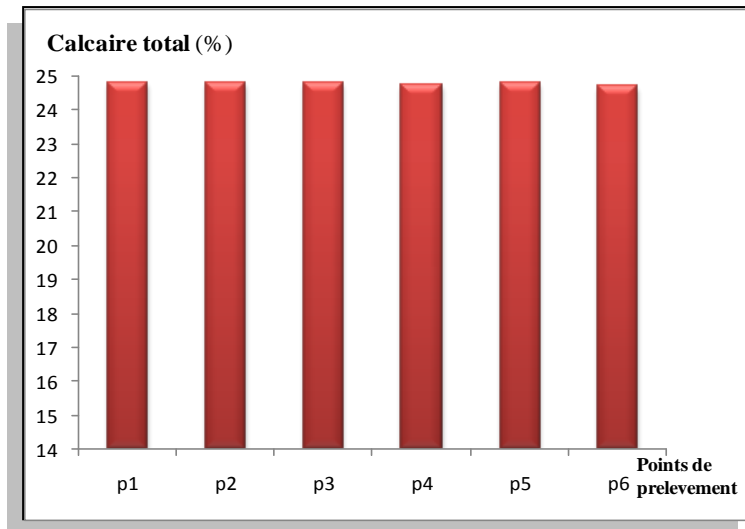
Nous enregistrons une hétérogénéité des résultats de la conductivité électrique selon les points de prélèvement. On note une valeur importante de 0,46 mS/cm en p1, par rapport à 0,17 mS/cm obtenue en p2 (figure 28).



**Figure 28.** Conductivité électrique du sol avant traitement

### 1.2.1.4. Calcaire total

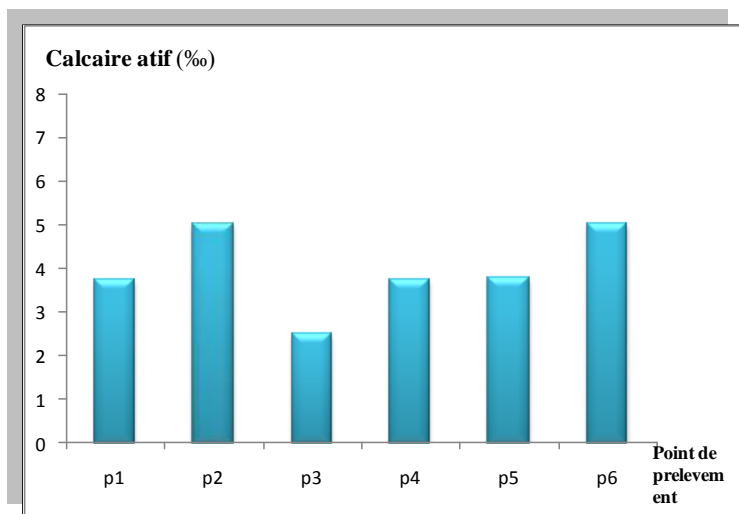
Les taux du sol en calcaire total sont presque semblables, les valeurs ne dépassent pas l'intervalle 24,7 % et 24,82 % (figure 29). Nos sols sont modérément calcaires (USSS, 1954).



**Figure 29.** Teneur du sol en calcaire total avant traitement

### 1.2.1.5. Calcaire actif

Le calcaire actif est la fraction du calcaire total susceptible de se dissoudre facilement et rapidement dans la solution du sol. On constate que les sols étudiés présentent des valeurs variables en calcaire actif, elles oscillent entre 2,5 % en p3 et 5 % en p6 (figure 30).

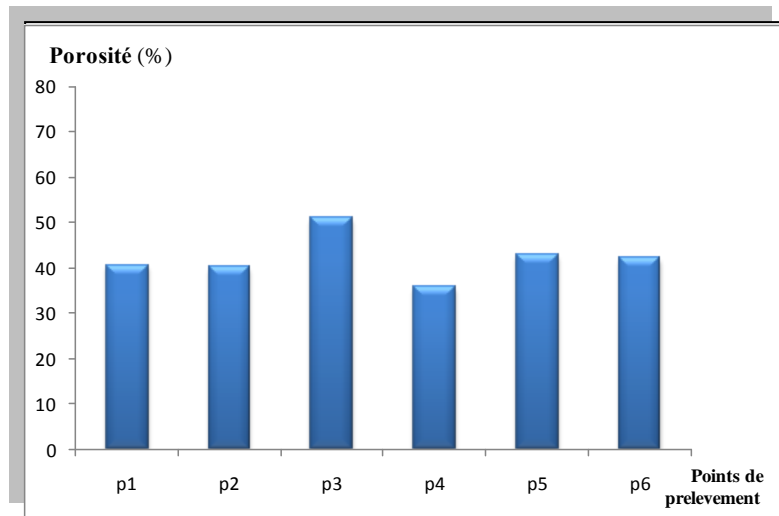


**Figure 30.** Teneur du sol en calcaire actif avant traitement

### 1.2.1.6. Porosité

La porosité constitue un paramètre édaphique important, qui combine les critères propres à la texture et à la structure du sol considéré. La porosité peut se définir comme le volume des vides du sol, elle est exprimée en % du volume total.

Les sols étudiés présentent une porosité élevée pour l'ensemble des points de prélèvement (figure 31). La teneur la plus importante est obtenue en p3 (51 %), et la plus faible en p4 (35,8%).

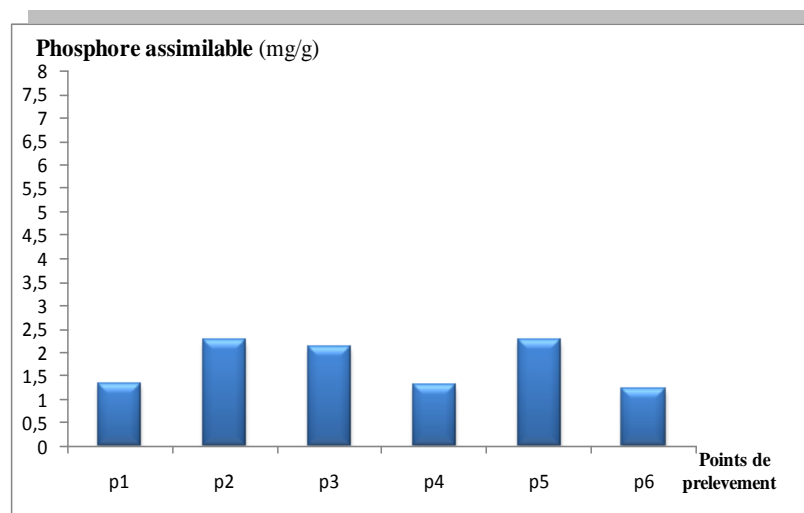


**Figure 31.** Porosité du sol avant traitement

#### 1.2.1.7. Phosphore assimilable

Le phosphore assimilable est la forme existante dans le sol que la plante peut l'assimiler, sa teneur dans les sols étudiés est variable. Mais d'une manière générale, nous constatons une présence satisfaisante de cet élément dans la majorité des sols (figure 32).

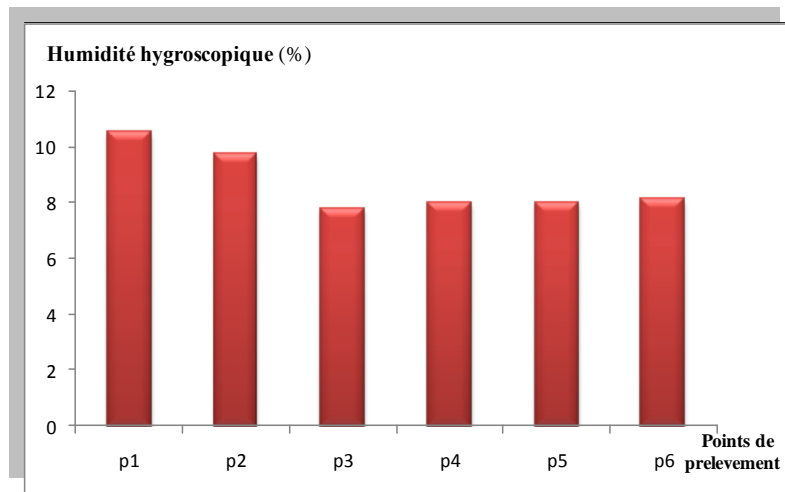
Une quantité importante est enregistrée en p6 (2,25 mg/g) et la plus faible en p1 (1,29 mg/g).



**Figure 32.** Phosphore assimilable du sol avant traitement

### 1.2.1.8. Humidité hygroscopique

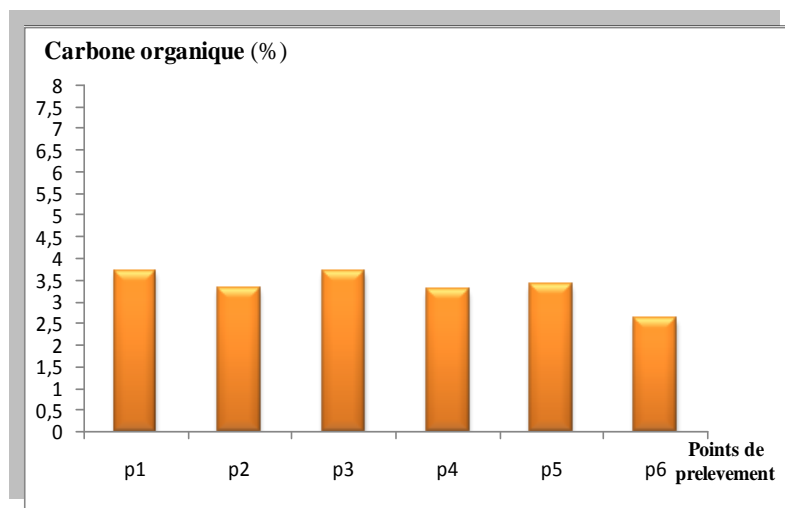
Les résultats obtenus présentent des taux d'humidité différents, le plus important est enregistré au niveau du p1 avec 10,5 % est la plus faible valeur 7,75 % en p3 (figure 33).



**Figure 33.** Humidité hygroscopique du sol avant traitement

### 1.2.1.9. Carbone organique

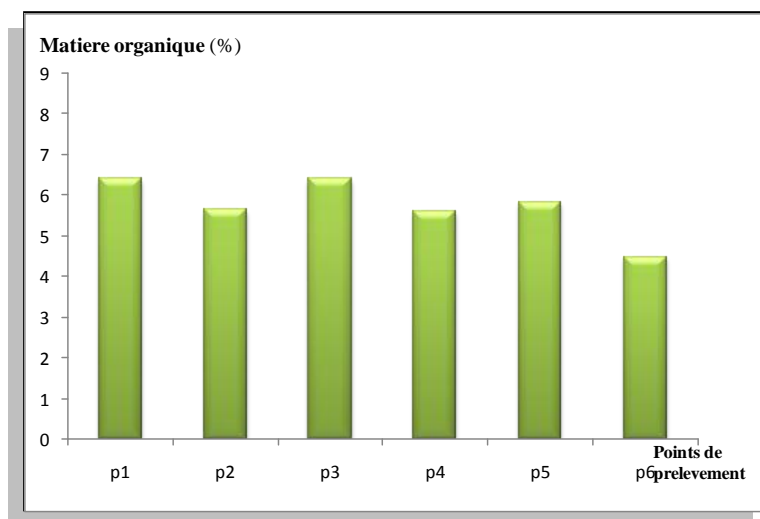
Le dosage de carbone organique indique que les sols étudiés sont riches (Soltner, 2001). La valeur la plus élevée est obtenue en p1 et p3 avec 3.72 % du carbone organique, par contre la plus faible valeur est en p6 avec 2.61 % (figure 34).



**Figure 34.** Carbone organique du sol avant traitement

### 1.2.1.10. Matière organique

Selon l'échelle de Soltner (1981), les taux de matière organique dans les points étudiés classent les sols à teneurs élevées (figure 35). La valeur la plus importante se trouve en p1 et p3 (6,39 %) et la plus faible en p6 (4,48 %).



**Figure 35.** Matière organique du sol avant traitement

### Conclusion

Les sols étudiés sont caractérisés par un pH voisin de la neutralité qui favorise l'absorption des éléments minéraux nécessaires pour la nutrition des plantes. Ce sont des sols modérément calcaires et non salins. Les cultures ne seront pas affectées par le phénomène de chlorose car le taux du calcaire actif ne dépasse pas 8 ‰. Concernant la porosité, elle est importante, ce qui favorise l'aération suffisante, la circulation de l'eau et une bonne activité biologique. Les teneurs en phosphore assimilable sont assez faibles, ce qui nous permet l'adjonction d'un fertilisant phosphaté afin d'enrichir le sol et d'améliorer les rendements.

## 2. Campagnes étudiées

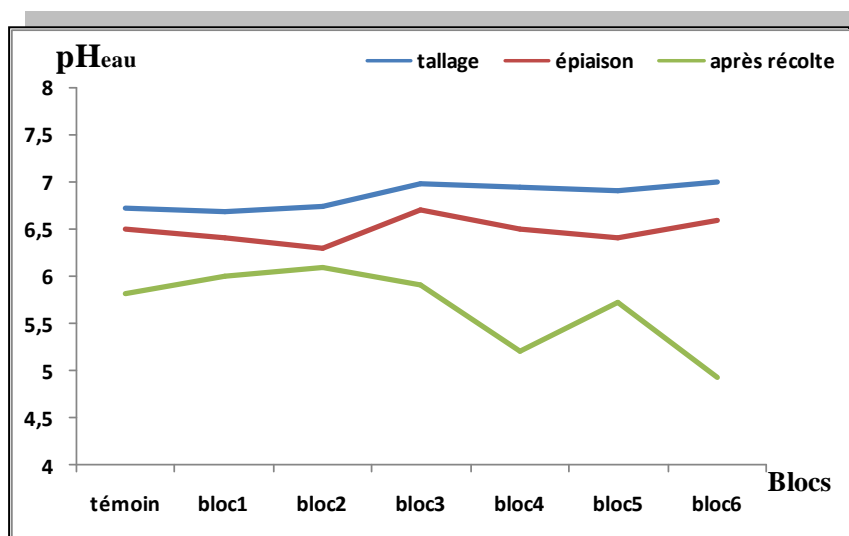
### 2.1. Campagne 2009- 2010

#### 2.1.1. Caractéristiques physicochimiques du sol

##### 2.1.1.1. $pH_{\text{eau}}$

Le premier stade de prélèvement est le tallage. C'est un stade végétatif caractérisé par trois phases :

- ❖ formation du plateau de tallage.
- ❖ émission des talles.
- ❖ sortie des nouvelles racines.



**Figure 36.** Variation du  $pH_{\text{eau}}$  durant les stades de prélèvements

Au tallage, les valeurs des  $pH_{\text{eau}}$  varient entre 6,69 et 6,98. Un léger abaissement est remarquable à l'épiaison par rapport au précédent. On remarque que la plus haute valeur est enregistrée au niveau du bloc 3 avec 6,7 et la plus faible au niveau des blocs 1 et 5 (6,4). Le stade après récolte est généralement caractérisé par des  $pH_{\text{eau}}$  plus acides que les deux précédents (figure 36).

Le test des médianes de Kruskal- Wallis montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements des trois prélèvements. Mais ce test met en évidence la différence très hautement significative qui existe entre les trois prélèvements (tableau 6).

**Tableau 6.** Test des médianes de Kruskal-Wallis ( $pH_{\text{eau}}$ )

	H	P
$pH_{\text{eau 1}}$	11.75986	0.0675
$pH_{\text{eau 2}}$	5.904512	0.4340
$pH_{\text{eau 3}}$	5.39.625	0.4948
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
$pH_{\text{eau 1}}$	34.700295	0.0000
$pH_{\text{eau 2}}$		
$pH_{\text{eau 3}}$		

**P** : seuil de la différence significative

**H** :  $H_{\text{obs}}$ . Referentiel du test Kruskal-Wallis

$pH_{\text{eau 1}}$  :  $pH_{\text{eau}}$  tallage

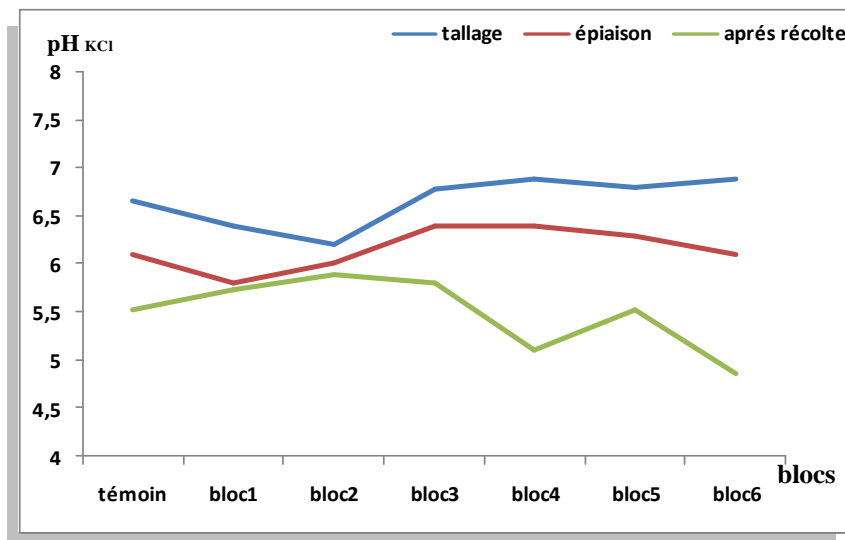
$pH_{\text{eau 2}}$  :  $pH_{\text{eau}}$  épiaison

$pH_{\text{eau 3}}$  :  $pH_{\text{eau}}$  après récolte

### 2.1.1.2. $pH_{\text{KCl}}$

Les résultats sont hétérogènes selon les blocs et selon les prélèvements. Les valeurs du  $pH_{\text{KCl}}$  varient entre 6.4 et 4.87 (figure 37).

L'étude statistique indique qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements utilisés. Alors qu'entre les trois stades de prélèvements le test des médianes montre une différence significative (tableau 7).



**Figure 37.** Variation du  $pH_{\text{KCl}}$  durant les stades de prélèvements

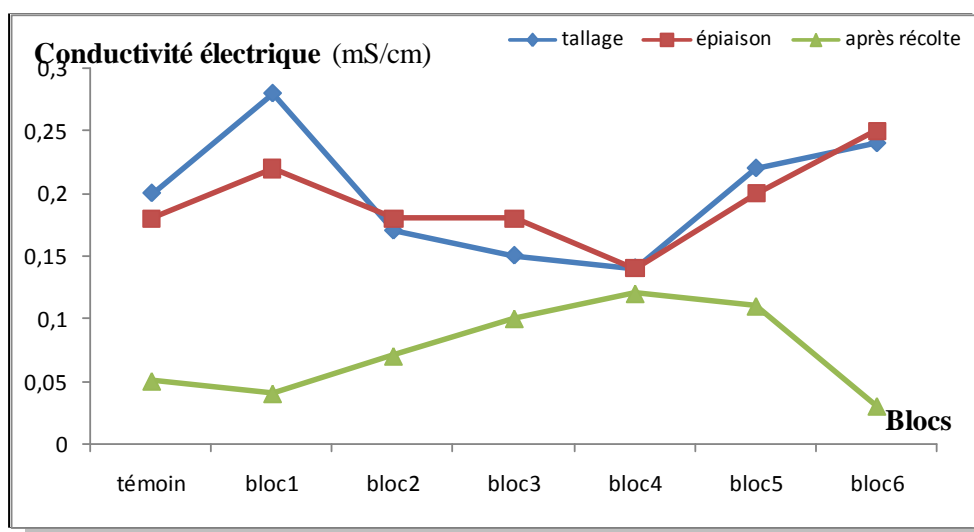
**Tableau 7.** Test des médianes de Kruskal-Wallis ( $pH_{KCl}$ )

	H	P
$pH_{KCl}$ 1	4.659686	0.5881
$pH_{KCl}$ 2	3.357440	0.7628
$pH_{KCl}$ 3	4.799131	0.5698
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
$pH_{KCl}$ 1		
$pH_{KCl}$ 2	36.36586	0.0000
$pH_{KCl}$ 3		

$pH_{KCl}$  1 :  $pH_{KCl}$  au tallage  
 $pH_{KCl}$  2 :  $pH_{KCl}$  à l'épiaison  
 $pH_{KCl}$  3 :  $pH_{KCl}$  après récolte

### 2.1.1.3. Conductivité électrique

Les valeurs de la conductivité électrique dans les blocs étudiés pendant le tallage montrent que la valeur la plus élevée est présente dans le bloc1 avec 0,28 mS/cm et la plus faible 0,14 mS/cm dans le bloc 4. Le test de médiane confirme ce résultat. A l'épiaison, les valeurs de la conductivité électrique varient entre 0,14 et 0,25 mS/cm. L'analyse statistique indique qu'il existe une différence significative entre les blocs 4 et 6. Une diminution de la conductivité électrique jusqu'à 0.03 mS/cm au niveau du bloc 6 est remarquable après récolte (figure 38). Cette diminution est due au phénomène de ruissellement et dissolution des électrolytes dans la solution du sol. Selon l'échelle de salinité, les sols ne sont pas salins (USSS, 1954). Le test de Kruskal-Wallis appliqué sur les trois prélèvements, met en évidence qu'il existe une différence hautement significative entre eux (tableau 8).



**Figure 38.** Effet du traitement sur la conductivité électrique



**Tableau 8.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Conductivité Electrique)

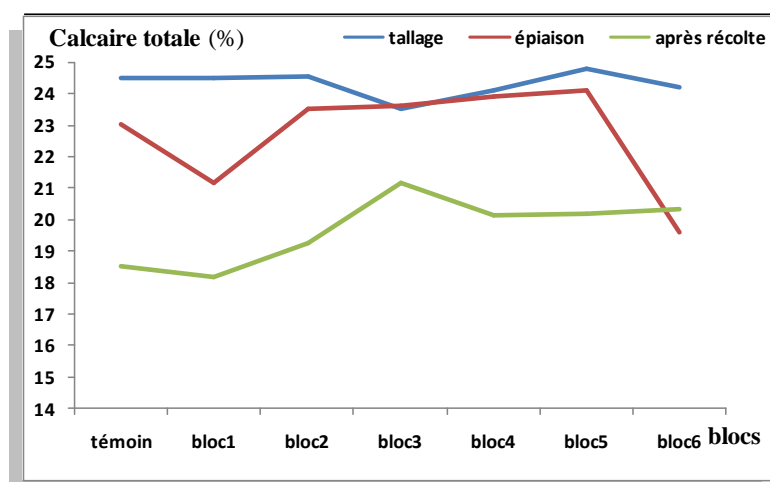
	H	P
CE1	18.52434	0.0050
CE2	13.21085	0.0398
CE3	9.458988	0.1494
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
CE 1	38.01630	0.000
CE 2		
CE 3		

CE1 : Conductivité électrique au tallage  
CE2 : Conductivité électrique à l'épiaison  
CE3 : Conductivité électrique après récolte

#### 2.1.1.4. Calcaire total

Au stade tallage du cycle de développement de la culture d'essai, on observe qu'il y a pas une variabilité des résultats qui oscillent entre 23.51% et 24.8%. L'observation de la courbe à l'épiaison indique une valeur maximale au bloc 5 (24.1 %) et une minimale au bloc 6 (19,6 %). Par ailleurs, les taux de calcaire total après récolte marquent un abaissement par rapport aux deux stades précédents (figure 39). La présence du calcaire dans les terres agricoles provoque une augmentation des taux de la matière organique (Le Tacon, 1978). L'abaissement des teneurs en calcaire total est dû à sa solubilisation dans la solution du sol.

Le test de Kruskal-Wallis montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements des blocs. Cependant le test statistique donne une différence hautement significative entre les trois stades de traitement (tableau 39).



**Figure 39.** Effet du traitement sur la teneur en calcaire total

**Tableau 9.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Calcaire Total)

	H	P
CT 1	3.9896604	0.6781
CT 2	13.05574	0.422
CT 3	3.658431	0.7228
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
CT 1	36.13986	0.000
CT 2		
CT 3		

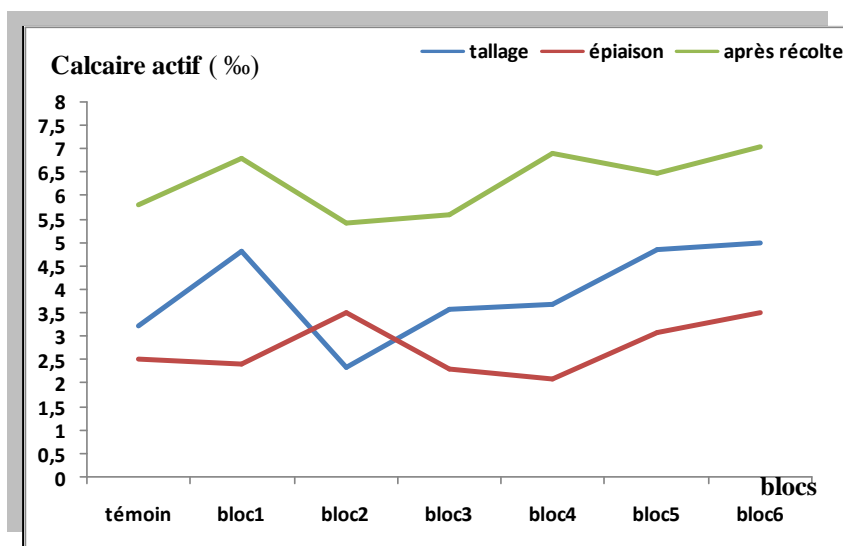
CT 1 : Calcaire total au tallage

CT 2 : Calcaire total à l'épiaison

CT 3 : Calcaire total après récolte

#### 2.1.1.5. Calcaire actif

Les valeurs oscillent entre 2.35 % dans le bloc 2 et de 5% dans le bloc 6 (figure 40). Les teneurs en calcaire actif pendant l'épiaison ne présentent pas de grandes différences. La valeur maximale se trouve au niveau du bloc 6 avec 3.5 %, la minimale 2,1 % dans le bloc 4, alors que la moyenne est 2.7 %. Une augmentation des valeurs du calcaire actif est remarquable après récolte. On note la plus haute teneur 7.04 % dans le bloc 6. L'augmentation des teneurs en calcaire actif est en relation avec la dissolution du calcaire total et l'assèchement des sols sous l'influence de la variation des températures. L'étude statistique montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements utilisés, mais elle existe entre les trois stades de prélèvements.



**Figure 40.** Effet du traitement sur la teneur en calcaire actif

**Tableau 10.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Calcaire Actif)

	H	P
CA 1	17.52331	0.0075
CA 2	5.686402	0.4592
CA 3	45.87348	0.04592
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
CA 1		
CA 2	45.87348	0.000
CA 3		

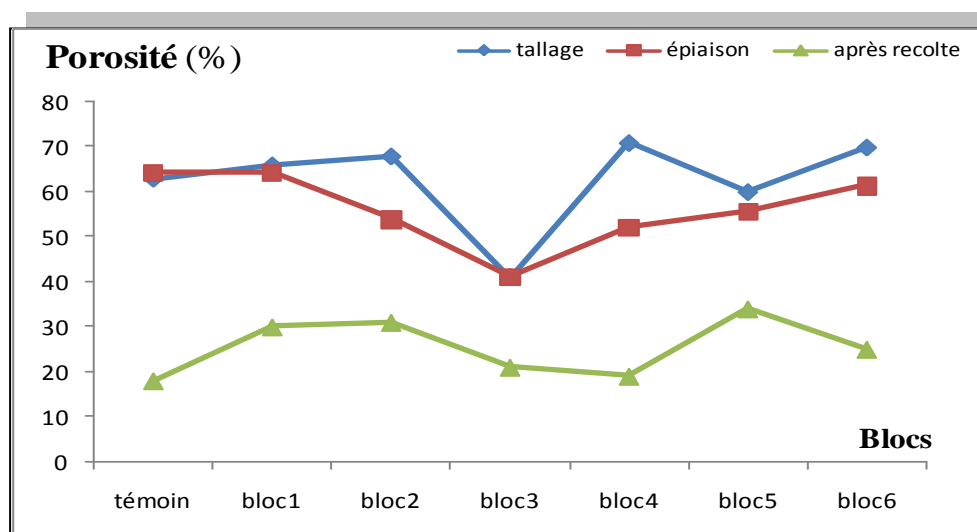
CA 1 : Calcaire actif au tallage

CA 2 : Calcaire actif à l'épiaison

CA 3 : Calcaire actif après récolte

### 2.1.1.6. Porosité

La porosité est une caractéristique majeure contrôlant les propriétés hydrodynamiques du sol. Pour les deux stades (tallage et épiaison), les taux de porosité sont élevés dans l'ensemble. La teneur la plus importante est obtenue dans le bloc 4 avec 71 %. Cet important résultat indique un sol favorable avec une aération optimale qui favorise un bon développement des racines des plantes. Après récolte, le taux de porosité au niveau du bloc 4 diminue jusqu'à 19 % (figure 41). La diminution est due au phénomène de rétention de l'eau (Lahlou *et al.*, 2004). Le test des médianes met en évidence qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements des deux stades (tallage et après récolte), alors qu'elle existe à l'épiaison entre les blocs 3 et 1. Entre les prélèvements, le test de Kruskal-Wallis indique un  $P = 0.0000$  (tableau 11).



**Figure 41.** Effet du traitement sur la porosité

**Tableau 11.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Porosité)

	H	P
<b>PO 1</b>	13.12814	0.410
<b>PO 2</b>	17.66948	0.0071
<b>PO 3</b>	5.546145	0.4759
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
<b>PO 1</b>	44.23217	0.0000
<b>PO 2</b>		
<b>PO 3</b>		

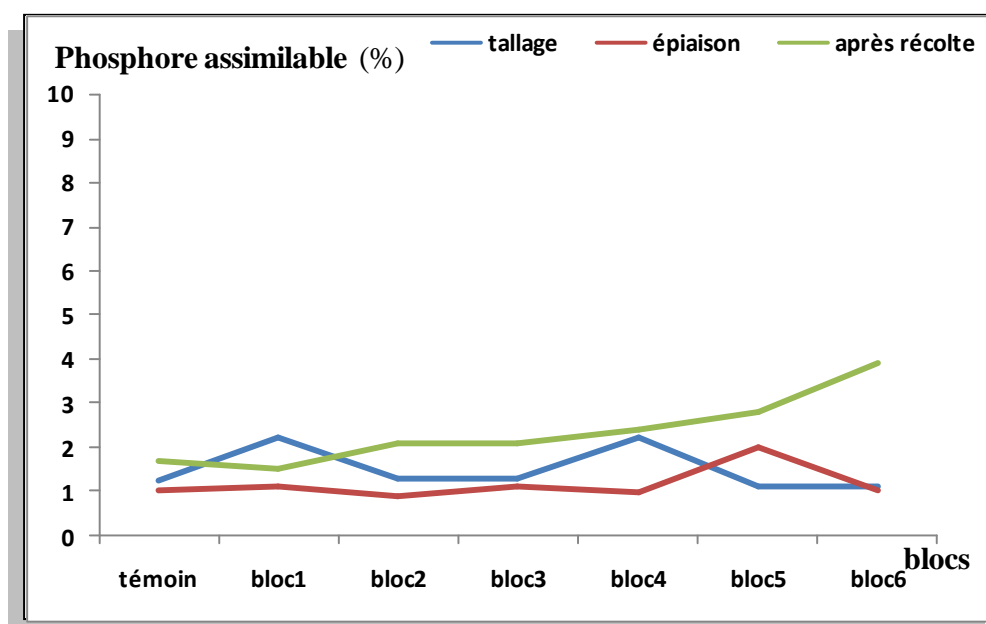
**PO 1** : Porosité au tallage

**PO 2** : Porosité à l'épiaison

**PO 3** : Porosité après récolte

### 2.1.1.7. Phosphore assimilable

Les engrais phosphatés qui sont incorporés au sol, même s'ils sont solubles, s'immobilisent en général rapidement. Le problème de la nutrition en phosphore est bien souvent lié à celui de la mobilisation des réserves qui s'avère parfois difficile en milieu acide qu'en milieu neutre ou basique. L'optimum se situe entre un pH 5,5 à 6. Les valeurs du phosphore assimilable sont proches (figure 42). Le test statistique des médianes confirme ces résultats, donc il n'y a pas de différence significative entre les traitements. Par ailleurs, ce test montre une différence hautement significative entre les stades (tableau 12).



**Figure 42.** Effet du traitement sur la teneur en phosphore assimilable

**Tableau 12.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Phosphore Assimilable)

	H	P
<b>Phos1</b>	19.18184	0.0039
<b>Phos 2</b>	3.405749	0.7565
<b>Phos 3</b>	4.062500	0.6682
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
<b>Phos 1</b> <b>Phos 2</b> <b>Phos 3</b>	27.42573	0.000

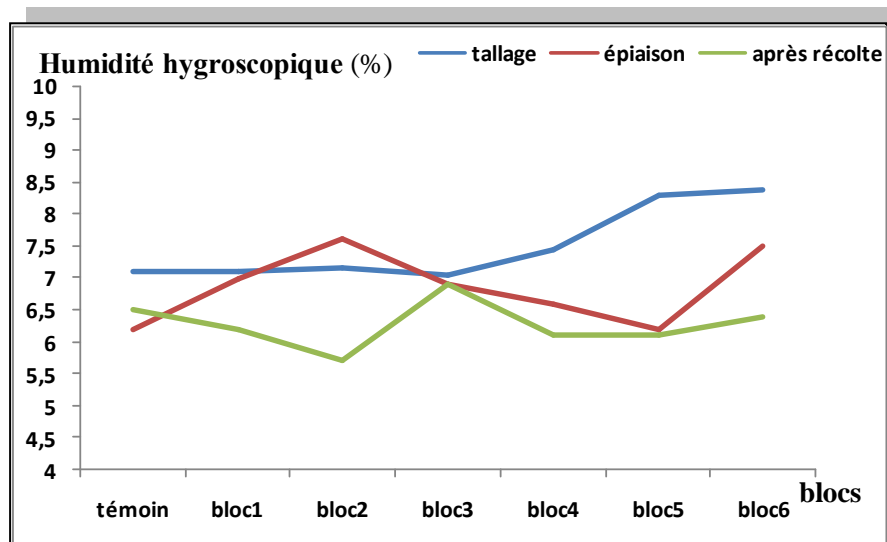
**Phos1** : Phosphore assimilable au tallage

**Phos2** : Phosphore assimilable à l'épiaison

**Phos 3** : Phosphore assimilable après récolte

### 2.1.1.8. Humidité hygroscopique

Les valeurs d'humidité hygroscopique au tallage varient entre 7.05 % et 8.39 %. Le bloc 6 est caractérisé par la plus haute valeur. A l'épiaison, on enregistre une moyenne de 6,85 %, avec 6.2 % au bloc 5 et 7,6 % au bloc 2. Après la récolte, les taux d'humidité diminuent par rapport aux stades tallage et épiaison (figure 43). La propriété d'adsorber et de retenir l'humidité appartient surtout aux terres cultivées, argileuses, poreuses et bien préparées (sols bien travaillés). L'analyse statistique indique qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements de chaque stade. En revanche, le test de Kruskal-Wallis entre les prélèvements montre une différence hautement significative entre tallage et épiaison (tableau 13).



**Figure 43.** Effet du traitement sur l'humidité hygroscopique

**Tableau 13.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Humidité Hygroscopique)

	<b>H</b>	<b>P</b>
<b>HG1</b>	14.23119	0.272
<b>HG 2</b>	13.73115	0.0328
<b>HG 3</b>	13.022012	0.0669
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
<b>HG 1</b>	15.17475	0.0005
<b>HG 2</b>		
<b>HG 3</b>		

**HG 1** : Humidité hygroscopique au tallage

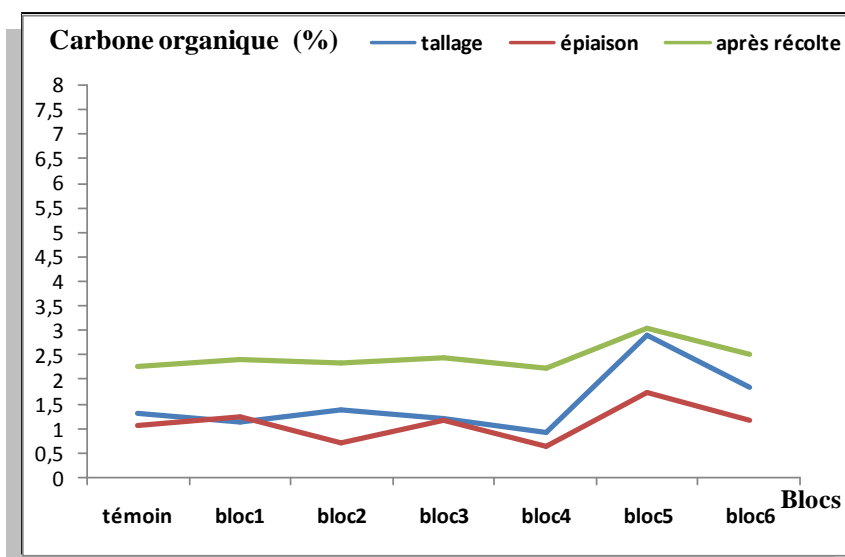
**HG2** : Humidité hygroscopique à l'épiaison

**HG 3** : Humidité hygroscopique après récolte

#### **2.1.1.9. Carbone organique**

Le carbone organique est l'un des éléments autour desquels les enjeux agronomiques sont majeurs. A la lumière des résultats présentés, on constate qu'il y a une hétérogénéité entre les taux de carbone des blocs étudiés. Au tallage, la valeur la plus élevée est obtenue dans le bloc 5 (2,88 %) et la plus faible 0.93 % dans le bloc 4 (figure 44). L'analyse statistique confirme cette différence par un  $p = 0.0088$ . A l'épiaison, la valeur moyenne est de 1,09 %. Le test de Kruskal-Wallis montre une différence significative entre les blocs 4 et 5. D'après le résultat du test des médianes, il n'y a pas de différence significative entre les traitements après récolte ; par contre il existe une différence très hautement significative entre les trois stades (tableau 14).

Un climat sub humide comme celui de la région de Guelma est favorable à une décomposition rapide de la matière organique. Il faut aussi tenir compte de l'intensification et de la diversité des pratiques agricoles (profondeur du labour, apports ou non de matières organiques, restitution des résidus de récoltes, etc.), qui sont également intimement liées aux spécificités du cadre physique de cette région agricole.



**Figure 44.** Effet du traitement sur la teneur en carbone organique

**Tableau 14.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Carbone Organique)

	H	P
<b>C1</b>	17.13234	0.0088
<b>C 2</b>	14.78242	0.0220
<b>C 3</b>	2.824195	0.8306
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
<b>C 1</b>		
<b>C 2</b>		
<b>C 3</b>	34.56503	0.0000

**C1** : Carbone organique au tallage

**C2**: Carbone organique à l'épiaison

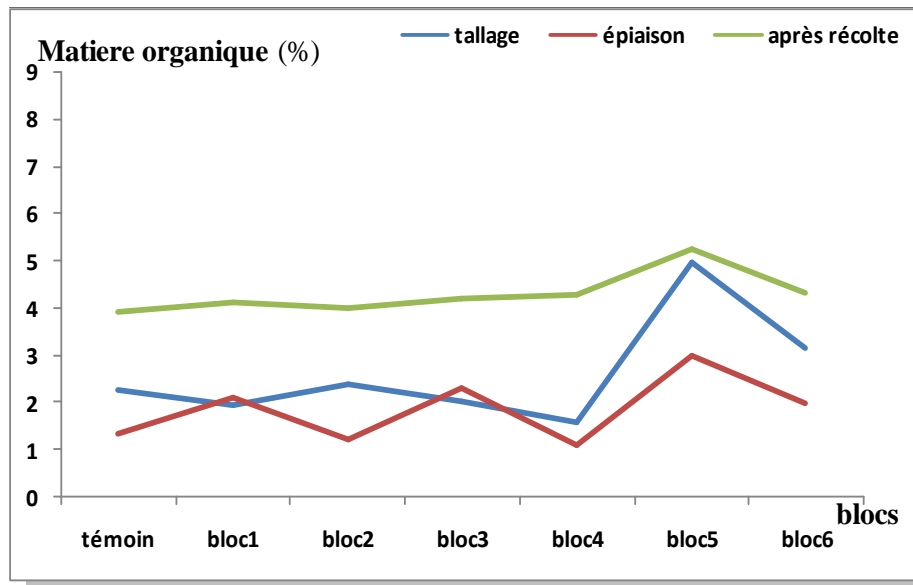
**C3**: Carbone organique après récolte

#### 2.1.1.10. Matière organique

La matière organique joue un rôle essentiel, tant physique (structure du sol) que chimique (nutrition minérale des plantes) et biologique (activité biologique du sol) (Balesdent, 1996). Elle constitue un paramètre incontournable à prendre en compte dans l'évaluation de la qualité des sols. Les matières organiques du sol peuvent être considérées comme un capital à entretenir et améliorer, dans le cadre d'une gestion durable des agro-systèmes (Roussel *et al.*, 2001). D'après les résultats, les sols sont fertiles et capables de donner plus de rendement en culture de blé dur.

Au tallage, le taux de la matière organique varie entre 1.59 % et 4.95 %. La plus haute valeur est remarquée au niveau du bloc 5 et la plus faible au bloc 4 ; le bloc témoin montre une teneur assez

importante par rapport à ce dernier. Une diminution est enregistrée durant le stade épiaison. Le test statistique indique une différence significative entre les traitements. L'observation informe une légère augmentation des teneurs en matière organique par rapport au tallage et épiaison (figure 45). Le test de Kruskal-Wallis montre qu'il existe une différence significative entre les traitements du tallage et le contraire après récolte. Concernant la comparaison des médianes des trois stades de prélèvements, l'étude statistique indique une différence hautement significative entre eux (tableau 15).



**Figure 45.** Effet du traitement sur la teneur en matière organique

**Tableau 15.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Matière Organique)

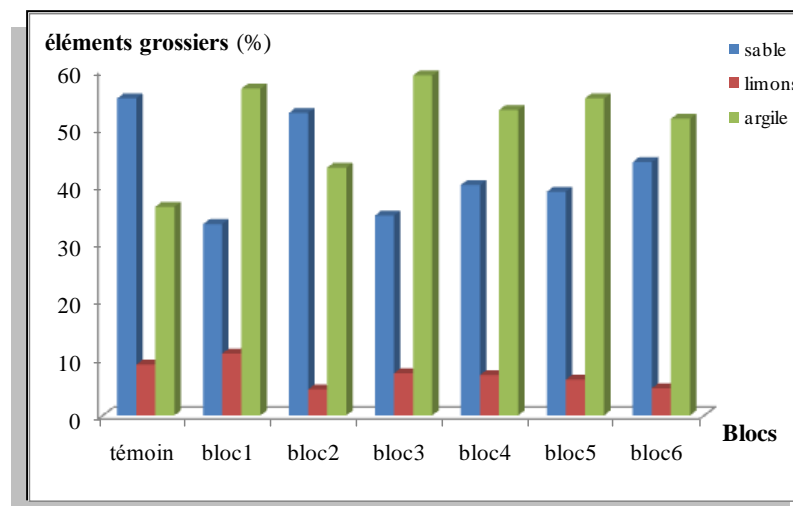
	H	P
MO1	17.13234	0.0088
MO 2	17.46467	0.007
MO 3	2.963929	0.8134
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
MO 1	34.49251	0.000
MO 2		
MO 3		

MO 1 : Matière organique au tallage  
MO 2 : Matière organique à l'épiaison  
MO 3 : Matière organique après récolte



### 2.1.1.11. Granulométrie

L'analyse granulométrique permet de connaître la répartition des particules minérales inférieures à 2 mm selon des classes de grosseur. Il s'agit de déterminer la répartition statistique des particules d'un échantillon dans ces différentes classes granulométrique (Baize, 2000).



**Figure 46.** Teneur du sol en éléments grossiers

L'argile représente les teneurs les plus importantes, par rapport aux limons et sables ; ce qui nous donne une texture argileuse à argilo-sableuse sur les blocs étudiés (figure 46). L'analyse statistique ne donne aucune différence significative entre les différents prélèvements. Tandis qu'il existe des différences significatives entre le traitement 1 et le témoin pour tous les prélèvements pour les sables. De plus, il existe des différences significatives entre les traitements 1 et 6 pour les trois stades, pour les limons (tableau 16, tableau 17 et tableau 18).

**Tableau 16.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Sables)

	H	P
S 1	12.46753	0.0523
S 2	12.46753	0.0523
S 3	12.46753	0.0523
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
S 1	17.54819	1.000
S 2		
S 3		

**S 1 :** Sables au tallage  
**S 2 :** Sables à l'épiaison  
**S 3 :** Sables après récolte

**Tableau 17.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Limons)

	H	P
L1	17.54819	0.007
L2	17.54819	0.007
L3	17.54819	0.007
Comparaison entre les prélèvements		
L1		
L 2	0.000000	1.000
L 3		

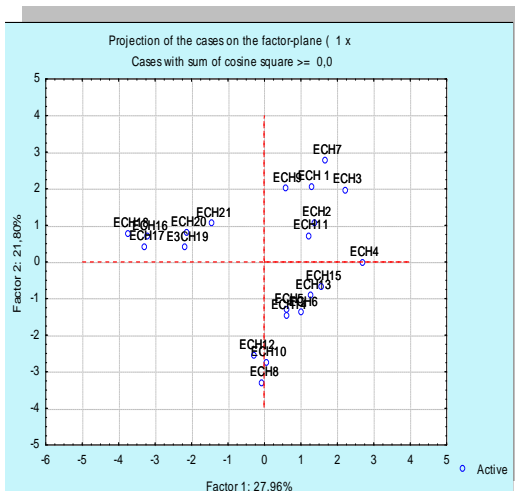
L 1 : Limons au tallage  
 L 2 : Limons à l'épaison  
 L 3 : Limons après récolte

**Tableau 18.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Argiles)

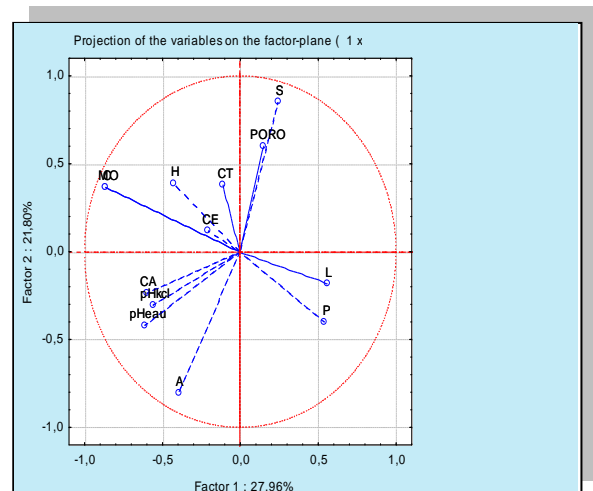
	H	P
A 1	10.75325	0.0963
A 2	10.75325	0.0963
A 3	10.75325	0.0963
Comparaison entre les prélèvements		
A 1		
A 2		
A 3	0.000000	1.000

A 1 : Argiles au tallage  
 A 2 : Argiles à l'épaison  
 A 3 : Argiles après récolte

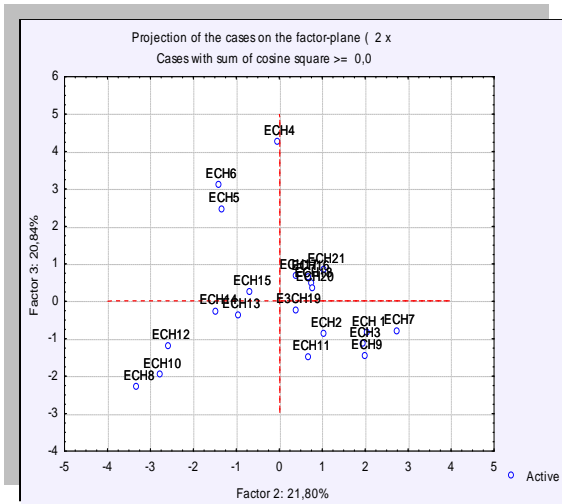
**a) - Analyse en composantes principales (tallage)**



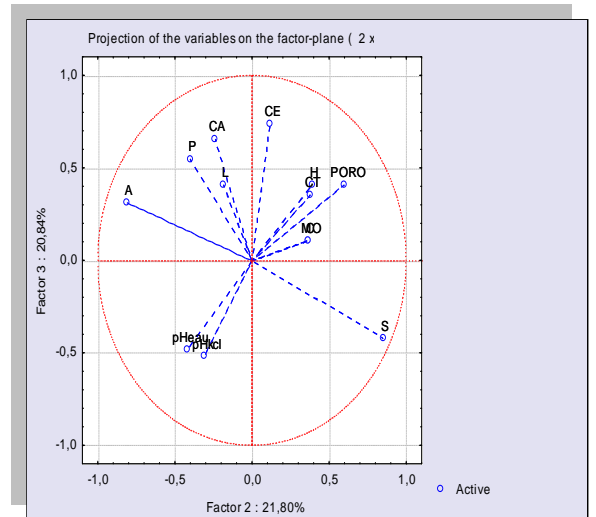
**Figure 47.** Projection des cases des facteurs 1 et 2



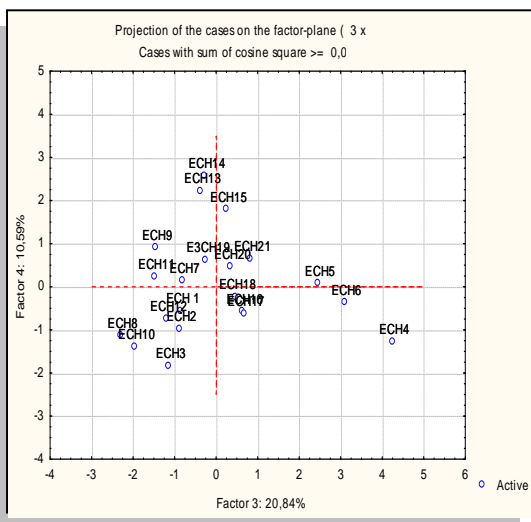
**Figure 48.** Analyse en composantes principales



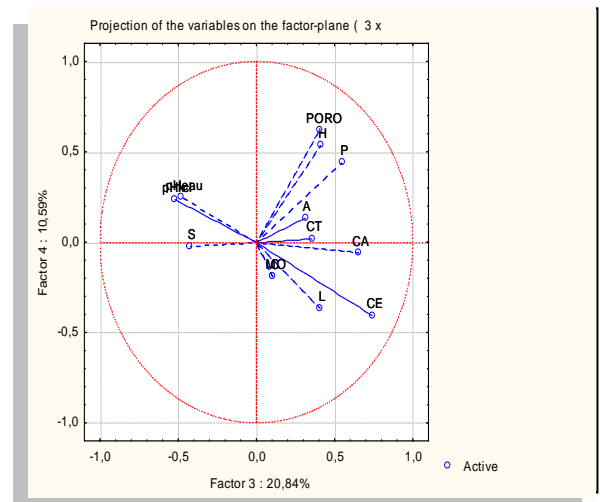
**Figure 49.** Projection des cases des facteurs 2 et 3



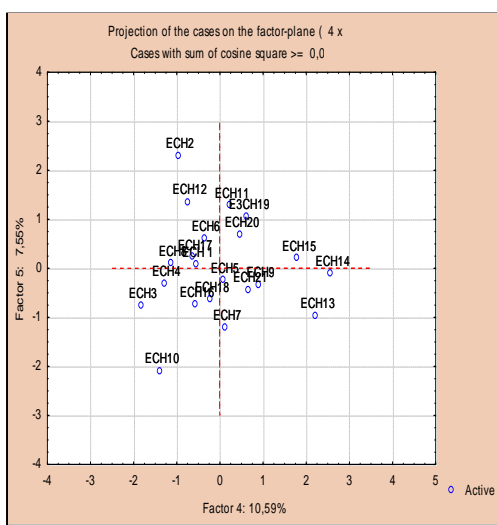
**Figure 50.** Analyse en composantes principales



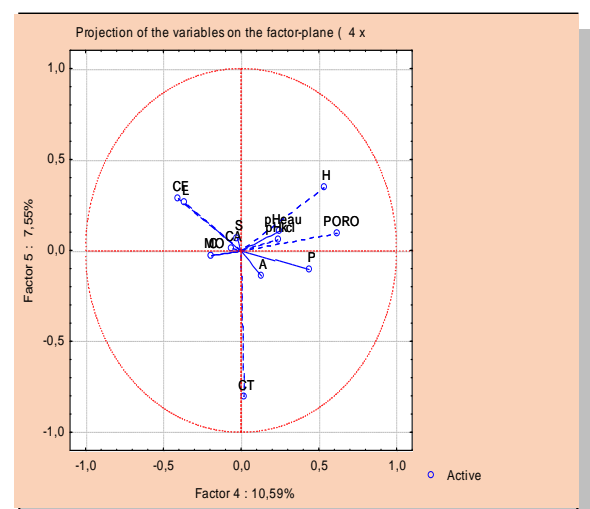
**Figure 51.** Projection des cases des facteurs 3 et 4



**Figure 52.** Analyse en composantes principales

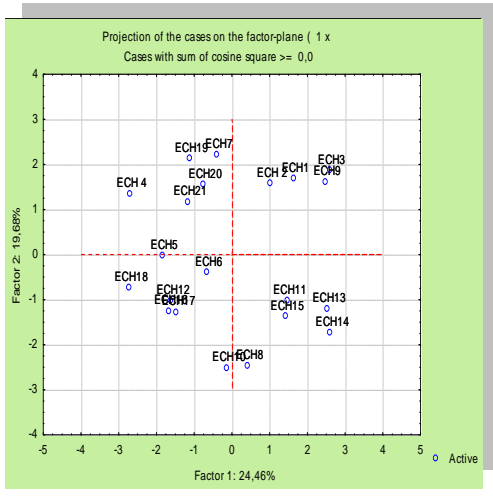


**Figure 53.** Projection des cases des facteurs 4 et 5

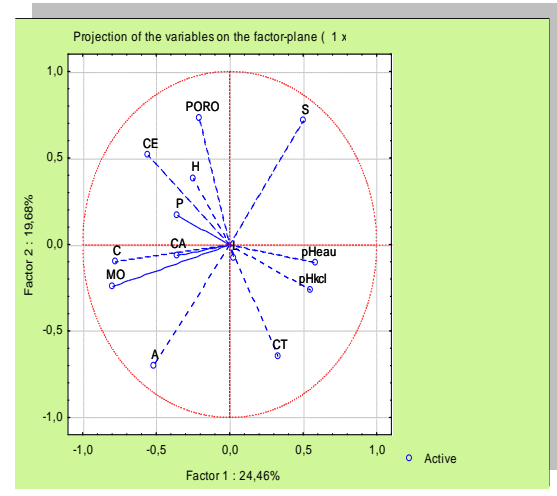


**Figure 54.** Analyse en composantes principales

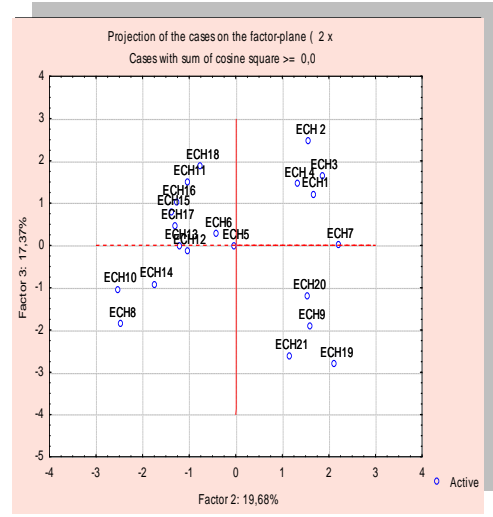
**b) - Analyse en composantes principales (épaision)**



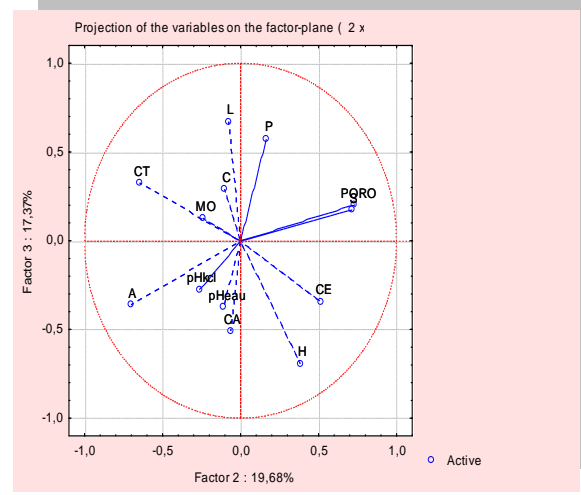
**Figure 55.** Projection des cases des facteurs 1 et 2



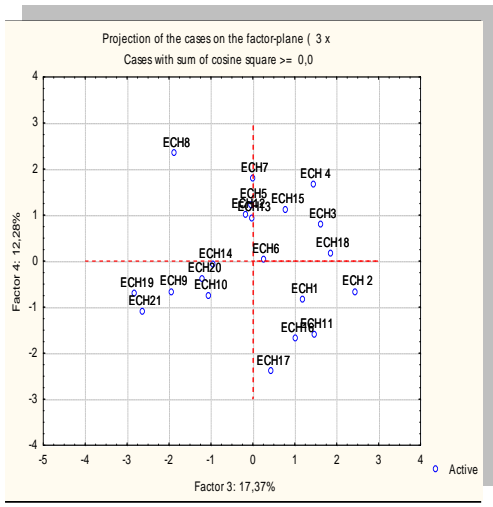
**Figure 56.** Analyse en composantes principales



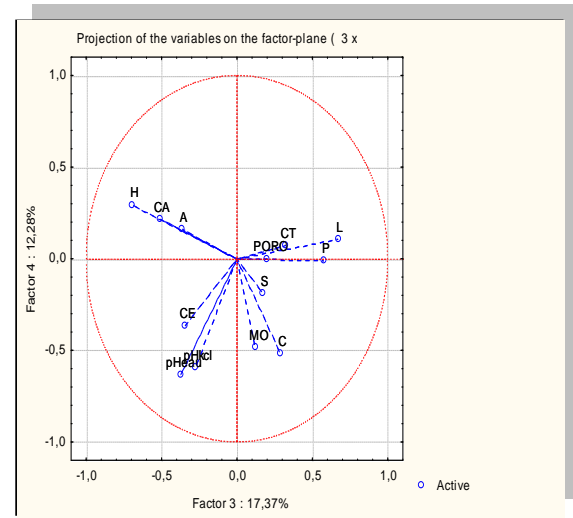
**Figure 57.** Projection des cases des facteurs 2 et 3



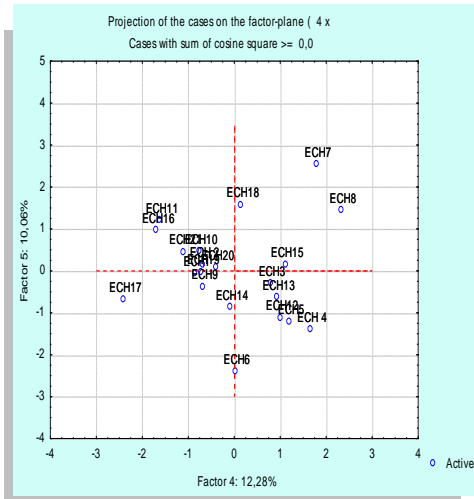
**Figure 58.** Analyse en composantes principales



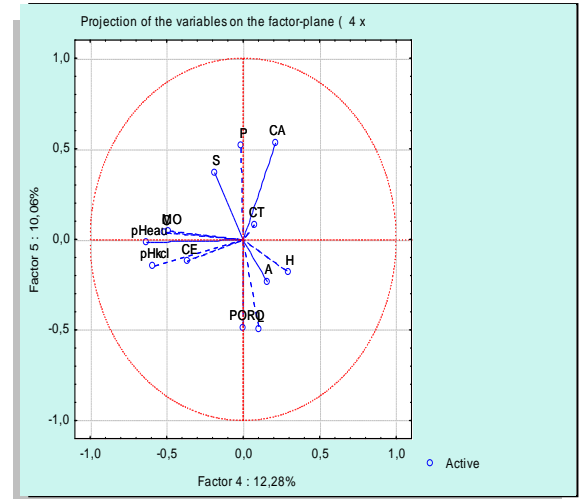
**Figure 59.** Projection des cases des facteurs 3 et 4



**Figure 60.** Analyse en composantes principales

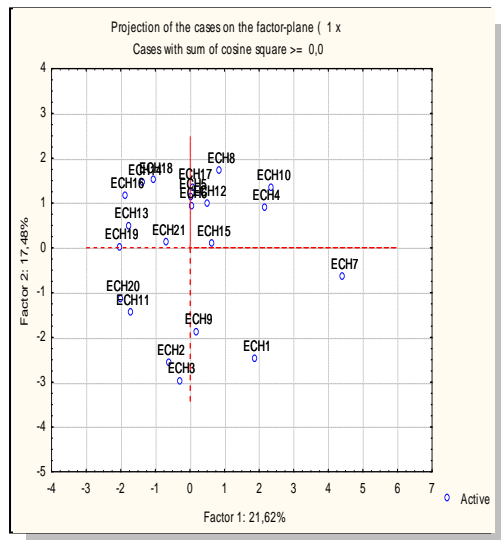


**Figure 61.** Projection des cases des facteurs 4 et 5

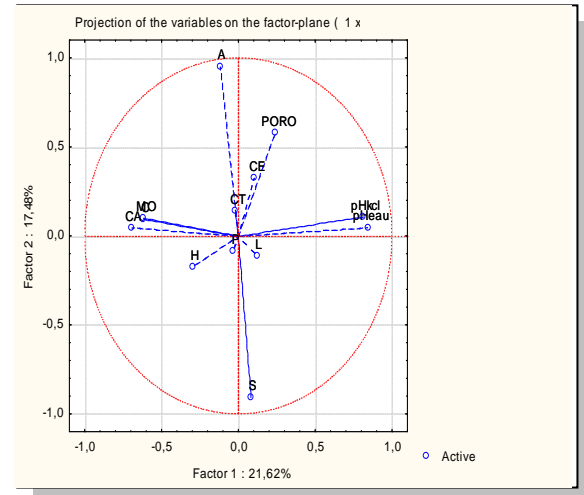


**Figure 62.** Analyse en composantes principales

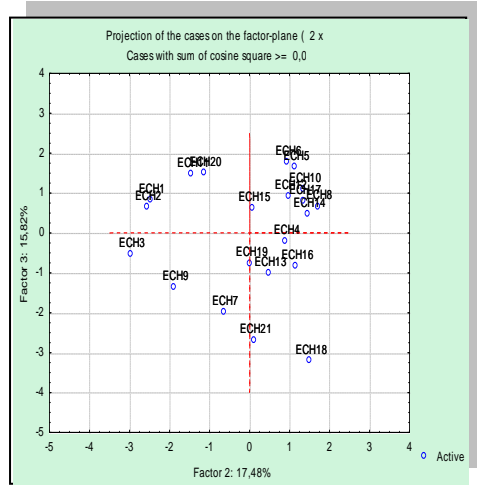
**c) - Analyse en composantes principales (après récolte)**



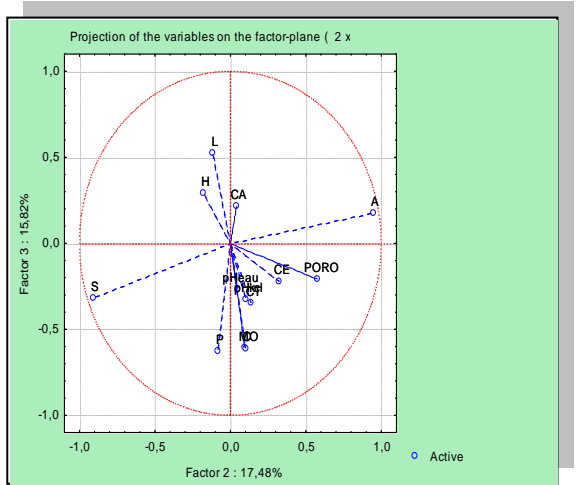
**Figure 63.** Projection des cases des facteurs 1 et 2



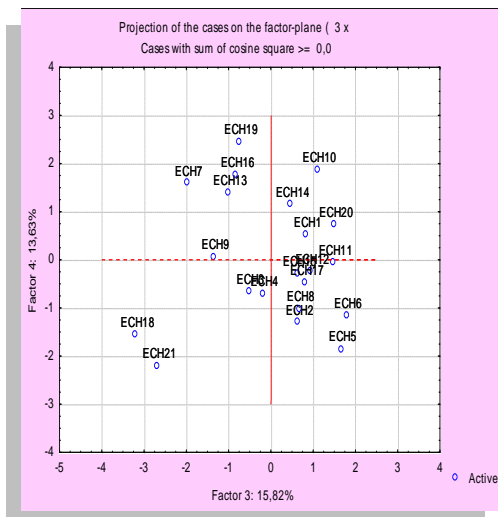
**Figure 64.** Analyse en composantes principales



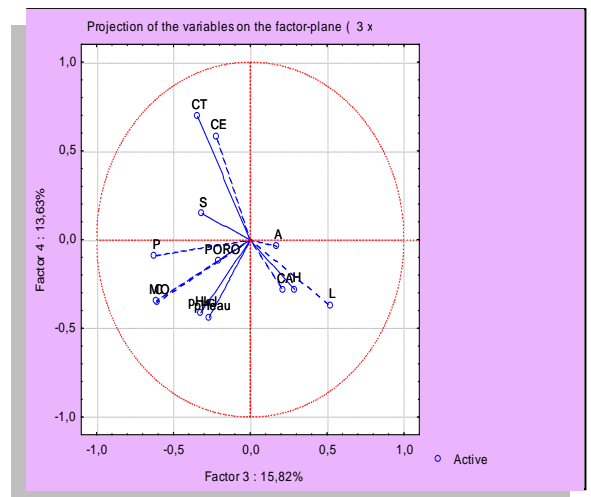
**Figure 65.** Projection des cases des facteurs 2 et 3



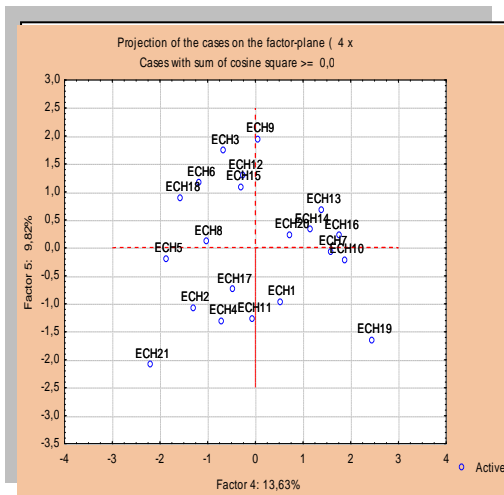
**Figure 66.** Analyse en composantes principales



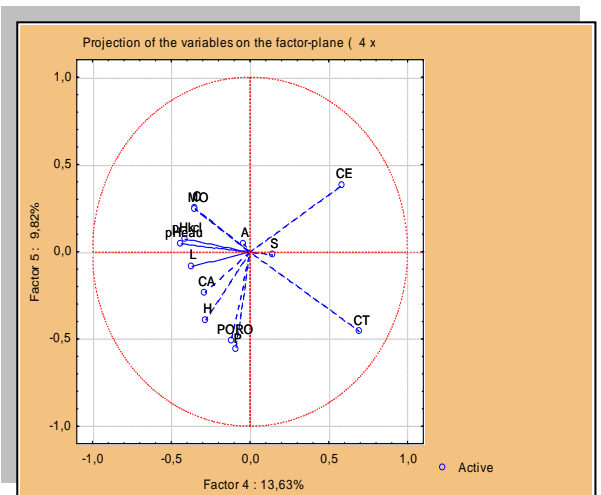
**Figure 67.** Projection des cases des facteurs 3 et 4



**Figure 68.** Analyse en composantes principales



**Figure 69.** Projection des cases des facteurs 4 et 5



**Figure 70.** Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales au tallage fait ressortir un premier axe avec 27.96% de la variance totale ; on retrouve des corrélations positives entre matière organique, humidité hygroscopique, carbone total et conductivité électrique,  $\text{pH}_{\text{eau}}$ ,  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  et calcaire actif (figure 48). Le deuxième axe représente 21.80 % de la variance totale, avec des corrélations positives entre phosphore assimilable,  $\text{pH}_{\text{eau}}$ ,  $\text{pH}_{\text{KCl}}$ , calcaire actif et matière organique. Sur le troisième axe (15.82%), on remarque une corrélation négative entre porosité et conductivité électrique. Sur le quatrième axe (13.63 %), on trouve une corrélation négative entre conductivité électrique et calcaire total. A la lumière des résultats de la projection, les blocs 2 et 3 qui ont reçu les doses 30 et 45 unités du phosphore sont les plus caractéristiques.

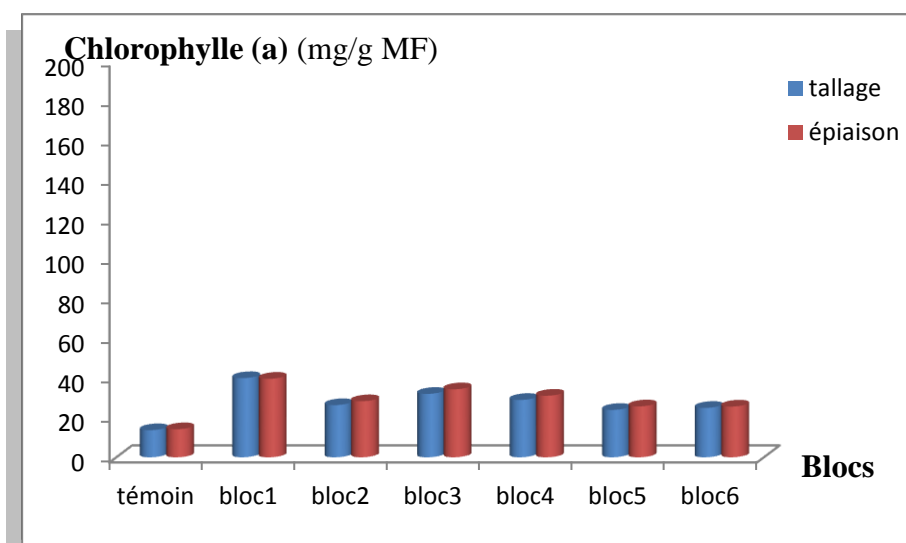
Les sols contiennent des quantités variables de phosphore total sous forme minérale et organique. Le phosphore organique représente 15 à 50 % du phosphore total. Le phosphore minéral représente généralement la plus grande partie. L'élément phosphore participe à des phénomènes cycliques, soumis

à différents mécanismes physicochimiques et biologiques (Douglas, 1964 & Demelon *et al.*, 1969). Lorsqu'on apporte des engrais minéraux, une partie est dissoute dans la solution du sol, une autre fixée sur le complexe adsorbant et peut-être précipitée sous forme de phosphate de Ca, Fe et Al. La plante ne peut utiliser que le phosphore sous forme minéral (Barbier, 1964 & Gachon, 1972). Quand la consommation par la plante baisse la concentration de la solution du sol, une partie des ions liés au complexe adsorbant passe dans la solution pour rétablir un équilibre rompu. Cette alimentation de la plante en phosphore assimilable est étroitement liée à l'acidité du sol. En effet, les ions phosphates sont sous trois formes:  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  soluble et  $\text{PO}_4^{3-}$  insoluble. Les ions phosphates peuvent migrer vers les surfaces internes des feuillettes. On les trouve aussi associés à l'humus sous forme de composés mal définis dits humophosphates, capables de se dissocier. La fixation des ions phosphates met en œuvre des agents mixtes tels que les complexes (argile, humus), sesquioxydes, carbonates, humates calciques, capables de donner d'autres formes de liaisons très stables qui les conduisent à des états de rétrogradation. Les phosphates solubles ou adsorbés peuvent être utilisés par les microorganismes et passer à l'état organique. Il peut y avoir dissolution de phosphore après altération des minéraux du sol et passage à l'état adsorbé ou organique. La minéralisation des matières organiques peut redonner du phosphore minéral adsorbé ou soluble (Raharinosy, 1996 & Duguet, 2005).

## 2.1.2. Caractéristiques physiobiochimiques de la plante

### 2.1.2.1. Chlorophylle (a)

Après application mixte des trois molécules de pesticides et le fertilisant phosphaté, les résultats obtenus des chlorophylles sont représentés par la figure 71.



**Figure 71.** Effet du traitement sur la teneur en chlorophylle (a)

La quantité en chlorophylle (a) est variable d'un bloc à l'autre. La valeur la plus élevée est 40,15 mg/g MF au niveau du bloc 1 et la plus basse (24.01 mg/g MF) au niveau du bloc 5. Le bloc témoin présente la teneur la plus faible (13.73 mg/g MF). Le deuxième stade phénotypique est caractérisé par une augmentation des quantités de la chlorophylle (a), avec une moyenne de 28,53 mg/g MF (figure 71). L'étude statistique révèle une différence significative entre le bloc 1 et le bloc témoin pour les deux périodes. Alors que le même test appliqué sur les prélèvements montre que la différence n'est pas significative (tableau 19).

**Tableau 19.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Chlorophylle a)

	H	P
<b>Chl (a) 1</b>	18.35498	0.0054
<b>Chl (a) 2</b>	17.95671	0.0063
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
<b>Chl (a) 1</b>		
<b>Chl (a) 2</b>	0.9138535	0.3391

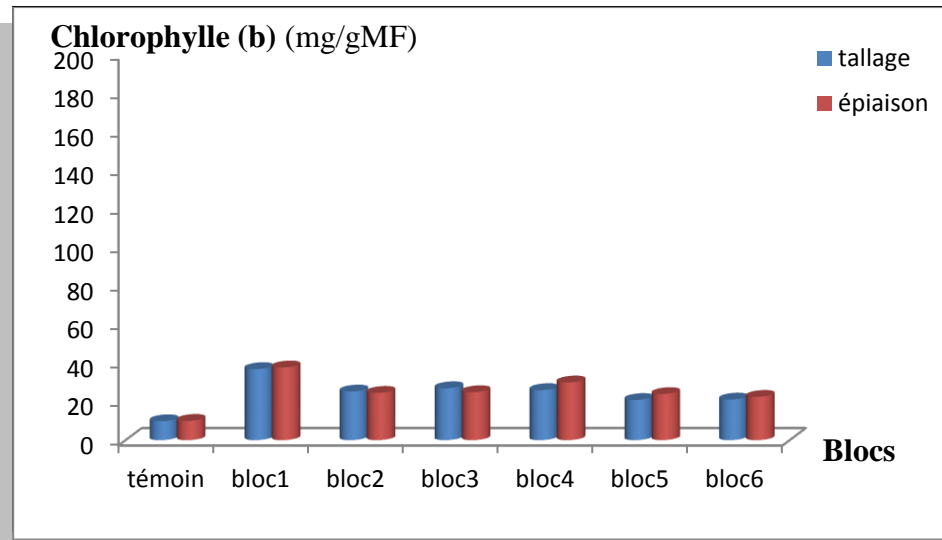
**Chl (a) 1 :** Chlorophylle (a) pendant le tallage

**Chl (a) 2 :** Chlorophylle (a) pendant l'épiaison

#### 2.1.2.2. Chlorophylle (b)

Les teneurs en chlorophylle (b) au niveau des plantules au tallage varient entre 37.17 mg/g MF au niveau du bloc 1 comme valeur la plus élevée et 21 mg/g MF au bloc 5 comme valeur la plus petite. Par ailleurs le témoin donne une teneur très faible par rapport aux blocs traités (9.89 mg/g MF). L'épiaison montre des résultats proches de celles issues du tallage, où on trouve une quantité maximale de l'ordre de 38.01 mg/g MF et une moyenne de 24,97 mg/g MF (figure 72). Le test de Kruskal-Wallis indique qu'il existe une différence significative entre traitements sauf au niveau des blocs 1 et témoin. D'autre part, il n'y a pas de différence significative entre les deux stades de prélèvement (tableau 20).





**Figure72.** Effet du traitement sur la teneur en chlorophylle (b)

**Tableau 20.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Chlorophylle b)

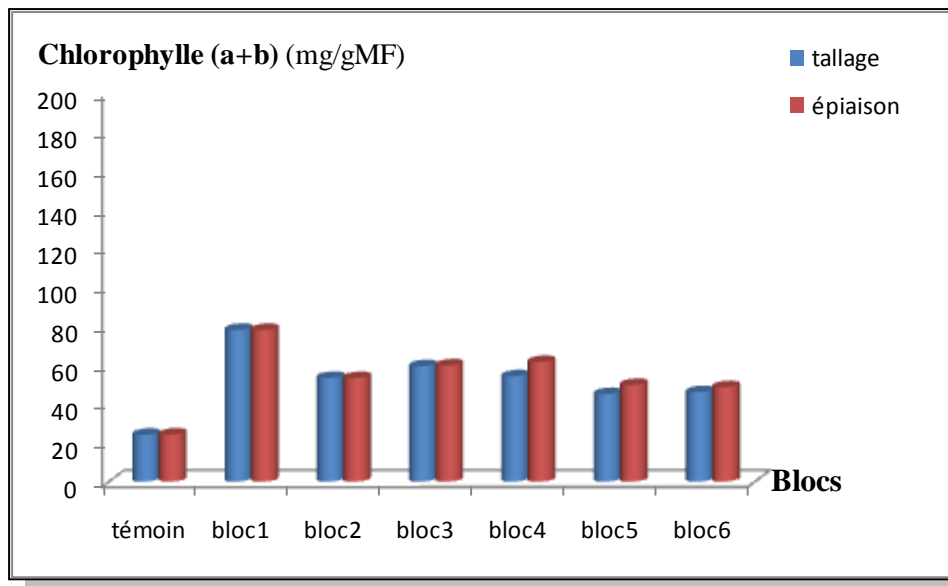
	H	P
<b>Chl (b) 1</b>	17.83550	0.0067
<b>Chl (b) 2</b>	18.21645	0.0057
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
<b>Chl (b) 1</b>		
<b>Chl (b) 2</b>	0.1520329	0.6966

**Chl (b) 1 :** Chlorophylle (b) au tallage

**Chl (b) 2 :** Chlorophylle (b) à l'épiaison

### 2.1.2.3. Chlorophylle (a+b)

Les résultats obtenus pour la chlorophylle (a+b) illustrent l'existence d'une variabilité entre les blocs au tallage. On a enregistré 77,98 mg/g MF au niveau du bloc 1 et 45,01 mg/g MF au niveau du bloc 5 avec une moyenne de l'ordre de 51,42 mg/g MF. Les végétaux du bloc témoin présentent les teneurs les plus faibles (24,08 mg/g MF). En ce qui concerne le stade épiaison, nous constatons une faible augmentation des quantités de la chlorophylle (a+b) avec une moyenne 53,55 mg/g MF (figure 73). Après une analyse statistique, nous trouvons une différence significative entre les doses du phosphore, alors qu'elle est absente entre les stades de prélèvement (tableau 21).



**Figure73.** Effet du traitement sur la teneur en chlorophylle (a+b)

**Tableau 21.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Chlorophylle a+b)

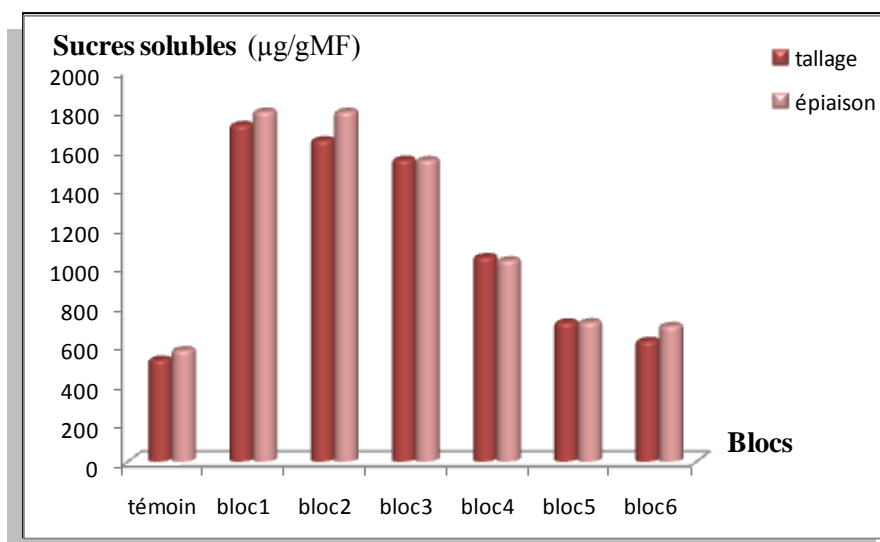
	H	P
<b>Chl (a+b) 1</b>	18.45887	0.0052
<b>Chl (a+b) 2</b>	18.78276	0.0045
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
<b>Chl (a+b) 1</b>		
<b>Chl (a+b) 2</b>	0.5140426	0.4734

**Chl (a+b) 1 :** Chlorophylle (a+b) au tallage

**Chl (a+b) 2 :** Chlorophylle (a+b) à l'épiaison

#### 2.1.2.4. Sucres solubles

Au tallage, on note que le taux le plus bas ( $615.19 \mu\text{g/g MF}$ ) au niveau du bloc 6 et le plus élevé au niveau du bloc 1 ( $1719.84 \mu\text{g/g MF}$ ) avec une moyenne de ( $1113.41 \mu\text{g/g MF}$ ). Pour les plantules récoltées pendant l'épiaison, on remarque que les mêmes blocs nous donnent les valeurs les plus typiques, avec une moyenne  $1098,62 \text{ mg/g MF}$ . Le bloc témoin présente pour les deux stades la plus faible teneur en sucres solubles (figure 74). Le test statistique des médianes montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les blocs au tallage, ce qui n'est pas le cas entre le bloc 1 et le témoin à l'épiaison. Entre les deux stades de prélèvements, le test de Kruskal-Wallis informe l'absence d'une différence significative (tableau 22).



**Figure74.** Effet du traitement sur la teneur en sucres solubles

**Tableau 22.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Sucres Solubles)

	H	P
S 1	18.06061	0.0061
S 2	19.49784	0.0034
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
S 1		
S 2	0.6684069	0.4136

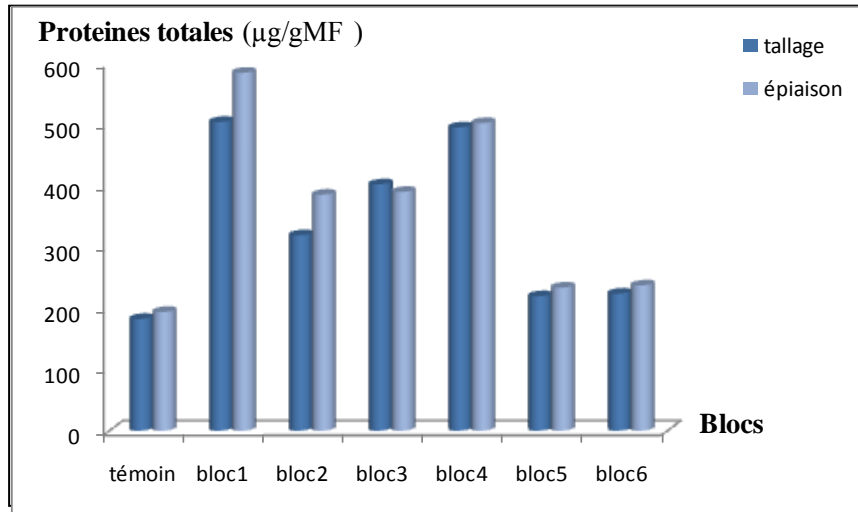
**S 1 :** Sucres solubles au tallage

**S 2 :** Sucres solubles à l'épiaison

### 2.1.2.5. Protéines totales

Concernant les protéines totales, le stade tallage est caractérisé par une variation des quantités suivant les blocs traités par rapport au témoin. Cette variation est illustrée dans la figure 75 dont la teneur maximale est (504.13 mg/g MF) au niveau du bloc 1, et la valeur minimale (219.53 mg/g MF) au niveau du bloc 5, avec une moyenne de 335.22 mg/g MF. En plus une augmentation des taux des protéines totales à l'épiaison par rapport au tallage, où on remarque au niveau des plantules récoltées au bloc 1, une valeur de 584.3 mg/g MF, et au bloc 5 le taux le plus faible 233,37 mg/g MF et au bloc témoin 193.79 mg/g MF (figure 75).

Le test des médianes montre qu'il existe une différence significative entre le bloc 1 et le témoin et ce dernier avec le bloc 4, durant le stade tallage. En revanche, il n'y a pas de différence significative entre les traitements pendant l'épiaison. De même entre les deux stades, il n'y a pas de différence (tableau 23).



**Figure 75.** Effet du traitement sur la teneur en protéines totales

**Tableau 23.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Protéines Totales)

	H	P
<b>PT 1</b>	18.33766	0.0054
<b>PT 2</b>	12.74459	0.473
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
<b>PT 1</b>		
<b>PT 2</b>	1.550546	0.2131

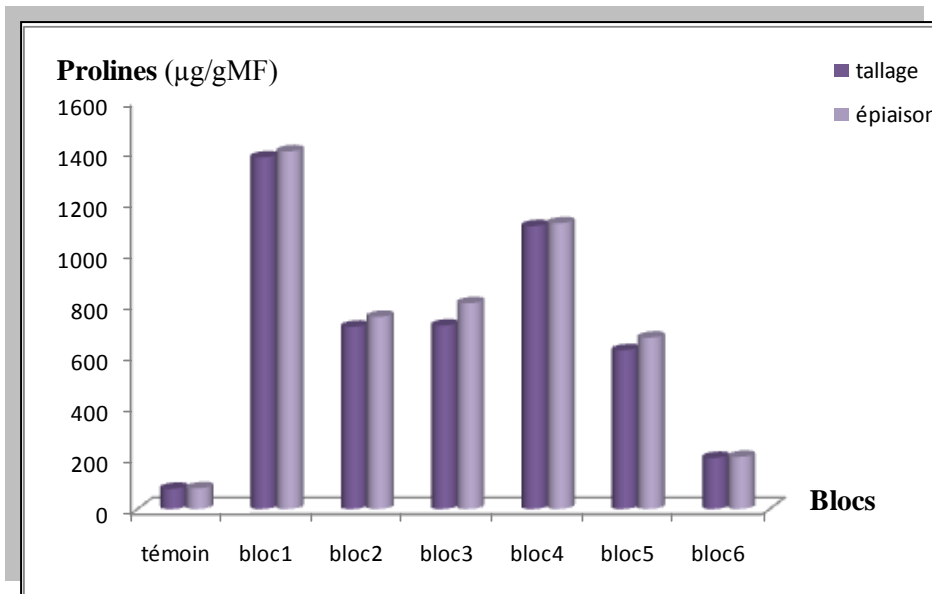
**PT 1 :** Protéines totales au tallage

**PT 2 :** Protéines totales à l'épiaison

### 2.1.2.6. Proline

Pour la proline pendant le tallage, le taux le plus élevé est enregistré au niveau du bloc 1 (1378.11 µg/g MF), et le plus faible (200.13 µg/g MF) au bloc 6, avec une moyenne de 688.79 µg/g MF. A l'épiaison, le bloc 1 donne la teneur la plus élevée (1402.01 mg/g MF), le bloc 6 présente toujours les taux les plus faibles (204.35 mg/g MF) et la moyenne est de l'ordre de 719.92 mg/g MF (figure 76).

Le test de Kruskal-Wallis montre qu'il existe des différences significatives entre la dose appliquée sur les plantules du bloc 1 et ceux du témoin durant les deux stades de développement du blé. On constate une absence de différence significative entre le tallage et l'épiaison (tableau 24).



**Figure 76.** Effet du traitement sur la teneur en proline

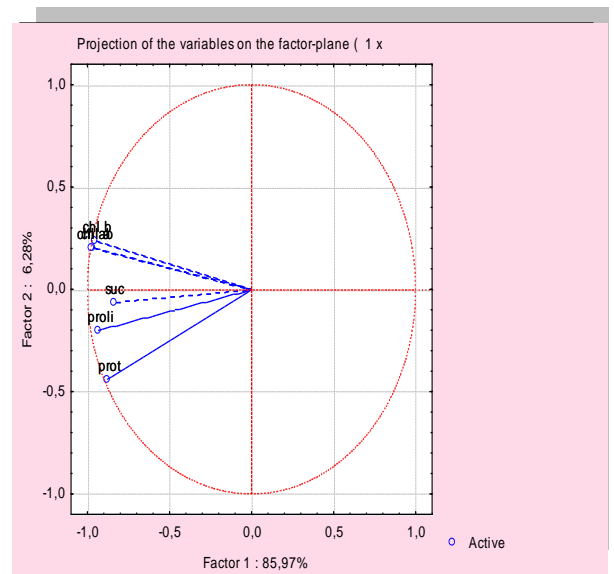
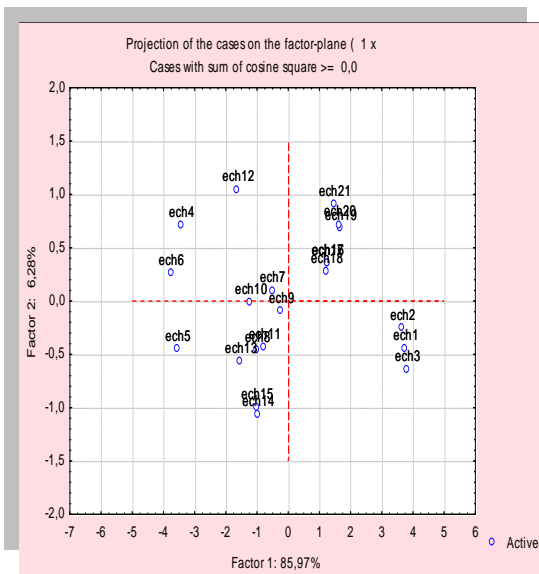
**Tableau 24.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Proline)

	H	P
<b>PR 1</b>	19.32468	0.0036
<b>PR 2</b>	18.85714	0.0044
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
<b>PR 1</b>		
<b>PR 2</b>	0.323607	0.5714

PR 1 : Proline au tallage

PR 1 : Proline à l'épiaison

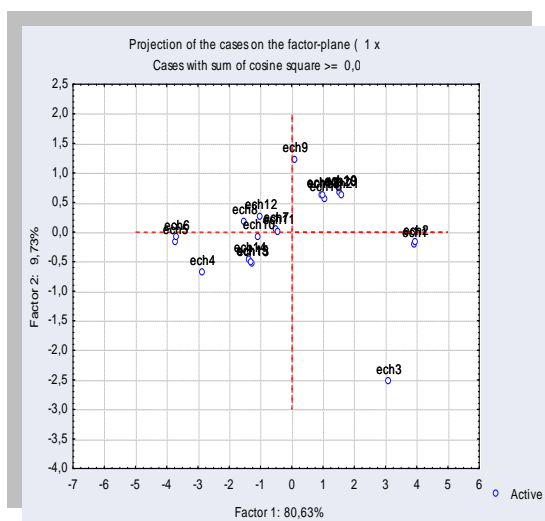
**a) - Analyse en composantes principales (tallage)**



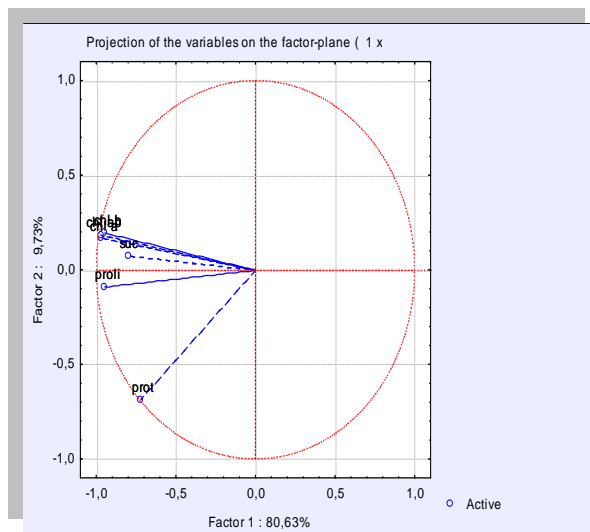
**Figure 77.** Projection des cases des facteurs 1 et 2

**Figure 78.** Analyse en composantes principales

## b) - Analyse en composantes principales (épiaison)



**Figure 79.** Projection des cas des facteurs 1 et 2



**Figure 80.** Analyse en composantes principales

Au tallage, sur le premier axe (85.97 %), les paramètres physiobiochimiques sont corrélés positivement. A l'épiaison, sur le premier axe (80.63%) tous les paramètres sont corrélés positivement. Les blocs qui ont reçu les doses 30 et 45 unités du phosphore sont les plus caractéristiques (figure 77 et figure 79). Les pigments chlorophylliens permettent l'absorption des radiations lumineuses. La chlorophylle intervient pour une conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique. L'acide phosphoglycérique (APG) est le premier composé formé et il est donc à l'origine de toutes les synthèses. Ensuite des molécules à 3 atomes de carbone (trioses phosphate) apparaissent puis des molécules à 5 atomes de carbone (ribulose 1-5 biphosphate). Puis il y a apparition de nouvelles molécules, sucres, acides aminés et acides gras (Pidancier ,2012). L'augmentation de la quantité des chlorophylles reflète la quantité des matières organiques élaborées

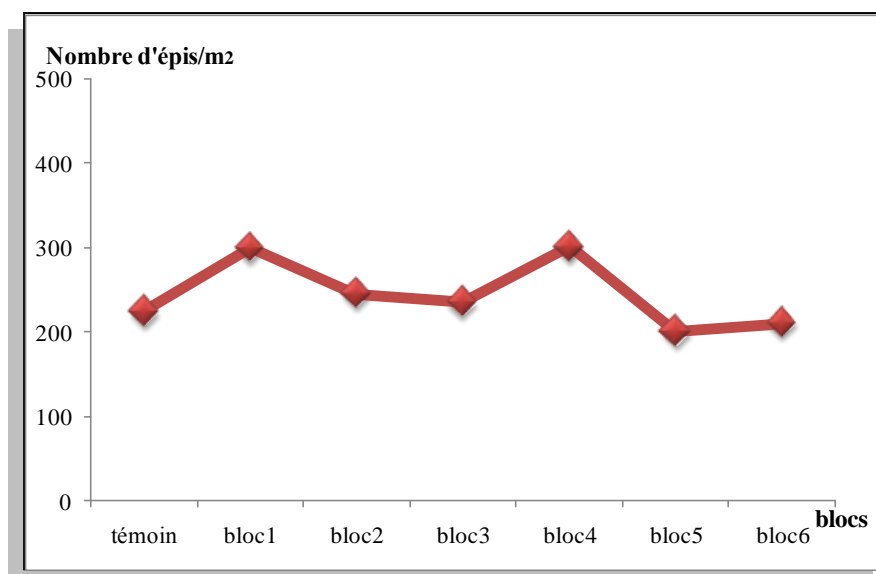
### 2.1.3. Paramètres agronomiques

Sur les 4 ans, quelques paramètres agronomiques ont été étudiés nombre d'épis/m<sup>2</sup>, longueur d'épi, nombre des grains / épis, poids de 1000 grains et les rendements.

#### 2.1.3.1. Nombre épis / m<sup>2</sup>

Le nombre moyen d'épis / m<sup>2</sup> de *Triticum durum* est de l'ordre de 245, le bloc 4 avec 301 épis/m<sup>2</sup> et le bloc 6 avec le nombre le plus faible 210 épis/m<sup>2</sup> (figure 81).

L'étude statistique entre les doses utilisées montre qu'il existe une différence significative entre les blocs 2 et 5 (tableau 25).



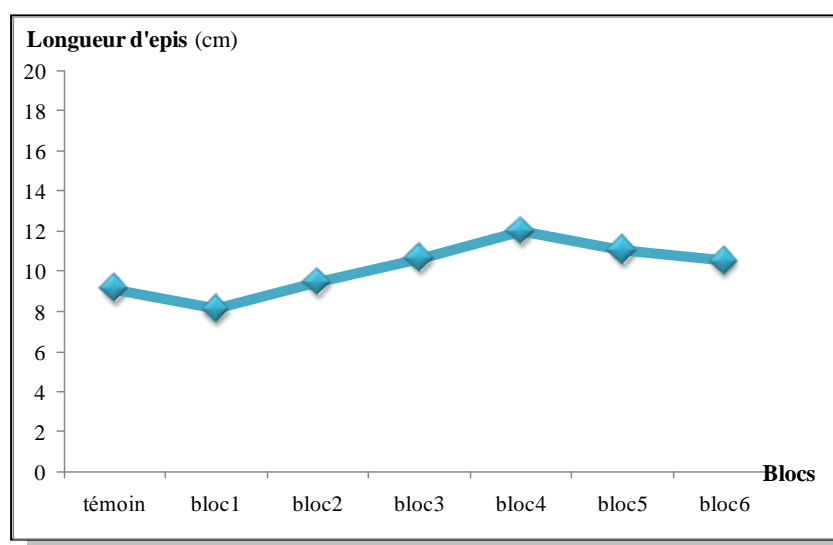
**Figure 81.** Effet du traitement sur le nombre d'épis/m<sup>2</sup>

**Tableau 25.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Nombre épis / m<sup>2</sup>)

	H	P
Nombre épis / m <sup>2</sup>	15.65729	0.0157

### 2.1.3.2. Longueur d'épis

Concernant la longueur d'épis des plantes traitées, elle varie entre 8,11 cm au niveau du bloc 1 à 11,03 cm au bloc 5. La longueur moyenne est de 10,11 cm. Le bloc témoin présente une valeur de 9.1 cm qui est une longueur assez importante par rapport à certains blocs traités (figure 82). Il existe une différence significative entre les blocs 2 et 5, ce dernier est différent par rapport au bloc 3 (tableau 26).



**Figure 82.** Effet du traitement sur la longueur d'épis

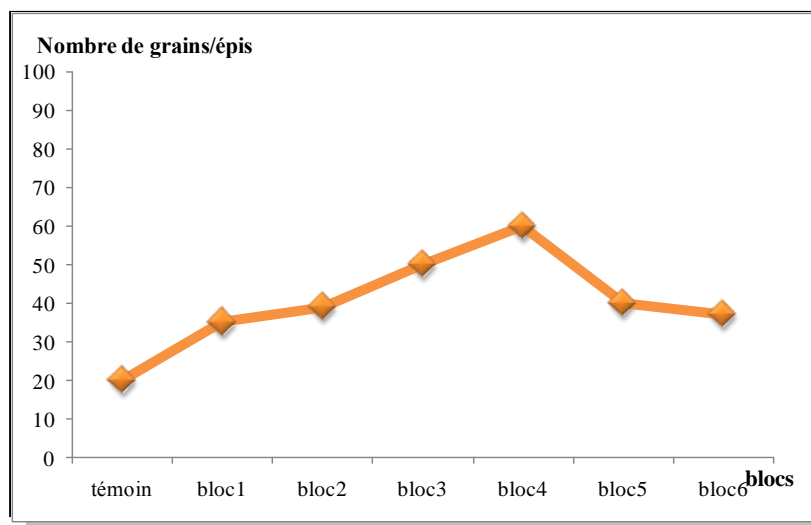
**Tableau 26.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Longueur d'épis)

	H	P
Longueur d'épis	15.65729	0.0157

### 2.1.3.3. Nombre des grains / épis

Le nombre de grains /épis oscillent entre 20 et 60. Le bloc 4 représente la valeur la plus élevée et le bloc 1 la plus faible. Alors que le bloc témoin présente un nombre assez faible de l'ordre de 20 grains. Le nombre moyen des grains est 40 (figure 83).

Le test de Kruskal-Wallis indique qu'il existe une différence significative entre les blocs 2 et 5, alors que ce dernier est différent par rapport au bloc 3 (tableau 27).



**Figure 83.** Effet du traitement sur le nombre de grains /épis

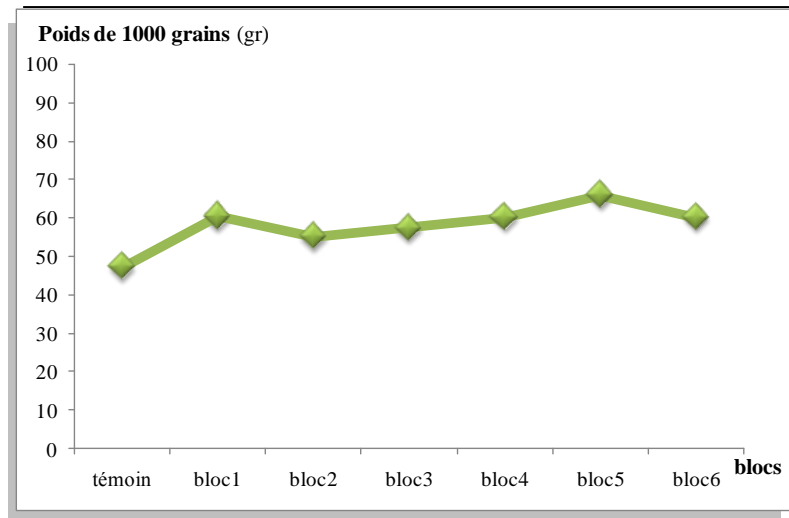
**Tableau 27.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Nombre de gains/épis)

	H	P
Nombre de gains/épis	15.65729	0.0157

### 2.1.3.4. Poids de 1000 grains

C'est un critère plutôt agronomique qui rend compte de la bonne formation des grains et dépend essentiellement de la date et de la densité du semis ainsi que de la protection antifongique. Il sert à déterminer le rendement d'une céréale avant la récolte.





**Figure 84.** Effet du traitement sur le poids de 1000 grains

Le poids de 1000 grains montre une valeur moyenne 57.99 g. Le bloc 5 donne le poids le plus important 65,86 g, tandis que le bloc 2 donne 55.12 g, c'est le plus bas par rapport aux blocs traités. On remarque aussi que le bloc témoin présente une valeur faible par rapport aux autres blocs 47,16g (figure84). Il existe une différence significative entre les blocs : 2 et 5, ce dernier et le bloc 3 (tableau 28).

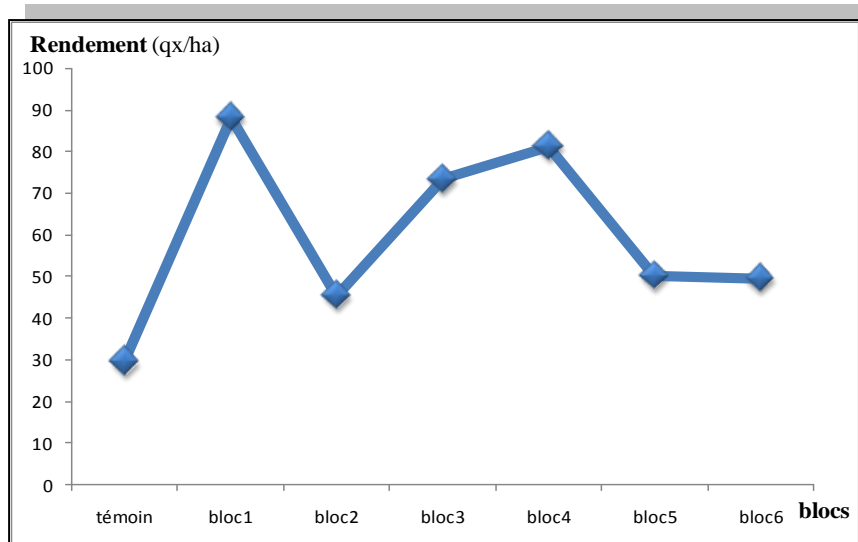
**Tableau 28.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Poids de 1000 grains)

	H	P
<b>Poids de 1000 grains</b>	15.65729	0.0157

### 2.1.3.5. Rendements

Les rendements des plantes de blé dur étudiés sont de 417,28 qx/ha (figure 85). Le rendement le plus élevé se trouve sur les parcelles du bloc 1 (88,16 qx/ha). Les résultats du bloc témoin sont toujours plus bas que les traités (29.50 qx/ha).

Le test de Kruskal-Wallis montre qu'il existe une différence significative entre le bloc 1 et le témoin (tableau 29).

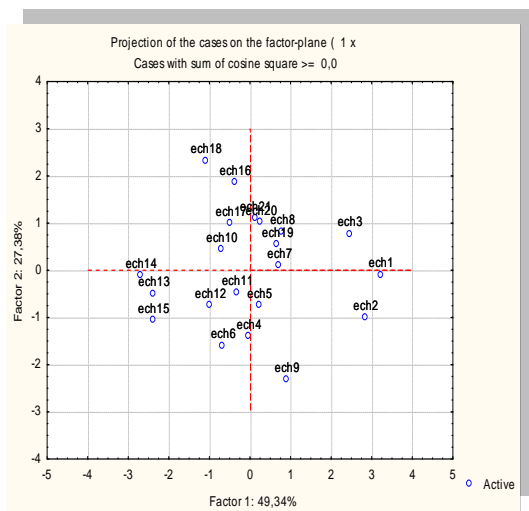


**Figure 85.** Effet du traitement sur le rendement

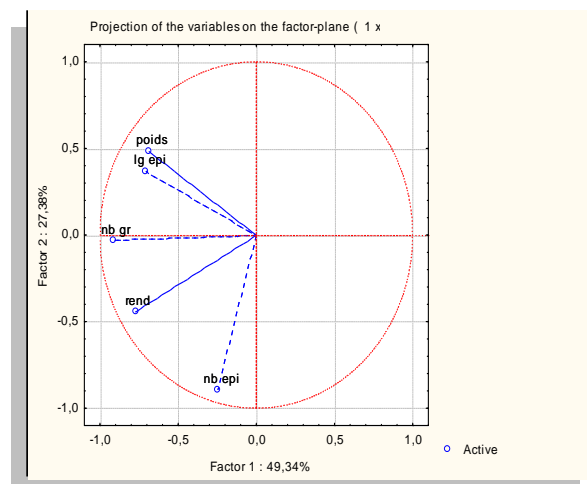
**Tableau 29.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Rendements)

	H	P
Rendements	17.19481	0.0086

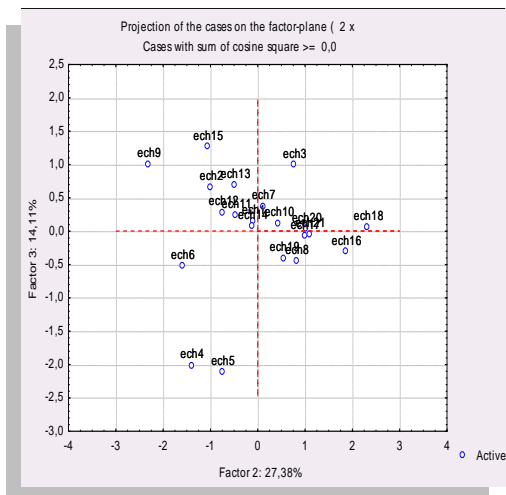
**a) - Analyse en composantes principales**



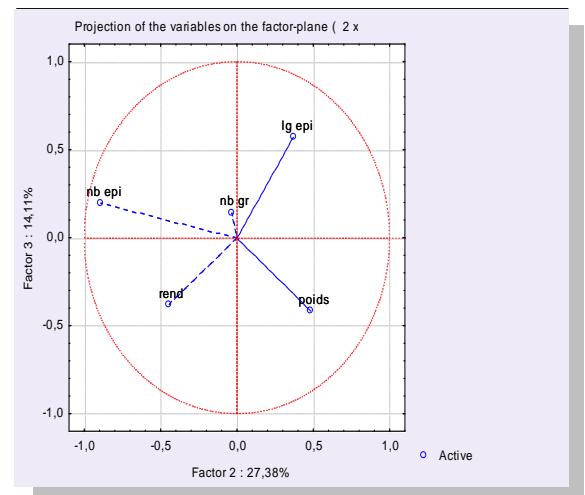
**Figure 86.** Projection des cases des facteurs 1 et 2



**Figure 87.** Analyse en composantes principales



**Figure 88.** Projection des cases des facteurs 2 et 3



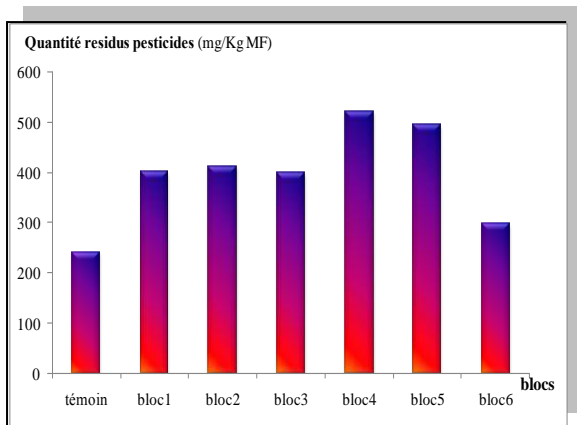
**Figure 89.** Analyse en composantes principales

Sur le premier axe (49.34%), les paramètres agronomiques étudiés sont corrélés positivement. par ailleurs, sur le deuxième (27.36%) le nombre de grains et la longueur d'épis sont corrélés négativement, il en est de même pour rendement et le poids de 1000 grains. Sur le troisième axe (14.11%) le rendement est corrélé négativement avec la longueur et nombre d'épis, le poids de 1000 grains. Il ressort que les blocs 1 et le témoin sont les plus éloignés des axes (figure 86 et figure 88). L'analyse en composantes principales montre que les paramètres agronomiques étudiés ont une relation positive avec le rendement, donc on pourra les exploiter comme critères de sélection pour l'amélioration du rendement des cultures (Pathirana, 1993 ; Ali et Tahir, 1999; Saleem *et al.*, 1999 ; Surek et Beser, 2003 ; Mohammadi *et al.*, 2003 ; Noor *et al.*, 2003; Arshad *et al.*, 2004 ; Sadek *et al.*, 2006 & Talebi *et al.*, 2007).

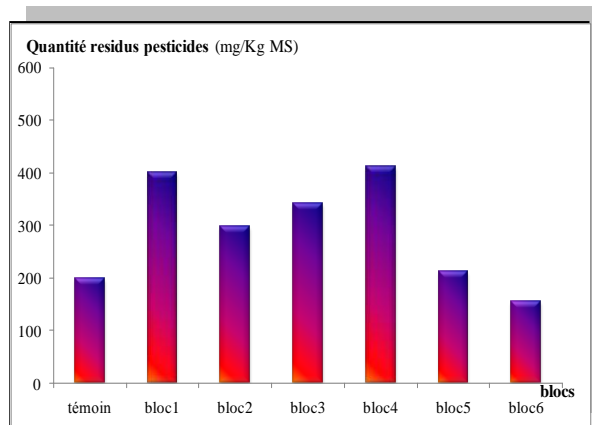
#### 2.1.4. Dosage des résidus de pesticides

Il y a une grande variation des résultats au tallage, la valeur la plus élevée est au niveau du bloc 4 avec 521 mg/kg et la plus faible au niveau du bloc 6 avec 298 mg/kg. Ces deux valeurs restent toujours supérieures à celle du témoin qui est de 240 mg/kg (figure 90). Durant l'épiaison, il existe une faible diminution des quantités de résidus de pesticides, mais le bloc 4 reste toujours avec la valeur supérieure de 412 mg/kg MS (figure 91).

Le test de Kruskal-Wallis montre une absence de différence significative entre les traitements appliqués. Cependant, ce test confirme qu'il existe une différence significative entre les deux stades de prélèvements (tableau 30).



**Figure 90.** Quantité des résidus des pesticides dans le sol pendant le tallage



**Figure 91.** Quantité des résidus des pesticides dans le sol pendant l'épiaison

Il y a une grande variation des résultats au tallage, la valeur la plus élevée est au niveau du bloc 4 avec 521 mg/kg et la plus faible au bloc 6 avec 298 mg/kg. Ces deux valeurs restent toujours supérieures à celle du témoin qui est de 240 mg/kg (figure 90). Durant l'épiaison, il existe une faible diminution des quantités de résidus de pesticides, mais le bloc 4 reste toujours avec la valeur supérieure de 412 mg/kg MS (figure 91). Le test de Kruskal-Wallis montre une absence de différence significative entre les traitements appliqués. Cependant, ce test confirme qu'il existe une différence significative entre les deux stades de prélèvements (tableau 30).

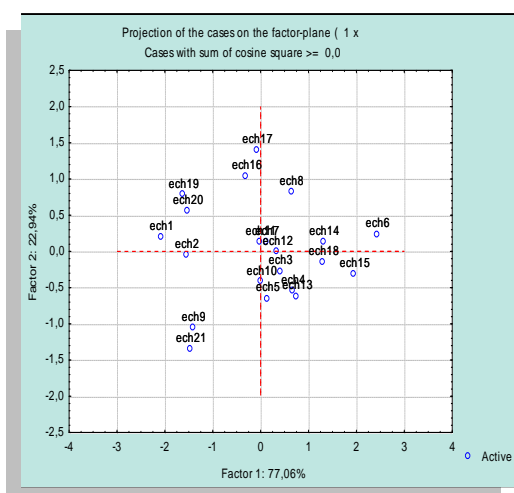
**Tableau 30.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Résidus pesticides)

	H	P
<b>R 1</b>	10.31250	0.1121
<b>R 2</b>	12.41558	0.0533
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
<b>R 1</b>		
<b>R 2</b>	4.523195	0.0334

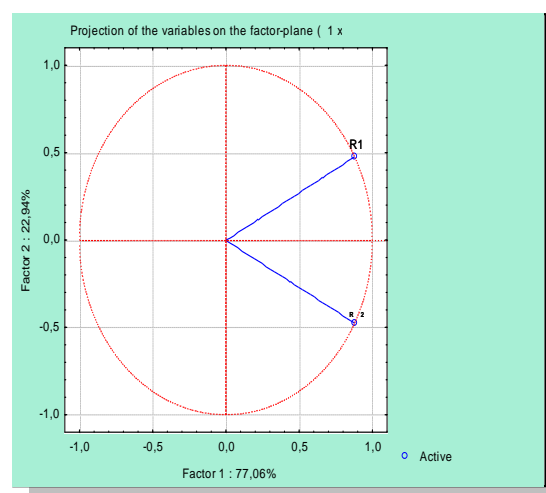
**Résidus 1 :** Résidus pesticides au tallage

**Résidus 2 :** Résidus pesticides à l'épiaison

## a) - Analyse en composantes principales



**Figure 92.** Projection des cases des facteurs 1 et 2

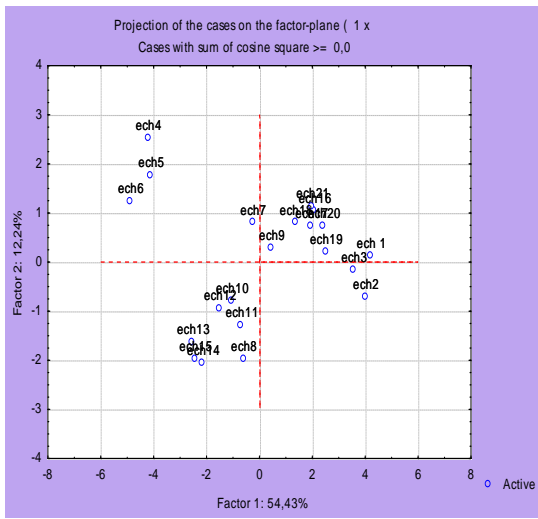


**Figure 93.** Analyse en composantes principales

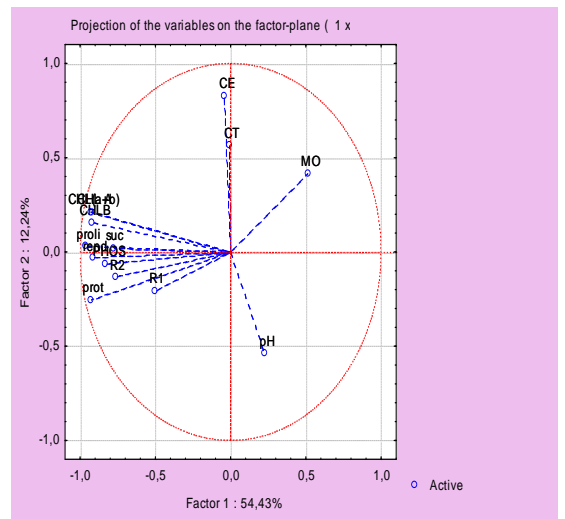
Sur le premier axe (77.06 %) la quantité de résidus au tallage est en corrélation positive, alors que sur le deuxième axe du plan (22.9 %), la corrélation est négative (figure 93). La projection des cases sur les deux axes montre que les blocs 2 et 3 sont les plus intéressants (figure 92).

La dégradation est la transformation du pesticide provoquant des modifications de la structure moléculaire avec apparition de métabolites. Ces transformations contribuent à diminuer la quantité de matière active. Ainsi, dès leur application les pesticides subissent des processus biotiques ou abiotiques qui conduisent à leur dégradation plus ou moins complète. Le principal processus de dégradation biotique des pesticides est assuré par les organismes biologiques de la microflore du sol (bactéries, champignons, algues, levures...), essentiellement dans les premiers centimètres du sol. La principale dégradation d'ordre physique (abiotique) est la photodécomposition par les rayonnements ultraviolets. Des traitements répétés sur le sol avec un même pesticide peuvent aboutir à la sélection d'une microflore adaptée qui accélère la dégradation du pesticide appliqué. La cinétique de dégradation des molécules est déterminée en estimant la persistance du produit. Pour cela, on détermine sa demi-vie de dissipation (DT50) qui est la durée à l'issue de laquelle sa concentration initiale dans le sol a été réduite de moitié. Pour un même pesticide, la DT 50 peut varier en fonction de la saison, du pédoclimat et de l'activité microbiologique du sol. La minéralisation du pesticide, avec la transformation du carbone organique en CO<sub>2</sub>, est le processus ultime de dégradation et il est le seul provoquant une élimination complète du pesticide (Ouattara *et al.*, 2010).

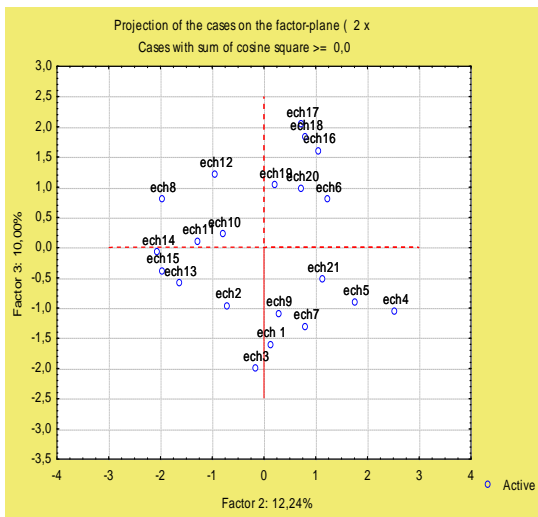
**b) - Analyse en composantes principales (paramètres confondus au tallage)**



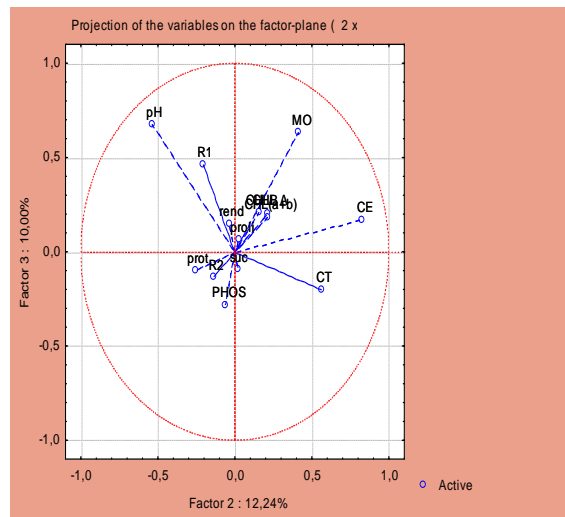
**Figure 94.** Projection des cases des facteurs 1 et 2



**Figure 95.** Analyse en composantes principales



**Figure 96.** Projection des cases des facteurs 2 et 3



**Figure 97.** Analyse en composantes principales

c) - Analyse en composantes principales (paramètres confondus à l'épiaison)

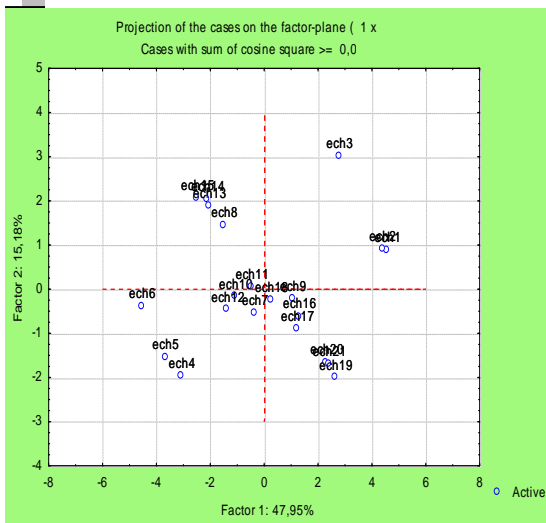


Figure 98. Projection des cases des facteurs 1 et 2

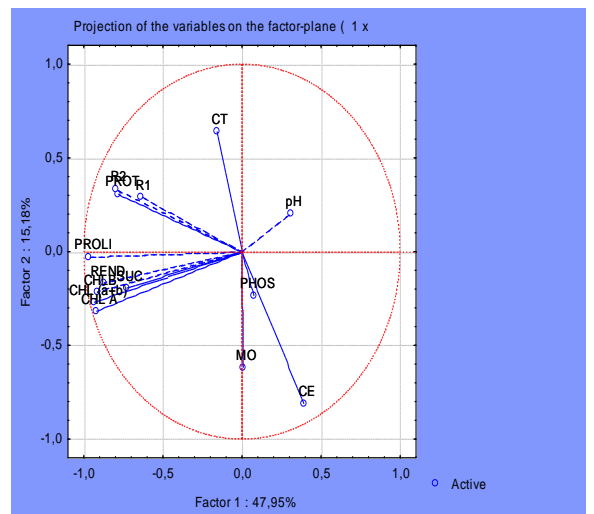


Figure 99. Analyse en composantes principales

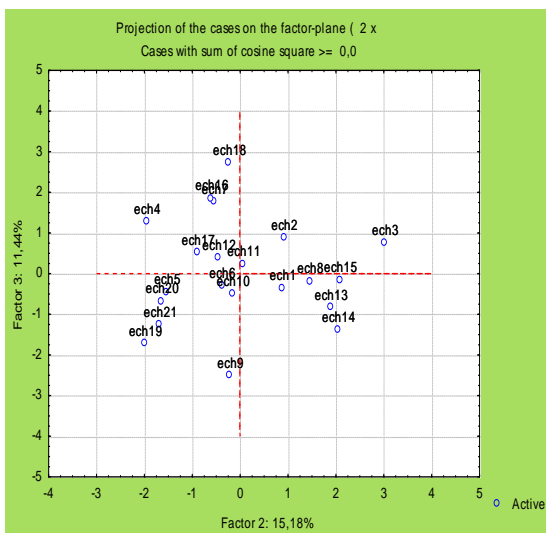


Figure 100. Projection des cases des facteurs 2 et 3

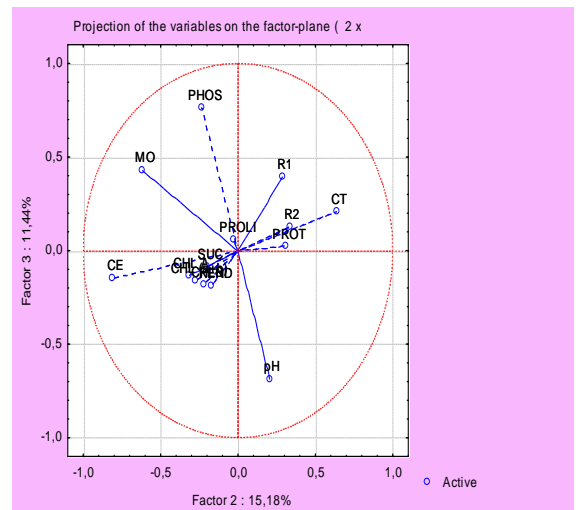


Figure 101. Analyse en composantes principales

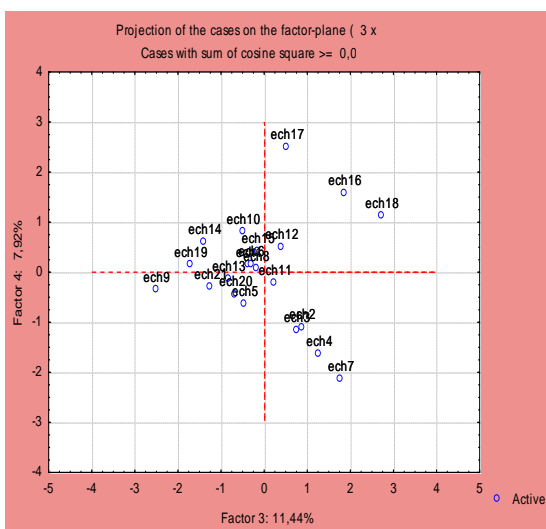


Figure 102. Projection des cases des facteurs 3 et 4

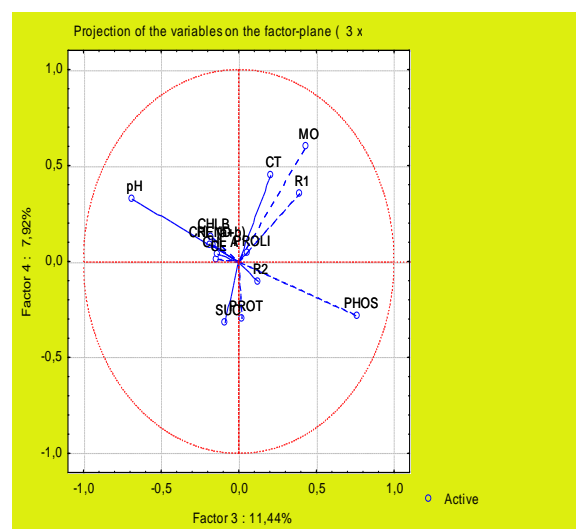


Figure 103. Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales de tous les paramètres confondus montre au tallage donne sur l'axe vertical (54,43%) présente une corrélation positive entre les paramètres physio biochimiques de la plante, les quantités de résidus de pesticides dégradées et le rendement de la culture ; alors que ces caractéristiques sont corrélées négativement avec le pH et la matière organique. Sur l'axe vertical (12,21%), les caractéristiques du sol sont en corrélation positive avec les paramètres de la plante, rendement et résidus de pesticides. A l'épiaison, sur le premier axe (47,95%) l'acidité du milieu ; le phosphore assimilable et la conductivité électrique sont en corrélation négative avec les autres caractéristiques. Sur le deuxième axe (15,18 %) et le troisième (11,44 %) les quantités de résidus sont en corrélation négative avec le pH du milieu. les paramètres du végétale sont corrélés positivement avec le rendement.

La biodisponibilité du phosphore dans le sol dépend du pH du sol. La plus forte solubilité du phosphore dans les sols se situe entre les pH 6,2 et 7,0. Il faut tenir compte la satisfaction des besoins de la culture en phosphore assimilable, la prise en compte de la productivité des sols et la fertilisation localisée. Le diagnostic des tissus végétaux permet de déterminer si les besoins de la plante sont satisfaits par le régime de fertilisation, ou si le régime actuel sursature la plante en phosphore et cause des antagonismes ou une toxicité (Zheng *et al.*, 2001 & Parent, 2006).

Chez le blé, il existe un seul type de chloroplastes. Le CO<sub>2</sub> est fixé sur une molécule à 5 atomes de carbone (le RubP ou Ribulose bis-phosphate) pour donner deux molécules de phospho-glycerate à 3 atomes de carbone. Cette réaction est catalysée par une enzyme très abondante, la Rubisco, qui catalyse aussi la réaction du RubP avec l'oxygène, ce qui entraîne une perte de carbone sous forme de CO<sub>2</sub>, perte appelée photorespiration, car le RubP est régénéré grâce à la lumière. En pratique le rendement quantique est abaissée de 30 % à 50 % de la phototranspiration ; la fraction du carbone perdue augmente avec la température et diminue quand la teneur en CO<sub>2</sub> augmente. Donc on peut élaborer le rendement par l'augmentation de la photosynthèse du couvert végétal, en favorisant des feuilles très érigées avec possibilité de pénétration du rayonnement (Kajala, 2011 & Saugier, 2013).

## **Conclusion**

La campagne 2009-2010 est caractérisée par un lien positif entre sol, plante et résidus de pesticides. Le bloc qui a reçu la dose 92 unités du phosphore donne le rendement le plus élevé. Ce bloc est caractérisé par des sols argileux, légèrement acides, non salins où le phosphore assimilable ne dépasse pas 4 %. Malgré la teneur élevée du proline au niveau de ce bloc, les plantules de blé résistent au phénomène de stress et donne le meilleur rendement. L'élévation des teneurs en proline traduit l'existence des



molécules toxiques dans le sol, ces molécules sont les résidus de Clodinafop-propargyl et Cloquintocet-mexyl.

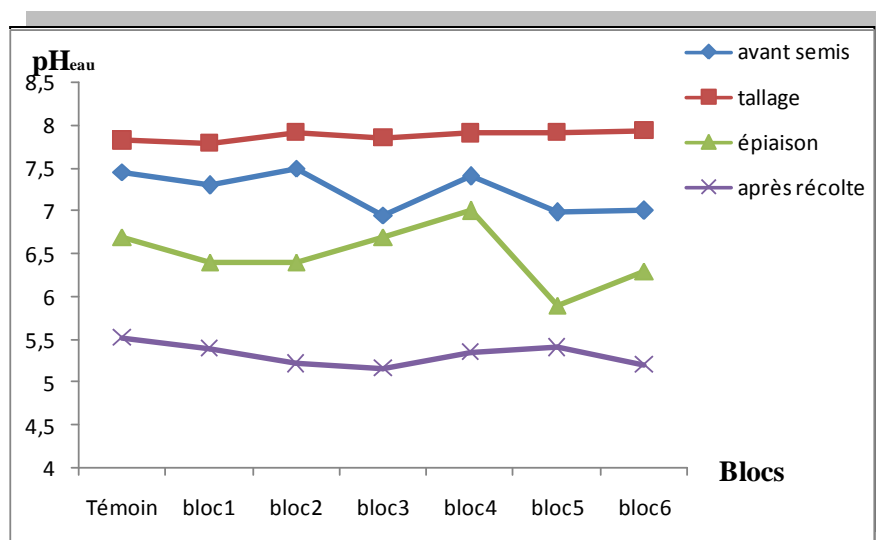
## 2.2. Campagne 2010- 2011

Notre étude s'étale sur quatre périodes de prélèvement du sol : avant le semis, tallage, épiaison et après récolte de la culture du *Triticum durum*.

### 2.2.1. Caractéristiques physicochimiques du sol

#### 2.2.1.1. $pH_{eau}$

La mesure du pH d'une suspension d'un échantillon de sol dans l'eau ( $pH_{eau}$ ) rend compte de la concentration en ions  $H_3O^+$  à l'état dissocié dans le liquide surnageant. Ces ions sont en équilibre avec ceux présents à l'état non dissocié, fixés sur certains composants solides du sol (Baize, 2000). Le pH est un model d'expression de la concentration en ions  $H^+$  d'un liquide. Au plan agronomique, l'optimum peut être fixé entre 6.5 et 7.5 (Baize, 2000).



**Figure 104.** Variation du  $pH_{eau}$  durant les stades de prélèvements

Avant le semis, les valeurs du  $pH_{eau}$  varient de 6.94 (bloc 3) à 7.5 (bloc 2), avec une moyenne de 7.22. D'après l'analyse statistique, il n'y a pas de différence significative entre le  $pH_{eau}$  du sol des différents blocs ( $p = 0.3957$ ). Au tallage, ces valeurs augmentent pour atteindre un seuil entre 7.79 (bloc 1) et 7.93 (bloc 6) avec une moyenne égale à 7.87. L'analyse statistique ne reflète pas une différence significative des médianes de  $pH_{eau}$  des différents blocs ( $p = 0.9407$ ). A l'épiaison, les valeurs du  $pH_{eau}$  du sol s'étalent entre 6.3 (bloc 6) et 7 (bloc 4), la moyenne est de 6.48. Le test des médianes ne montre pas une

différence significative entre les  $pH_{\text{eau}}$  des différents blocs du sol ( $p = 0.5603$ ). Après récolte de la culture du *Triticum durum*, le  $pH_{\text{eau}}$  du sol devient plus acide, pour atteindre des valeurs qui se situent entre 5.16 au bloc 3 et 5.52 au bloc témoin (figure 104). L'étude statistique montre qu'il n'a pas de différence significative entre les médianes des différents blocs de l'expérimentation. Au cours du cycle de la culture du *Triticum durum*, l'étude statistique du  $pH_{\text{eau}}$  du sol montre qu'il existe une différence très hautement significative entre les différents stades du cycle de la culture ( $p = 0.000$ ), mis à part entre les stades avant semis et épiaison (tableau 31).

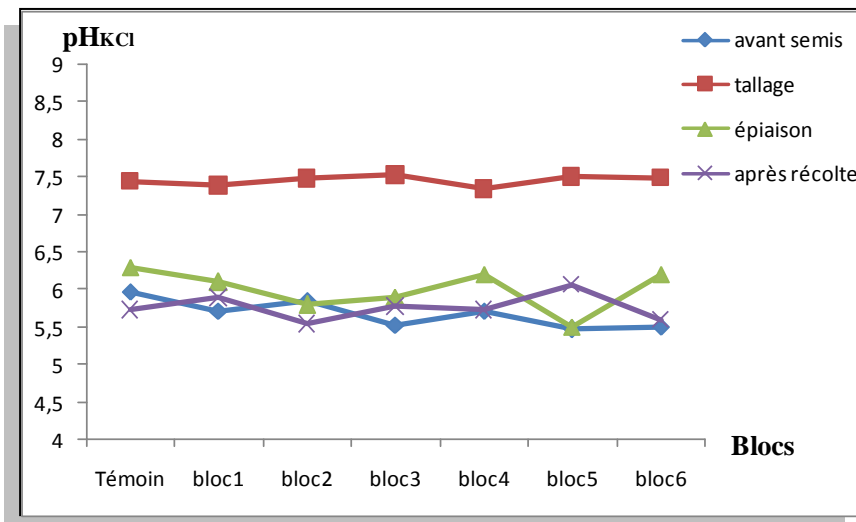
**Tableau 31.** Test des médianes de Kruskal-Wallis ( $pH_{\text{eau}}$ )

	H	P
$pH_{\text{eau1}}$	6.250812	0.3957
$pH_{\text{eau2}}$	1.755758	0.9407
$pH_{\text{eau3}}$	4.872299	0.5603
$pH_{\text{eau4}}$	2.812296	0.8320
<b>Comparaison entre prélèvements</b>		
$pH_{\text{eau1}}$ $pH_{\text{eau2}}$ $pH_{\text{eau3}}$ $pH_{\text{eau4}}$	75.90716	0.0000

$pH_{\text{eau1}}$  :  $pH_{\text{eau}}$  avant semis  
 $pH_{\text{eau2}}$  :  $pH_{\text{eau}}$  au tallage  
 $pH_{\text{eau3}}$  :  $pH_{\text{eau}}$  à l'épiaison  
 $pH_{\text{eau4}}$  :  $pH_{\text{eau}}$  après récolte

### 2.2.1.2. $pH_{\text{KCl}}$

En pédologie, dans le cas des sols acides, il est intéressant de déterminer le pH d'une suspension de sol dans une solution de chlorure de potassium ( $pH_{\text{KCl}}$ ). Les ions  $K^+$  s'échange avec les ions  $H^+$  qui n'étaient pas dissociés en suspension aqueuse. La différence entre  $pH_{\text{eau}}$  et  $pH_{\text{KCl}}$  donne une bonne idée de l'acidité potentielle. Cette différence varie de 0.5 à 1.5 unités de pH (Baize, 2000).



**Figure 105.** Variation du pH<sub>KCl</sub> durant les stades de prélèvements

Avant le semis, le pH<sub>KCl</sub> du sol s'étale entre 5.47 (bloc 5) et 5.97 (bloc témoin), la moyenne de tous les blocs est de 5.67 (figure 105). Le test de Kruskal-Wallis montre qu'il n'y a pas de différence significative entre ces médianes ( $p = 0.9135$ ). Au tallage, les valeurs du pH<sub>KCl</sub> sont élevées par rapport au stade précédent, elles varient entre 7.34 (bloc 4) et 7.53 (bloc 3). L'analyse statistique indique qu'il n'y a pas de différence significative entre ces blocs ( $p = 0.9740$ ). A l'épiaison, les valeurs du pH<sub>KCl</sub> diminuent par rapport au tallage, les valeurs se situent dans l'intervalle 5.5 (bloc 5) et 6.3 (bloc non traité), la moyenne est égale à 6. L'analyse statistique montre qu'il n'y a pas de différence significative entre traitements ( $p = 0.4265$ ). Après la récolte de la culture de *Triticum durum*, les valeurs du pH<sub>KCl</sub> diminuent par rapport à l'épiaison, elles varient entre 5.6 au bloc 6 et 6.06 au bloc 5 (figure 105). Le test des médianes entre les doses montrent qu'il n'y a pas de différence significative ( $p = 0.2064$ ) (tableau 32). Le test de Kruskal-Wallis illustre qu'il existe une différence significative entre les 4 stades sauf entre l'avant semis et l'après récolte, et entre cette dernière et l'épiaison où  $p = 0.000$  (tableau 32)

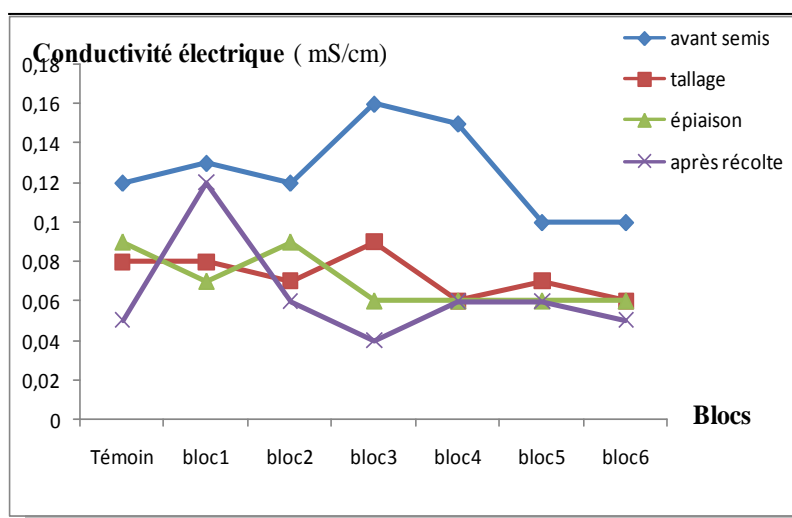
**Tableau 32.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (pH<sub>KCl</sub>)

	H	P
<b>pH<sub>KCl</sub> 1</b>	2.065972	0.9135
<b>pH<sub>KCl</sub> 2</b>	1.257044	0.9740
<b>pH<sub>KCl</sub> 3</b>	5.970672	0.4265
<b>pH<sub>KCl</sub> 4</b>	8.458688	0.2064
<b>Comparaison entre prélèvements</b>		
<b>pH<sub>KCl</sub> 1</b> <b>pH<sub>KCl</sub> 2</b> <b>pH<sub>KCl</sub> 3</b> <b>pH<sub>KCl</sub> 4</b>	53.17709	0.0000

**pH<sub>KCl</sub> 1** : pH<sub>KCl</sub> avant semis  
**pH<sub>KCl</sub> 2** : pH<sub>KCl</sub> au tallage  
**pH<sub>KCl</sub> 3** : pH<sub>KCl</sub> à l'épiaison  
**pH<sub>KCl</sub> 4** : pH<sub>KCl</sub> après récolte

### 2.2.1.3. Conductivité électrique

La conductivité électrique d'un sol est une mesure de la quantité des sels présents et qui pourraient se dissoudre en présence d'eau (CEQ, 2015). La conductivité électrique nous renseigne sur l'état de la salinité du milieu.



**Figure 106.** Effet du traitement sur la conductivité électrique

Avant le semis, la conductivité électrique du sol varie entre 0.1 mS/cm (blocs 5 et 6) et 0.16 mS/cm (bloc 3), la valeur moyenne est de 0.12 mS/cm. L'analyse statistique montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les médianes ( $p = 0.2053$ ).

Au tallage, on remarque une diminution de la conductivité électrique jusqu'à 0.06 mS/cm (bloc 6). Le test statistique nous informe l'absence d'une différence significative entre les médianes des blocs ( $p = 0.3960$ ).

Au stade épiaison de la culture du *Triticum durum*, il y a une certaine augmentation de la conductivité électrique, avec une homogénéité des résultats entre les blocs 3, 4,5 et 6 (0.06 mS/cm). La valeur moyenne est égale à 0.07 mS/cm (figure 106). L'étude statistique montre qu'il n'existe pas de différence significative entre les médianes ( $p = 0.8887$ ).

Après la récolte de la culture, on remarque une diminution des valeurs de la conductivité électrique, elle varie entre 0.05 mS/cm (blocs 6 et témoin) et 0.12 mS/cm (blocs 1), la moyenne est égale à 0.06 mS/cm.

L'analyse des médianes ne montre pas de différence significative entre les traitements des différents blocs ( $p = 0.1753$ ).

Le test des médianes entre les quatre stades de prélèvements renseigne sur l'existence d'une différence significative entre les prélèvements, sauf entre les blocs 3 et 2 et le bloc 4, ainsi que entre stades épiaison et après récolte (tableau 33).

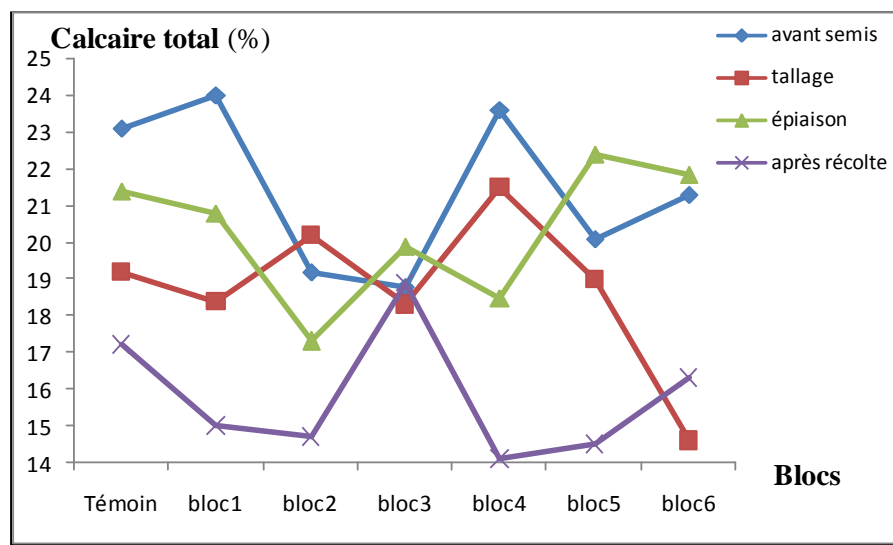
**Tableau 33.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Conductivité Electrique)

	H	P
CE 1	8.474874	0.2053
CE 2	6.247492	0.3960
CE 3	2.313503	0.8887
CE 4	8.968955	0.1753
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
CE 1	34.26256	0.0000
CE 2		
CE 3		
CE 4		

CE 1 : Conductivité électrique avant semis  
 CE 2 : Conductivité électrique au tallage  
 CE 3 : Conductivité électrique à l'épiaison  
 CE 4 : Conductivité électrique après récolte

#### 2.2.1.4. Calcaire total

La présence du calcaire joue un grand rôle dans les équilibres ioniques notamment au niveau des variations du pH. La teneur en calcaire est liée soit à la nature du substrat ou aux différents apports artificiels ou naturels.



**Figure 107.** Effet du traitement sur le calcaire total

On constate une hétérogénéité des taux en calcaire total sur tous les stades (figure 107). Le test de Kruskal-Wallis indique une absence de différence significative entre les traitements appliqués durant ces trois stades : avant semis, tallage et épiaison. L'analyse statistique indique qu'il existe une différence significative entre les 4 stades (tableau 34).

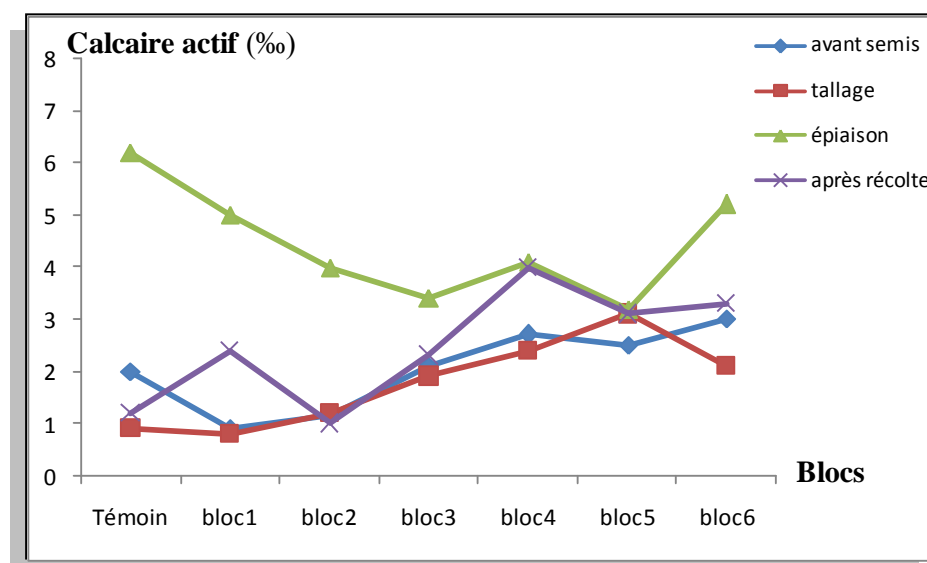
**Tableau 34.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Calcaire Total)

	H	P
CT 1	8.103896	0.2306
CT 2	4.660152	0.5881
CT 3	6.857143	0.33432
CT 4	3.480519	0.7466
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
CT 1	17.83696	0.005
CT 2		
CT 3		
CT 4		

CT 1 : Calcaire total avant semis  
 CT 2 : Calcaire total au tallage  
 CT 3 : Calcaire total à l'épiaison  
 CT 4 : Calcaire total après récolte

### 2.2.1.5. Calcaire actif

Le calcaire actif est déterminé dans les sols lorsque la teneur en calcaire total dépasse 5%, c'est le cas des sites étudiés.



**Figure 108.** Effet du traitement sur le calcaire actif

Sur les sols étudiés, les teneurs en calcaire actif ne dépassent pas 8 ‰ (figure 108). L'étude statistique des médianes montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les doses utilisées. Cependant, il existe une différence entre les 4 périodes, mais le prélèvement 2 est différent aux stades 1 et 4 (tableau 35).

La diminution du calcaire actif est due à la solubilisation du calcaire total dans la solution du sol. Ces teneurs en calcaire actif sont faibles. Ce qui nous permet de dire que nos sols sont favorables aux cultures vis-à-vis du calcaire actif.

**Tableau 35.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Calcaire Actif)

	<b>H</b>	<b>P</b>
<b>CA 1</b>	11.64716	0.0703
<b>CA 2</b>	6.380581	0.3819
<b>CA 3</b>	4.793568	0.5705
<b>CA 4</b>	14.31373	0.0263
<b>Comparaison entre prélèvements</b>		
<b>CA 1</b>	32.46496	0.000
<b>CA 2</b>		
<b>CA 3</b>		
<b>CA 4</b>		

**CA 1 :** Calcaire actif avant semis

**CA 2 :** Calcaire actif au tallage

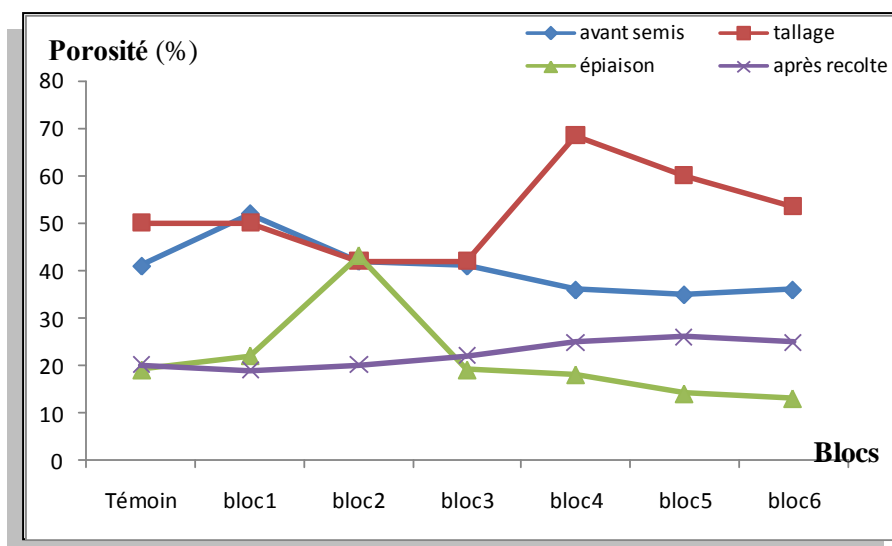
**CA 3 :** Calcaire actif à l'épiaison

**CA 4 :** Calcaire actif après récolte

### 2.2.1.6. Porosité

L'état d'aération du sol est indiqué par le taux de la porosité, ce paramètre physique est sous l'influence des saisons et la texture des sols.

Les teneurs de la porosité obtenues ne dépassent pas 70 % pour tous les stades (figure 109). Le test de Kruskal-Wallis montre une absence de différence significative entre les traitements utilisés durant les stades avant semis, épiaison et après récolte, alors qu'elle existe entre les blocs 2 et 4 et entre ce dernier et le bloc 3 au tallage (tableau 36). Pour une comparaison entre les prélèvements, le test des médianes montre qu'il y a des différences significatives entre les stades étudiés ( $p = 0.0000$ ).



**Figure 109.** Effet du traitement sur la porosité

**Tableau 36.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Porosité)

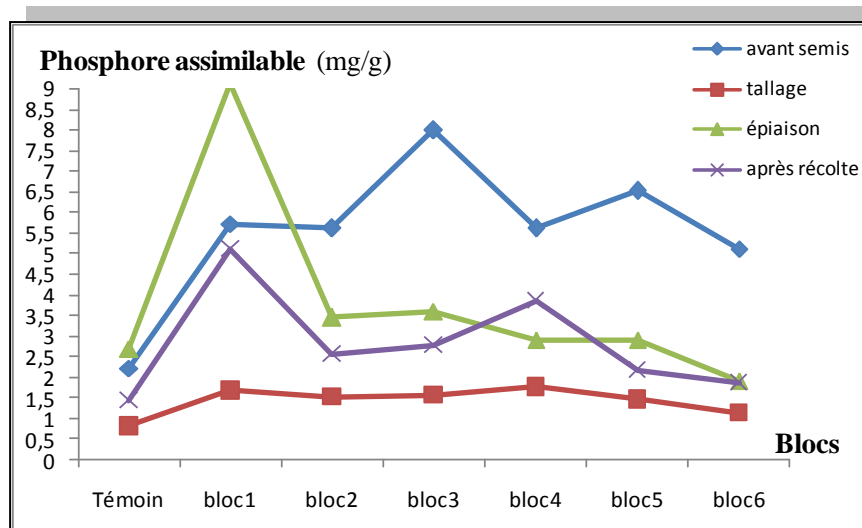
	H	P
<b>PO 1</b>	5.246833	0.5126
<b>PO 2</b>	18.28237	0.0056
<b>PO 3</b>	2.583878	0.8590
<b>PO 4</b>	2.513590	0.8669
<b>Comparaison entre prélèvements</b>		
<b>PO 1</b>	54.78062	0.0000
<b>PO 2</b>		
<b>PO 3</b>		
<b>PO 4</b>		

**PO 1** : Porosité avant semis  
**PO 2** : Porosité au tallage  
**PO 3** : Porosité à l'épiaison  
**PO 4** : Porosité après récolte

### 2.2.1.7. Phosphore assimilable du sol

Plusieurs méthodes chimiques sont utilisées pour le dosage du phosphore assimilable dans le sol. Par exemple la méthode Dyer où le phosphore est extraite par solubilisation dans une solution d'acide citrique monohydraté à 20 g/l. Cette méthode ne s'applique pas à des sols contenant plus de 20 g/kg de calcaire total; mais pour notre cas, nous avons utilisé la méthode Joret-Hébert, le phosphore est extrait par solubilisation dans une solution d'oxalate d'ammonium à 0,1 mol/l (norme NF X31-161, Afnor, 1999). Cette méthode est appliquée dans une large gamme de pH des sols.





**Figure 110.** Effet du traitement sur le phosphore assimilable

Avant le semis, la teneur du sol en phosphore assimilable varie entre 2.22 mg/g (bloc témoin) et 7.98 mg/g (bloc 3), la moyenne de tous les blocs est de 5.53 mg/g. L'analyse statistique révèle une absence de différence significative entre les traitements ( $p = 0.0624$ ).

Au tallage, une diminution importante de la teneur du sol en phosphore assimilable par rapport à la période précédente, la valeur maximale est de l'ordre de 1.77 mg/g MS enregistrée au bloc 4, le témoin présente le plus faible résultat 0.82 mg/g MS. Le test statistique révèle une différence très hautement significative entre le traitement 4 et le témoin ( $p = 0.0327$ ).

Au stade épiaison, on remarque une légère augmentation de la teneur du sol en phosphore assimilable par rapport au tallage, elle atteint 9.11 mg/g (bloc 1) comme valeur maximale (figure 110). L'analyse de Kruskal-Wallis révèle une différence hautement significative entre les doses 1 et 6.

Après la récolte de la culture, on observe encore une diminution de la teneur du sol en phosphore assimilable, elle varie entre 1.88 mg/g (bloc 6) et 5.1 mg/g (bloc 1). Le bloc témoin présente de très faibles teneurs par rapport aux blocs traités 0.44 mg/g (figure 110). L'analyse statistique confirme cette différence hautement significative entre le traitement 1 et le témoin.

Durant tout le cycle de la culture, on remarque d'après le test des médianes et de comparaison entre les prélèvements qu'il existe une différence très hautement significative entre les deux stades avant semis et épiaison (tableau 37) et entre ce dernier et après récolte où  $p = 0.0000$  (tableau 37).

**Tableau 37.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Phosphore Assimilable)

	H	P
<b>Phos 1</b>	11.98093	0.0624
<b>Phos 2</b>	13.73619	0.0327
<b>Phos 3</b>	15.83442	0.0147
<b>Phos 4</b>	19.29004	0.0037
<b>Comparaison entre prélèvements</b>		
<b>Phos 1</b>		
<b>Phos 2</b>	49.92207	0.0000
<b>Phos 3</b>		
<b>Phos 4</b>		

**Phos 1 :** Phosphore assimilable avant semis

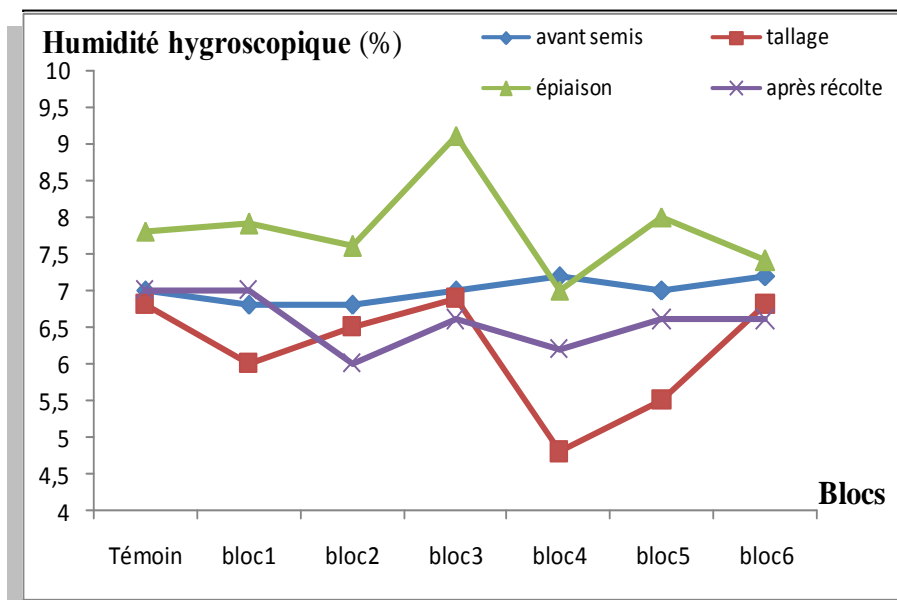
**Phos 2 :** Phosphore assimilable au tallage

**Phos 3 :** Phosphore assimilable à l'épiaison

**Phos 4 :** Phosphore assimilable après récolte

### 2.2.1.8. Humidité hygroscopique

En général, l'humidité hygroscopique est directement proportionnelle aux taux d'argile et matière organique. Pour un échantillon argileux, une humidité hygroscopique supérieure à 8% peut être l'indice d'un séchage imparfait (Baize, 2000 & Ketif *et al.*, 2015).



**Figure 111.** Effet du traitement sur l'humidité hygroscopique

Avant le semis de la culture, les teneurs en humidité hygroscopique du sol montrent une homogénéité pour tous les traitements et les valeurs ne dépassent pas 7,5 %. L'analyse statistique confirme cet état par un  $p = 0.7527$ .

Au tallage, les valeurs en humidité hygroscopique du sol varient entre 4.8 % (bloc 4) et 6.9 % (bloc 3), la moyenne globale de tous les blocs est de 6.18 % (figure 111). L'analyse statistique de la variance montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les médianes de l'humidité hygroscopique du sol des différents blocs de l'expérimentation ( $p = 0.9631$ ). A l'épiaison, le test de Kruskal-Wallis indique les mêmes résultats avec un  $p = 0.9664$  (tableau 38). Après la récolte de la culture du *Triticum durum*, le même test des médianes informe sur l'absence d'une différence significative entre les doses de phosphore appliquées. Au cours du cycle de la culture du *Triticum durum*, l'humidité hygroscopique du sol diffère d'un prélèvement à un autre, et le test de Kruskal-Wallis le confirme avec un  $p = 0.0075$  (tableau 38). En revanche, il n'y a pas de différence significative entre les stades 1 et 2, 1 et 4, 4 et 2.

**Tableau 38.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Humidité Hygroscopique)

	<b>H</b>	<b>P</b>
<b>HG 1</b>	3.435419	0.7525
<b>HG 2</b>	1.444735	0.9631
<b>HG 3</b>	1.391417	0.9664
<b>HG 4</b>	8.264901	0.2193
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
<b>HG 1</b>	11.95463	0.0075
<b>HG 2</b>		
<b>HG 3</b>		
<b>HG 4</b>		

**HG 1** : Humidité hygroscopique avant semis

**HG 2** : Humidité hygroscopique au tallage

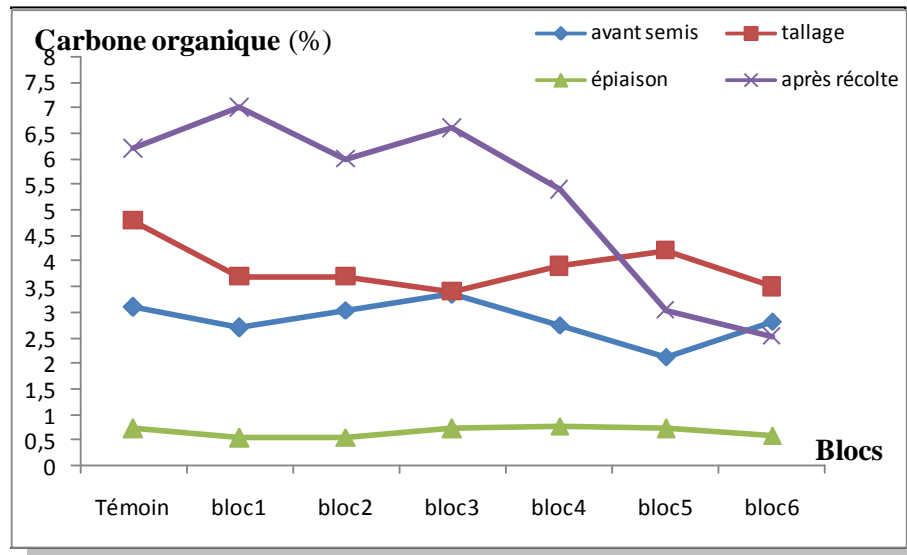
**HG 3** : Humidité hygroscopique à l'épiaison

**HG 4** : Humidité hygroscopique après récolte

### 2.2.1.9. Carbone organique

Le Référentiel pédologique (Baise *et al.*, 2008) distingue trois grandes catégories d'horizons selon la proportion de la matière organique et minérale. Est qualifié «d'holorganique», un horizon entièrement constitué de matières organiques, humifiées ou non ; deux seuils analytiques sont proposés ; plus de 30g/100g de carbone organique en pondéral, par la méthode Anne, ou bien une perte à feu à 600° C supérieur à 50g/100g. Est dit «hémi-organique» un horizon non «holorganique» comportant plus de

8g/100g de carbone organique dosé par la méthode Anne. Un horizon organo-minérale est constitué d'un mélange de matière organique et minérale avec des teneurs en carbone organique inférieures à 8g/100g (Baize, 2000).



**Figure 112.** Effet du traitement sur le carbone organique

Concernant les valeurs du carbone organique, les teneurs ne dépassent pas 3,5 %. Le deuxième stade de prélèvement présente une légère augmentation de ces teneurs remarquables surtout par le bloc témoin (4,8%). Une chute des taux du carbone est bien déterminée à l'épiaison qui varie entre 0.54% (bloc1) et 0,77% (bloc 4).

Après récolte, les valeurs du carbone sont plus élevées par rapport aux autres périodes (figure 112). Le test de médiane indique une absence de différence significative entre les doses. Le test statistique montre qu'il existe une différence très hautement significative entre les stades de prélèvements sauf le 2 et 4 (tableau 39).

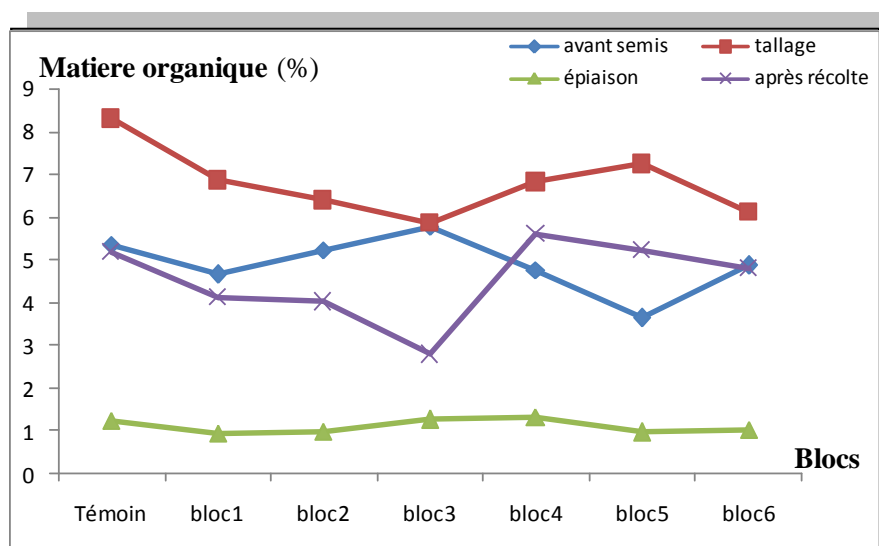
**Tableau 39.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Carbone Organique)

	H	P
CO1	2.846004	0.8279
CO 2	8.864230	0.1814
CO 3	1.649306	0.9490
CO 4	12.12598	0.0592
<b>Comparaison entre prélèvements</b>		
CO1	60.77232	0.000
CO2		
CO3		
CO4		

**CO1** : Carbone organique avant semis  
**CO2** : Carbone organique au tallage  
**CO3** : Carbone organique à l'épiaison  
**CO4** : Carbone organique après récolte

### 2.2.1.10. Matière organique

La matière organique est un indicateur important qui reflète largement la qualité du sol. Le pourcentage de matière organique est un élément très sensible par rapport aux techniques de travail du sol (Mielniczuk, 1999). De même, la plus part des propriétés du sol et de l'agrosystème sont très liées à la matière organique, on note ainsi l'importance de la formation des agrégats qui implique la structure, la régulation du régime hydrique, thermique et de l'aération (Achkar, 2005). Dans le cas de notre sol, la matière organique a été estimée à partir de l'évaluation du carbone organique par la méthode d'Anne.



**Figure 113.** Effet du traitement sur le carbone organique

Avant le semis, la teneur de la matière organique du sol varie en médiane de 3.64 % (bloc 5) à 5,76 % (bloc 3), cette valeur est plus importante que celle du témoin 5,34%. L'analyse statistique ne montre aucune différence significative entre ces résultats ( $p = 0.8279$ ). Au tallage, on observe une augmentation de la teneur en matière organique du sol par rapport au stade avant semis; parmi les blocs traités, le bloc 5 montre un taux de 7,24 %, par contre le témoin présente la plus haute valeur 8,29%. Le test des médianes ne montre aucune différence significative entre les traitements ( $p = 0.2029$ ). Les valeurs de la matière organique à l'épiaison sont moins importantes par rapport aux stades précédents. Le test de Kruskal-Wallis n'indique aucune différence significative entre les doses du phosphore ( $p = 0.8348$ ). Après la récolte, les taux de la matière organique deviennent plus importants qu'à la période précédente

(figure113). L'étude statistique renseigne sur une différence hautement significative entre les 4 prélèvements ( $p = 0.0000$ ), sauf entre le 1 et 4 (tableau 40).

**Tableau 40.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Matière Organique)

	H	P
MO1	2.846004	0.8279
MO 2	8.512486	0.2029
MO 3	2.788983	0.8348
MO 4	2.847854	0.8277
<b>Comparaison entre prélèvements</b>		
MO1	61.23843	0.0000
MO2		
MO3		
MO4		

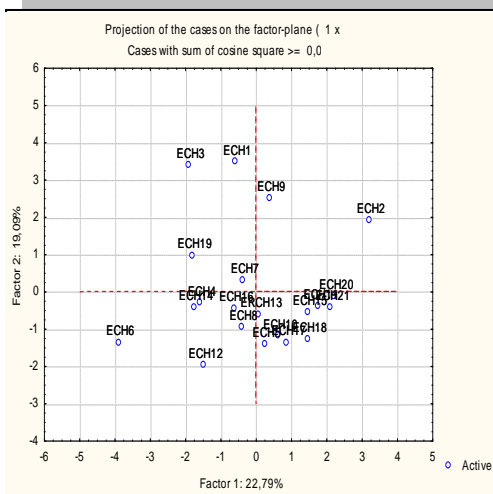
**MO1** : Matière organique avant semis

**MO2** : Matière organique au tallage

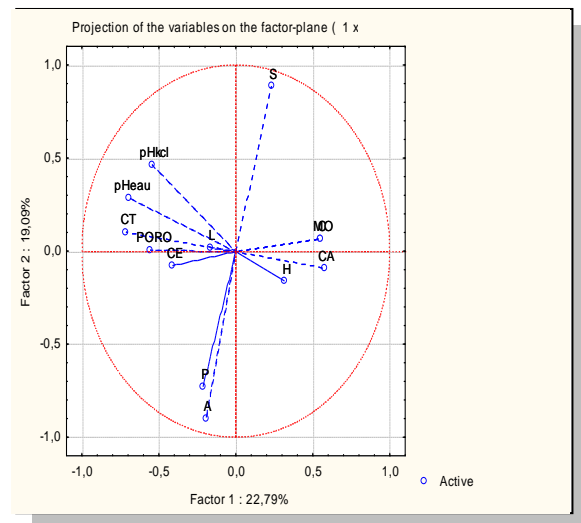
**MO3** : Matière organique à l'épiaison

**MO4** : Matière organique après récolte

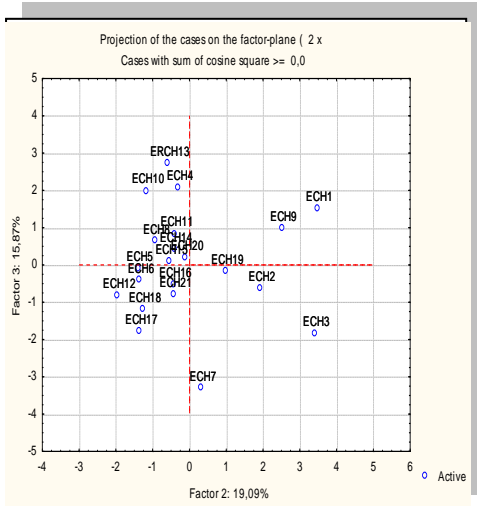
**a) - Analyse en composantes principales (avant semis)**



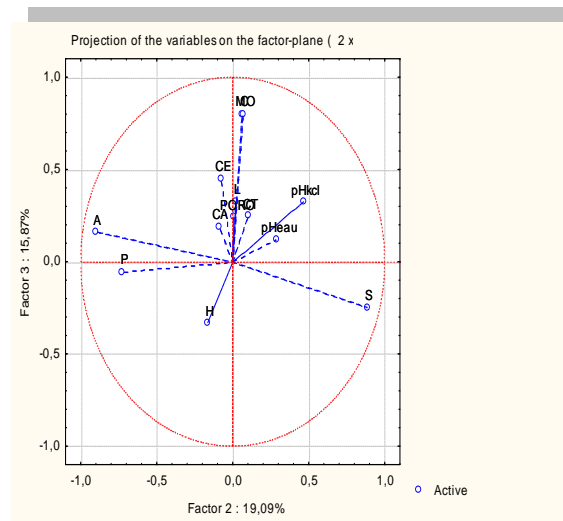
**Figure 114.** Projection des cases des facteurs 1 et 2



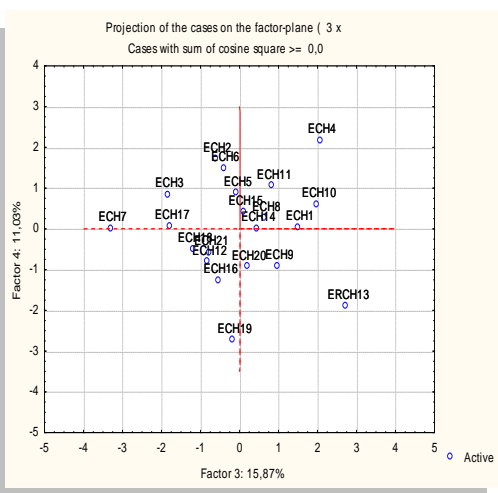
**Figure 115.** Analyse en composantes principales



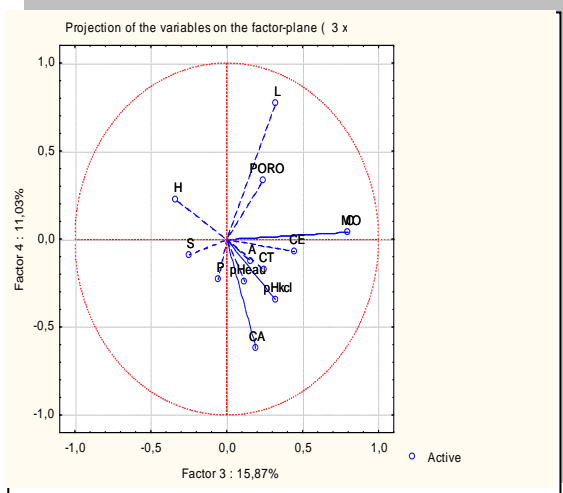
**Figure 116.** Projection des cases des facteurs 2 et 3



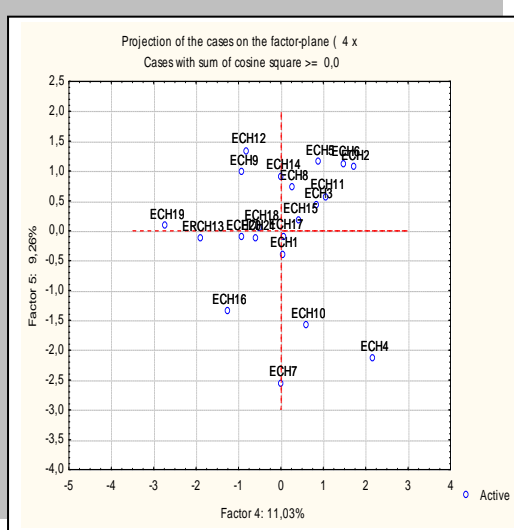
**Figure 117.** Analyse en composantes principales



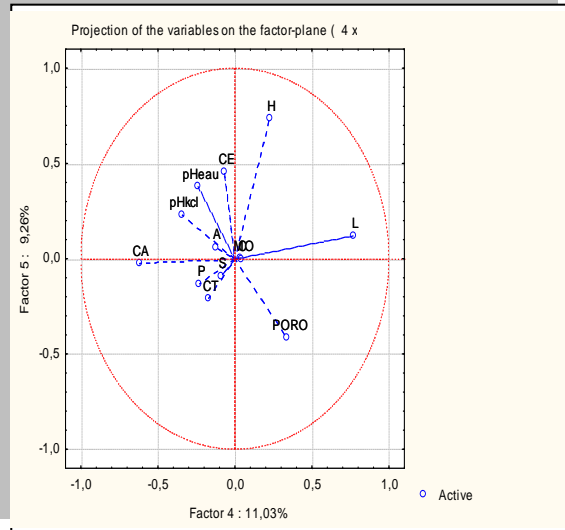
**Figure 118.** Projection des cases des facteurs 3 et 4



**Figure 119.** Analyse en composantes principales

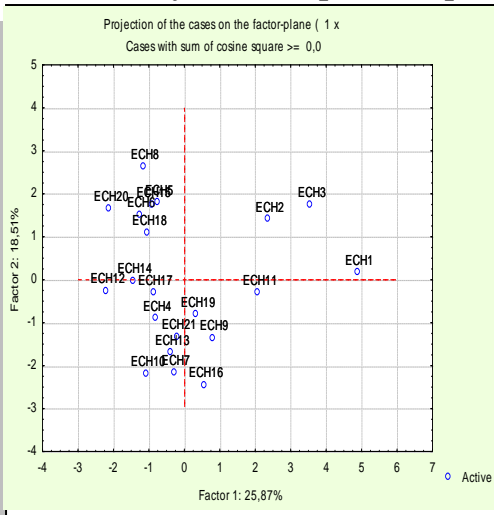


**Figure 120.** Projection des cases des facteurs 4 et 5

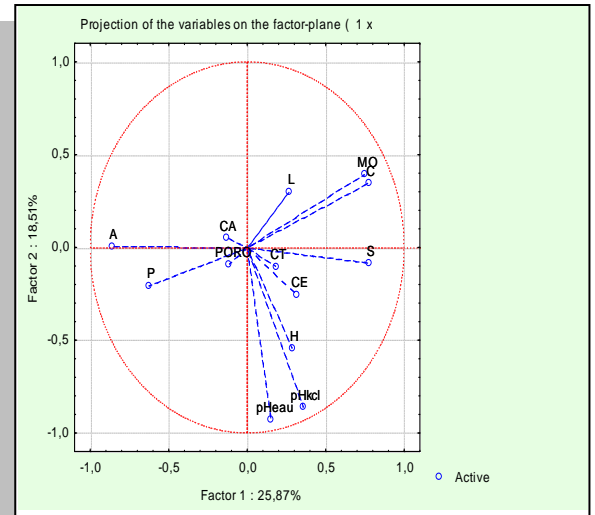


**Figure 121.** Analyse en composantes principales

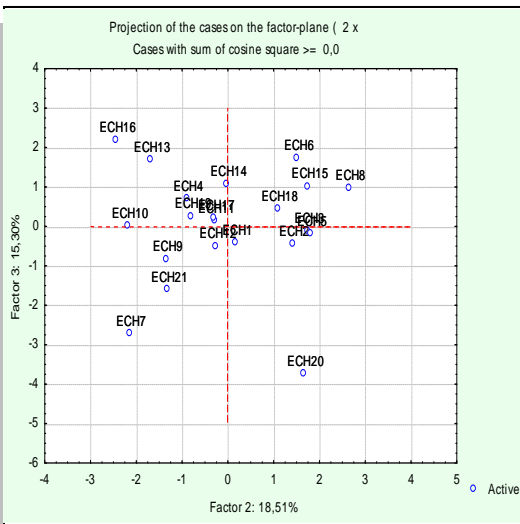
**d) -Analyse en composantes principales (tallage)**



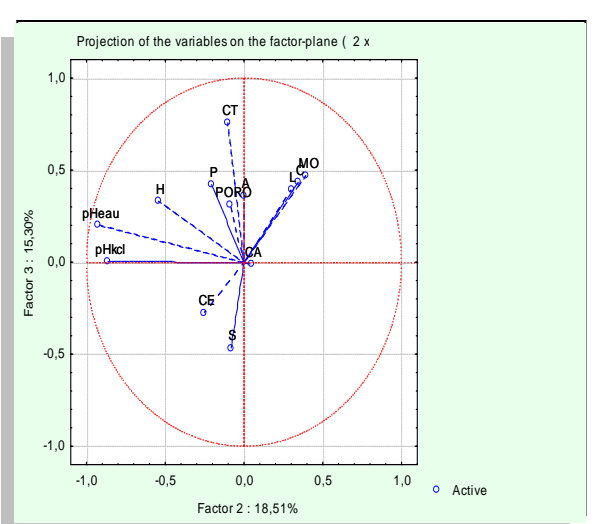
**Figure 122.** Projection des cases des facteurs 1 et 2



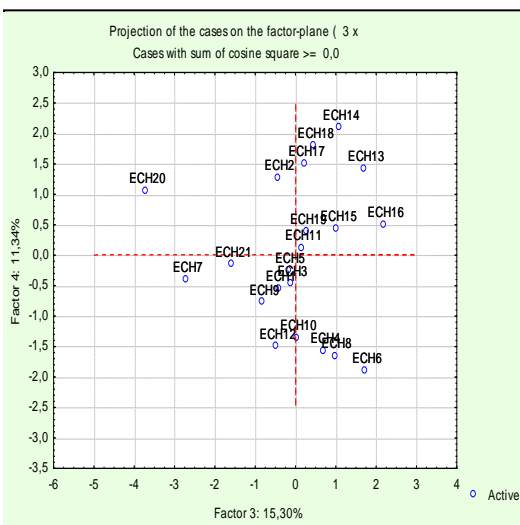
**Figure 123.** Analyse en composantes principales



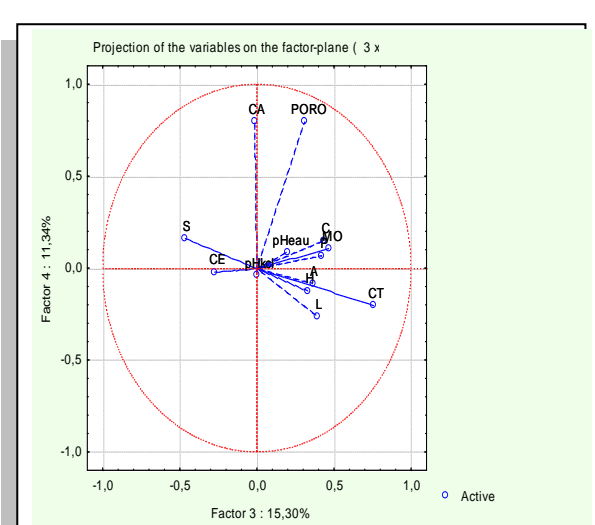
**Figure 124.** Projection des cases des facteurs 2 et 3



**Figure 125.** Analyse en composantes principales

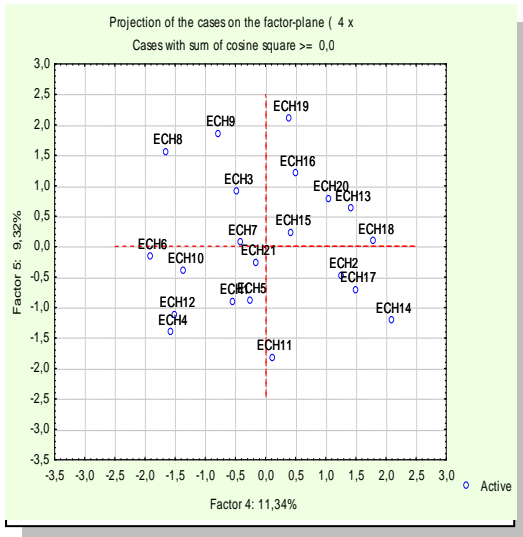


**Figure 126.** Projection des cases des facteurs 3 et 4

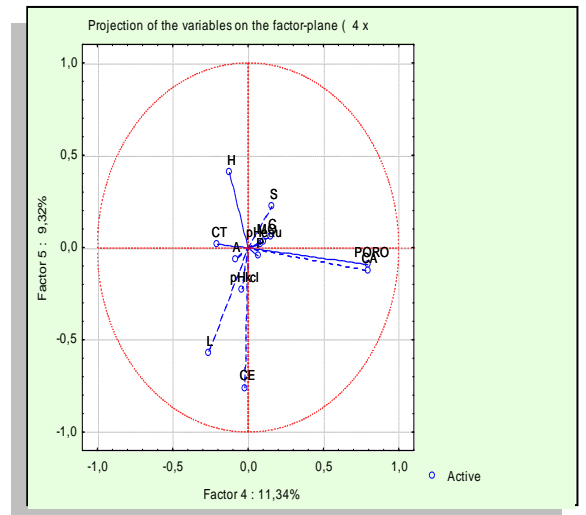


**Figure 127.** Analyse en composantes principales



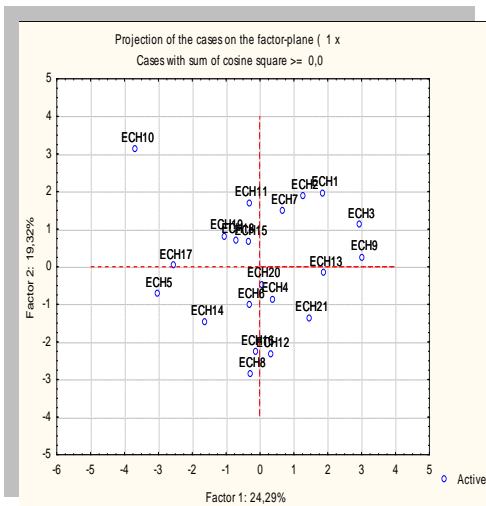


**Figure 128.** Projection des cases des facteurs 4 et 5

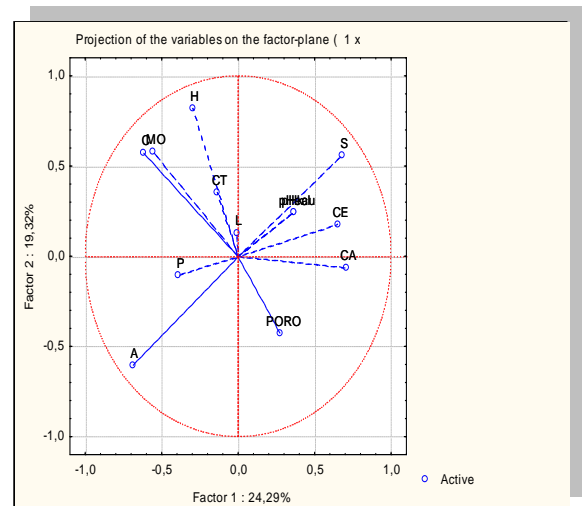


**Figure 129.** Analyse en composantes principales

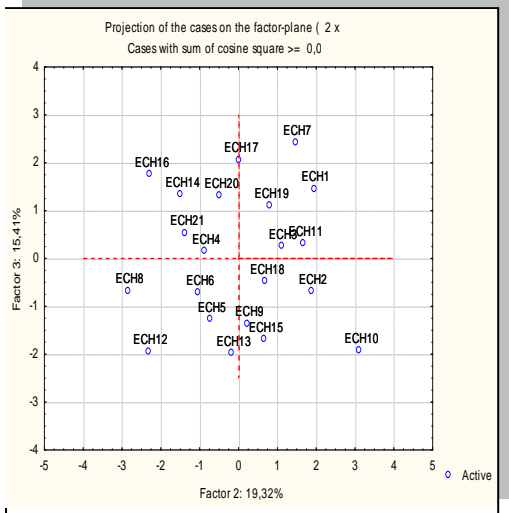
**c)- Analyse en composantes principales (épiaison)**



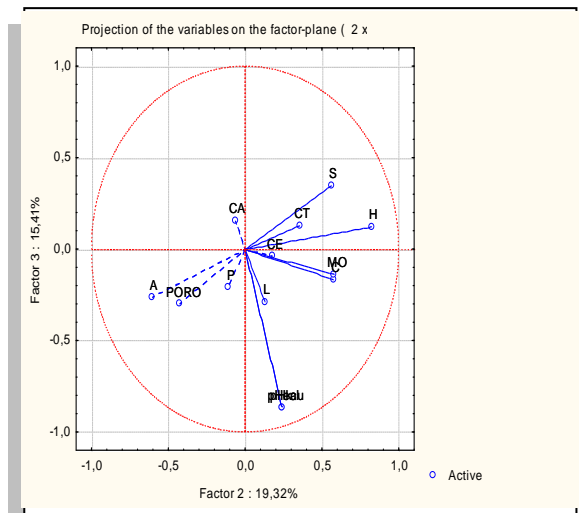
**Figure 130.** Projection des cases des facteurs 1 et 2



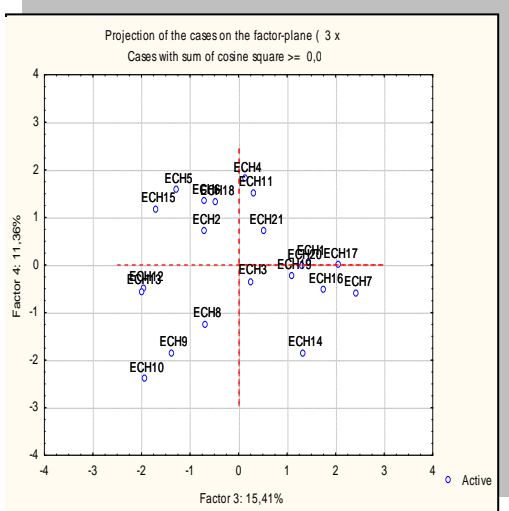
**Figure 131.** Analyse en composantes principales



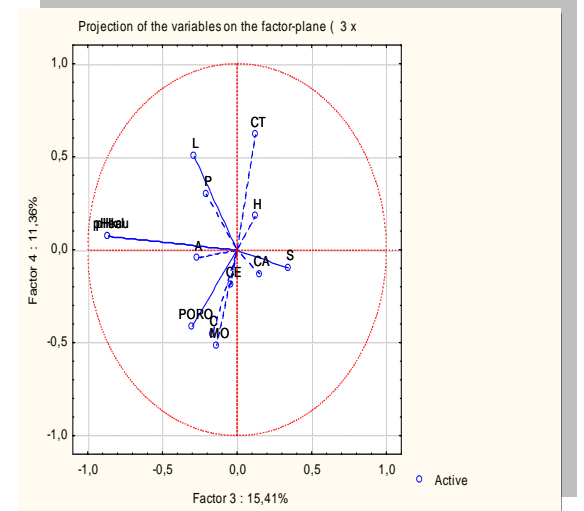
**Figure 132.** Projection des cases des facteurs 2 et 3



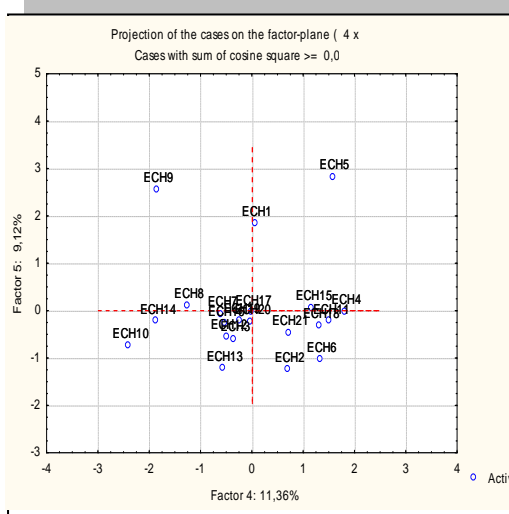
**Figure 133.** Analyse en composantes principales



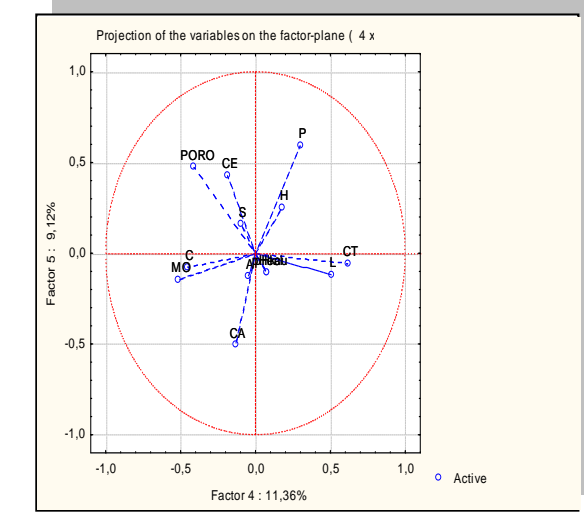
**Figure 134.** Projection des cases des facteurs 3 et 4



**Figure 135.** Analyse en composantes principales



**Figure 136.** Projection des cases des facteurs 4 et 5



**Figure 137.** Analyse en composantes principales

e) -Analyse en composantes principales (après récolte)

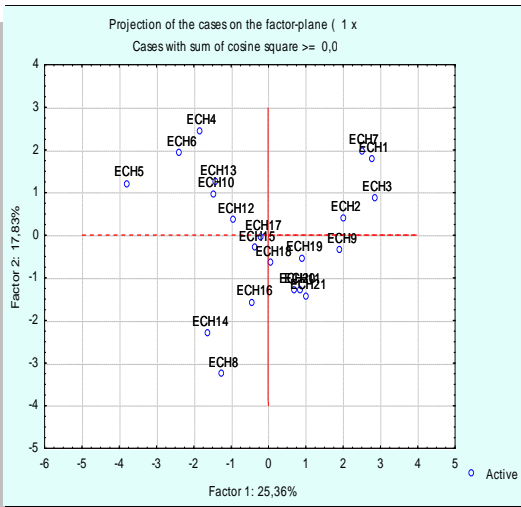


Figure 138. Projection des cases des facteurs 1 et 2

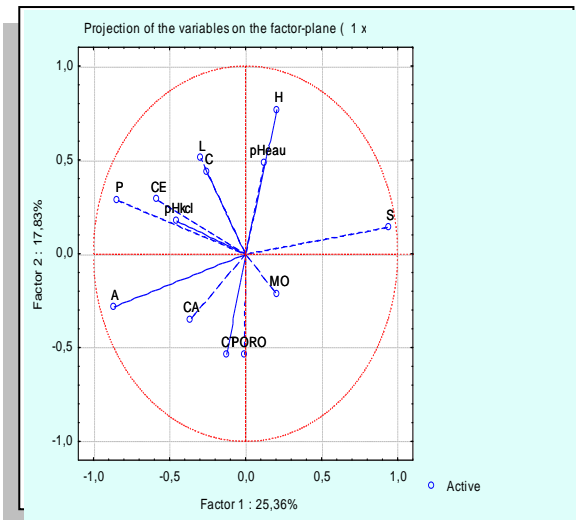


Figure 139. Analyse en composantes principales

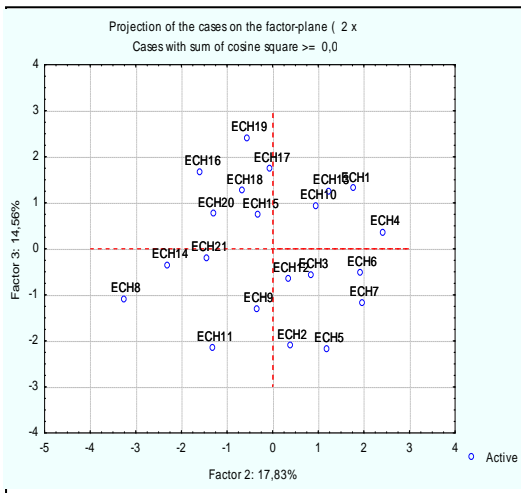


Figure 140. Projection des cases des facteurs 2 et 3

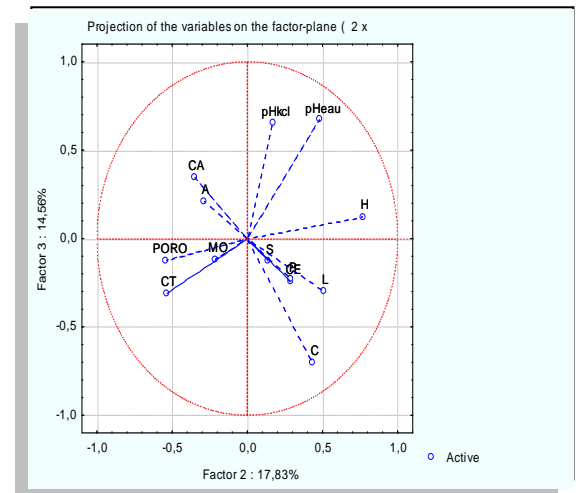


Figure 141. Analyse en composantes principales

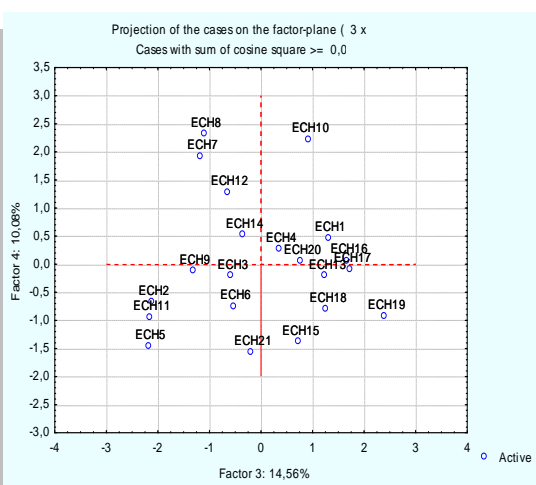


Figure 142. Projection des cases des facteurs 3 et 4

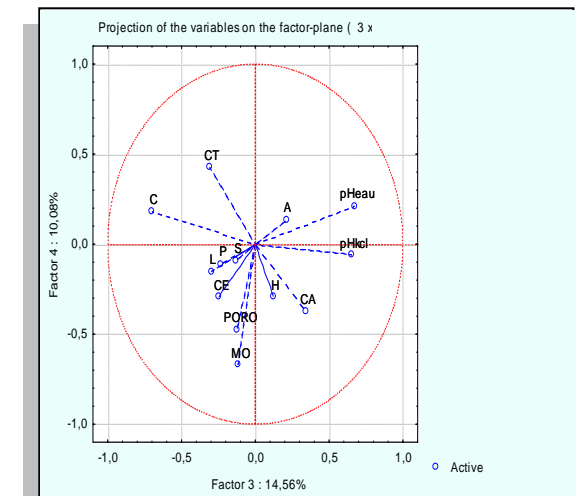
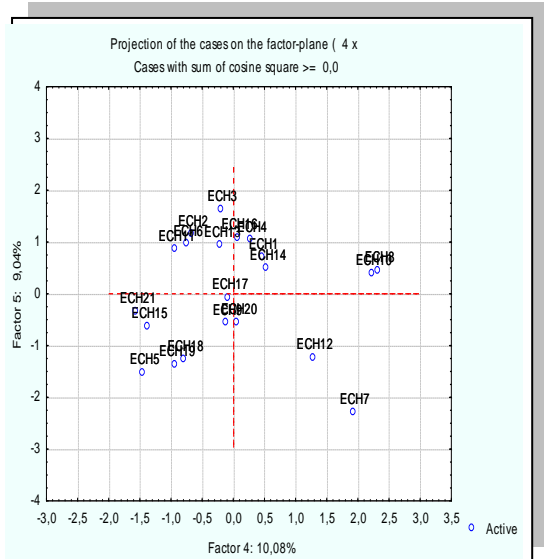
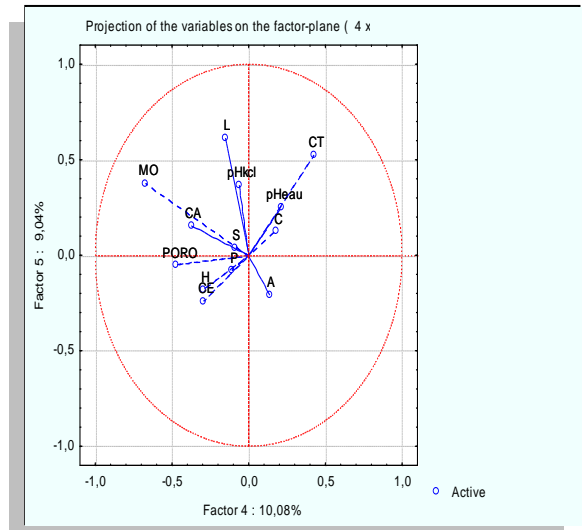


Figure 143. Analyse en composantes principales



**Figure 144.** Projection des cases des facteurs 4 et 5



**Figure 145.** Analyse en composantes principales

L'illustration de la figure 115 montre que les paramètres  $pH_{eau}$ ,  $pH_{KCl}$ , porosité, conductivité électrique et limons projetés sur le premier axe (22,79 %) sont corrélés positivement, alors que la corrélation entre sables et argiles est négative. Sur le deuxième axe (19,09%), le  $pH_{eau}$  et  $pH_{KCl}$  sont corrélés négativement avec le phosphore assimilable, et ce dernier positivement avec l'humidité et les argiles. La même remarque est observée sur le troisième axe (15,87%). Alors qu'au niveau du quatrième axe (11,03%), le calcaire actif et limons sont corrélés négativement, la même relation existe entre la porosité et l'ensemble des paramètres ( $pH_{eau}$ ,  $pH_{KCl}$  et conductivité électrique). Les figures 114, 116, 118 et 120 illustrent que le bloc témoin est caractéristique, ainsi que les blocs 2 et 3.

Pendant le stade tallage, sur le premier axe (25,87%) les paramètres  $pH_{eau}$ , humidité, conductivité électrique, calcaire total, matière organique, carbone, limons et sables sont corrélés positivement contrairement au phosphore assimilable qui est en opposition avec la matière organique et le carbone. Sur le deuxième axe, il ressort que le carbone et la matière organique sont en corrélation négative avec la conductivité électrique. La même remarque est observée au troisième axe (15,30%). Sur le dernier axe (11,34%), on note une corrélation négative entre la porosité, le calcaire actif et le calcaire total. Les parcelles des blocs 1, 3 et 7 sont éloignées des axes.

A l'épiaison, sur le premier axe (24,29%), la porosité est en corrélation négative avec l'humidité ; le même type de corrélation entre le phosphore et le pH est observé. Le deuxième axe (19,32%), le troisième axe (15,41%) et le quatrième axe (11,36%) indiquent que le phosphore assimilable est en opposition avec le calcaire total et la conductivité électrique. Le cinquième axe montre que l'ensemble des paramètres porosité, conductivité électrique, sables, argiles, calcaire actif, matière et carbone

organique sont corrélés positivement. A la lumière des figures 130, 132, 134 et 136, on peut dire que les blocs les plus caractéristiques sont les blocs témoin, 3 et 4.

L'analyse en composantes principales sur le premier axe après récolte (25.36%) fait ressortir qu'il existe une corrélation positive entre l'ensemble des paramètres suivants : porosité, calcaire total et actif, l'argile, phosphore assimilable, conductivité électrique,  $\text{pH}_{\text{KCl}}$ , limon et carbone. Alors qu'elle est négative entre l'humidité et le calcaire. Le résultat est identique au niveau du deuxième axe de projection (17.83%), sur le troisième axe (14.56%), la corrélation est négative entre pH et l'ensemble : conductivité électrique, porosité, matière organique et phosphore assimilable. Ainsi, le calcaire total et l'ensemble humidité, conductivité électrique sont corrélés négativement. Les blocs 1 et 2 sont caractéristiques (figures : 138, 140, 142 et 144).

La texture d'un sol influence toutes les autres propriétés physiques du sol, y compris le drainage, la capacité de rétention, la température, l'aération et la structure. Selon Buckman (1990), en sols acides, le fer, l'aluminium et le manganèse ont une activité intense et rendent le phosphore insoluble, et par conséquent inassimilable par les plantes. Le degré de l'insolubilisation dépend de la richesse du sol en calcaire. Plusieurs chercheurs estiment que c'est à des pH voisins de la neutralité que le phosphore est le plus soluble. Gervy (1970), souligne qu'à pH égal à 7, il existe une proportion à peu près équivalente d'ions  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  et d'ions  $\text{HPO}_4^{2-}$ , alors que l'ion  $\text{PO}_4^{3-}$  n'apparaît qu'à  $\text{pH} > 11$ . Le pH optimum pour l'assimilation du phosphore se situe au voisinage de la neutralité. Les formes dissoutes dans la solution du sol sont facilement utilisables par les plantes, c'est le cas du  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  et  $\text{HPO}_4^{2-}$  (Gervy, 1970 & Comifier, 2002).

Selon Cambell (1994), une certaine humidité est toujours nécessaire pour l'absorption des ions phosphatés par les plantes car la dessiccation diminue la solubilité des phosphates.

Le calcaire actif, à faible concentration joue un rôle protecteur vis-à-vis des ions phosphoriques contre leur adsorption énergétique par le fer et l'aluminium libres. A des concentrations élevées, il y a formation de phosphates calciques de moins en moins solubles qui peuvent évoluer vers une forme insoluble ou apatitique. Ainsi le rapport calcaire actif / calcaire total s'il est supérieur à 1/4 aura des répercussions négatives sur la nutrition phosphatée de la plante (Duthil, 1973).

Selon Gachon (1969), le pouvoir fixateur est l'énergie avec laquelle les constituants du sol fixent les ions phosphoriques. Cette énergie est fonction de la quantité et de la nature des argiles. Le pouvoir fixateur du sol est proportionnel au taux de matière organique, d'argile, de calcaire et du pH. Plus le pouvoir fixateur est élevé et moins le sol est riche en phosphore assimilable, plus il faudrait majorer la

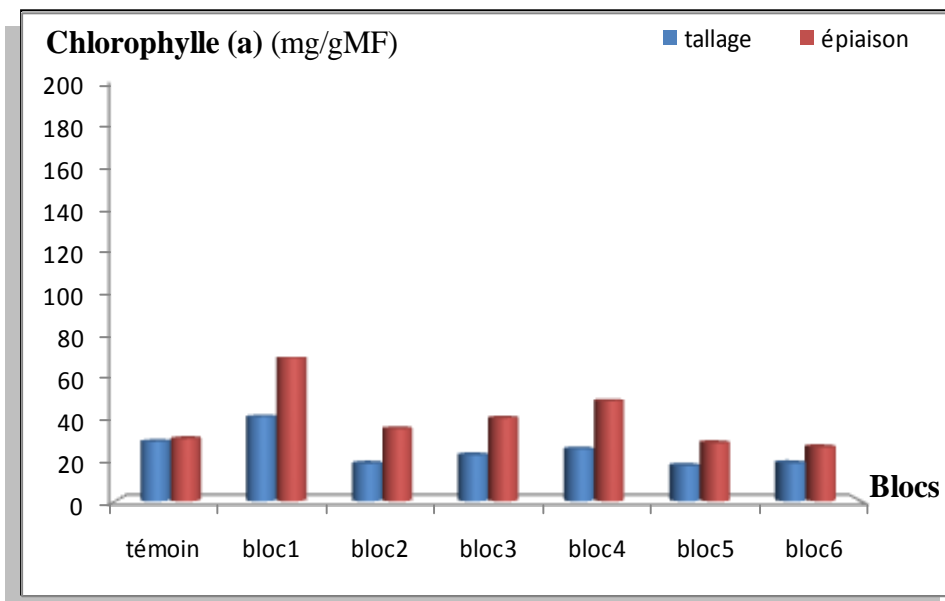
dose de phosphore à apporter en fertilisation (Soins *et al.*, 1999). La teneur en phosphore d'un sol croît avec la finesse de la texture, l'argile en contient plus que les sables (Baeyens, 1967).

La matière organique constitue une source appréciable d'ions phosphoriques pour la plante. Elle représente une réserve non négligeable de phosphates adsorbés sur les sites humiques vis-à-vis desquelles, elles ont un effet protecteur (Duthil, 1976 & Tribou, 1988).

## 2.2.2. Caractéristiques physiobiochimiques de la plante

### 2.2.2.1. Chlorophylle (a)

Au tallage, la teneur de la plante de blé dur en chlorophylle (a) oscille entre 17.1 mg/g MF (bloc 5) et 40.71 mg/g MF (bloc 1). L'analyse statistique confirme une différence significative entre ces deux traitements ( $p = 0.0040$ ). A l'épiaison, la teneur de la plante de blé dur en chlorophylle (a), augmente par rapport au tallage (figure 146), mais cette fois-ci le test de médiane confirme la différence significative entre les traitements 1 et 6 ( $p = 0.0041$ ). Le test de Kruskal-Wallis indique une différence très hautement significative entre les deux stades de prélèvement (tableau 41).



**Figure 146.** Effet du traitement sur la teneur en chlorophylle (a)

**Tableau 41.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Chlorophylle a)

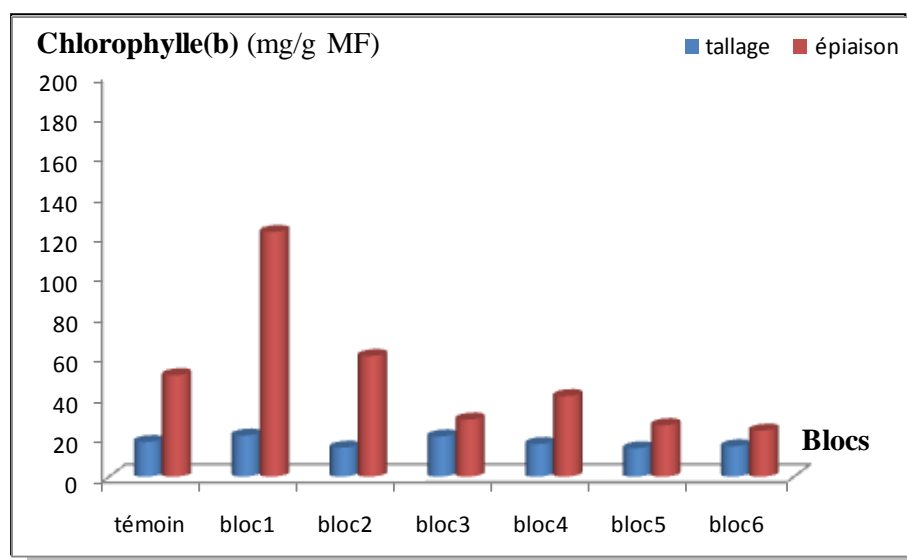
	<b>H</b>	<b>P</b>
<b>Chl (a) 1</b>	19.08225	0.0040
<b>Chl (a) 2</b>	19.03030	0.0041
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
<b>Chl (a) 1</b>		
<b>Chl (a) 2</b>	17.33286	0.000

**Chl (a) 1 :** Chlorophylle (a) au tallage

**Chl (a) 2:** Chlorophylle (a) à l'épiaison

### 2.2.2.2. Chlorophylle (b)

Au tallage, la teneur de la plante de blé dur en chlorophylle (b) varie de 14.1 mg/g MF (bloc 5) à 20.44 ug/g MF (bloc 1), le témoin présente une teneur non négligeable par rapport aux traitements (17.21mg/g MF). L'analyse de la variance confirme qu'il existe une différence très hautement significative entre les médianes des blocs 1 et 5 ( $p = 0.0497$ ). A l'épiaison, on observe que la teneur de la plante du blé dur en chlorophylle (b) s'étale entre 26.2 mg/g MF (bloc 6) et 69.2 mg/g MF (bloc 1) (figure 147). L'analyse statistique confirme cette différence très hautement significative entre les médianes des blocs 1 et 6 ( $p = 0.00178$ ). A la lumière du test de Kruskal-Wallis, on note une différence très hautement significative entre les deux stades de prélèvements où  $p = 0.000$  (tableau 42).



**Figure 147.** Effet du traitement sur la teneur en chlorophylle (b)

**Tableau 42.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Chlorophylle b)

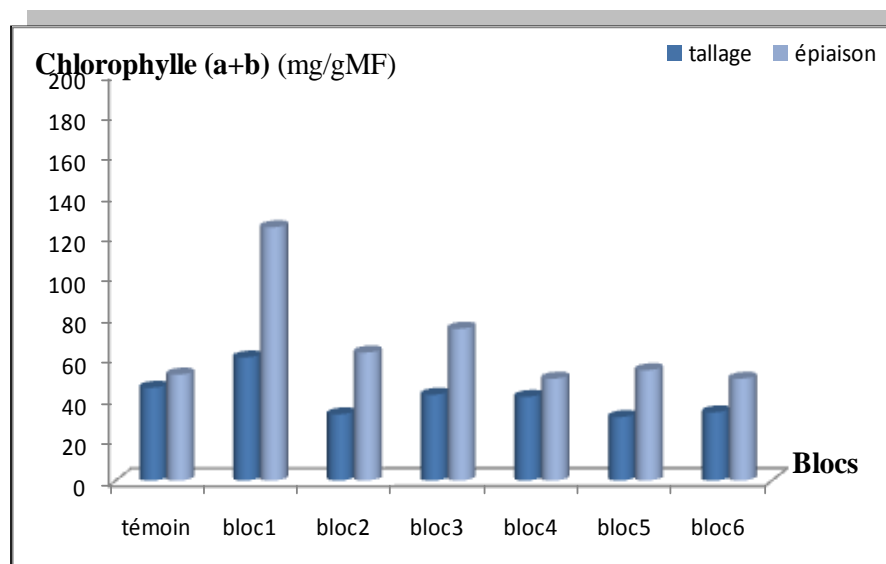
	H	P
<b>Chl (b) 1</b>	12.60992	0.0497
<b>Chl (b) 2</b>	15.33030	0.0178
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
<b>Chl (b) 1</b>		
<b>Chl (b) 2</b>	29.94078	0.0000

**Chl (b) 1 :** Chlorophylle (b) au tallage

**Chl (b) 2:** Chlorophylle (b) à l'épiaison

### 2.2.2.3. Chlorophylle (a+b)

Durant le tallage, la teneur de la plante de blé dur en chlorophylle (a+b) varie de 31.2 mg/g MF (bloc 5) à 60.56 mg/g MF (bloc 1). Le test statistique confirme cette différence de teneurs qui est très hautement significative entre les traitements 1 et 5. Au stade épiaison, les teneurs de la chlorophylle (a+b) augmentent jusqu'à 124,6 mg/g MF au bloc 1 (figure 148). Les statistiques révèlent une différence très hautement significative entre les médianes des deux blocs 6 et 1. Il existe une différence très hautement significative entre les stades phénotypiques tallage et épiaison où le  $p = 0.0000$  (tableau 43).



**Figure 148.** Effet du traitement sur la teneur en chlorophylle (a+ b)



**Tableau 43.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Chlorophylle a+b)

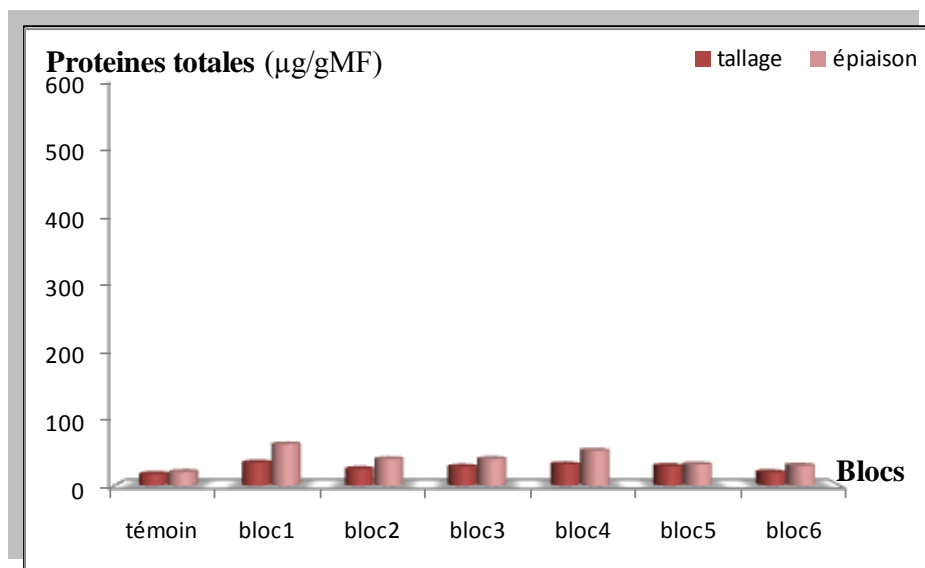
	H	P
<b>Chl (a+b) 1</b>	17.41991	0.0079
<b>Chl (a+b) 2</b>	14.80711	0.218
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
<b>Chl (a+b) 1</b>		
<b>Chl (a+b) 2</b>	21.31163	0.0000

**Chl (a+b) 1** : Chlorophylle (a+b) au tallage

**Chl (a+b) 2** : Chlorophylle (a+b) à l'épiaison

#### 2.2.2.4. Protéines totales

Une variation des teneurs en protéines totales entre le bloc 1 et le témoin durant les deux stades de prélèvements. L'analyse statistique confirme une différence significative entre les deux blocs typiques (figure 149). Une différence hautement significative entre les deux stades est déterminée par le test de Kruskal-Wallis (tableau 44).



**Figure 149.** Effet du traitement sur la teneur en protéines totales

**Tableau 44.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Proteines Total)

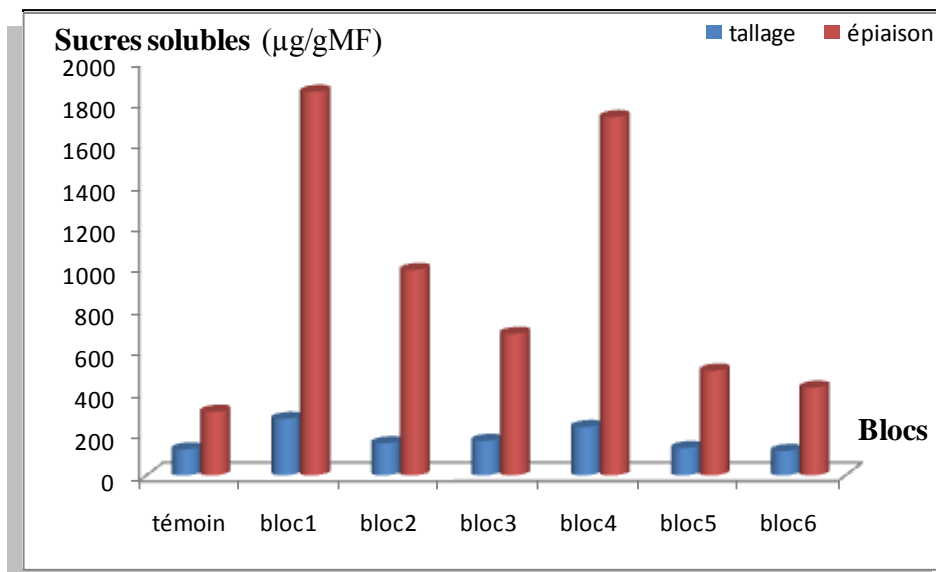
	H	P
PT 1	18.87446	0.0044
PT 2	19.14230	0.0039
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
PT 1 PT 2	12.13973	0.0005

PT 1 : Protéines totales au tallage

PT 2 : Protéines totales à l'épiaison

### 2.2.2.5. Sucres solubles

Les sucres solubles sont en relation avec la chlorophylle. Les taux sont variables au niveau des deux stades de développement du blé. Les blocs 1 et 4 donnent les teneurs les plus importants durant les deux stades ; tandis que le site témoin montre une faible teneur (figure 150). L'analyse statistique renseigne qu'au tallage, il existe une différence significative entre le bloc 6 et 1 ( $p = 0.0034$ ). Pendant l'épiaison, la différence est significative entre les blocs 1 et témoin ( $p = 0.0034$ ). Une différence hautement significative est remarquée après le test de Kruskal-Wallis où le  $p = 0.000$  (tableau 45).



**Figure 150.** Effet du traitement sur la teneur en sucres solubles

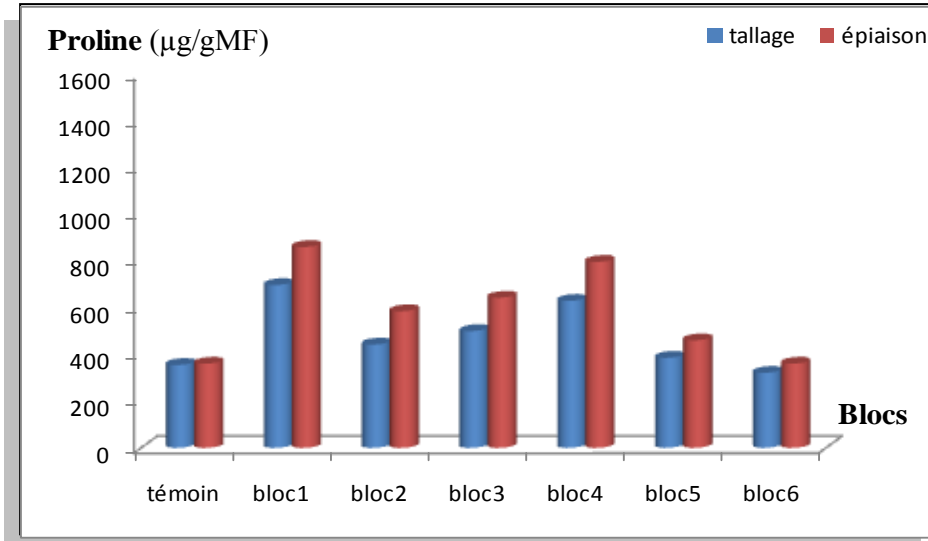
**Tableau 45.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Sucres Solubles)

	H	P
S 1	19.49784	0.0034
S 2	19.49784	0.0034
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
S 1		
S 2	30.76744	0.000

S 1 : Sucres solubles au tallage  
S 2 : Sucres solubles à l'épiaison

### 2.2.2.6. Proline

Les plantules des blocs 1 et 4 donnent des teneurs en proline très proches, elles sont supérieures ou égales à 697,78 $\mu\text{g/g}$  MF au tallage et 860,5  $\mu\text{g/g}$  MF à l'épiaison. Le bloc 6 montre la moitié de la quantité du bloc 1 (figure 151). Après une étude statistique des médianes au tallage, qu'il existe une différence significative entre les traitements appliquées aux blocs 1 et 6 ( $p = 0,0037$ ). A l'épiaison, l'analyse statistique révèle l'existence d'une différence significative entre le témoin et le bloc 1 et entre ce dernier et le bloc 6. Le test de Kruskal-Wallis entre prélèvements donne un  $p = 0,0762$ , qui indique une absence de différence significative entre eux (tableau 46).



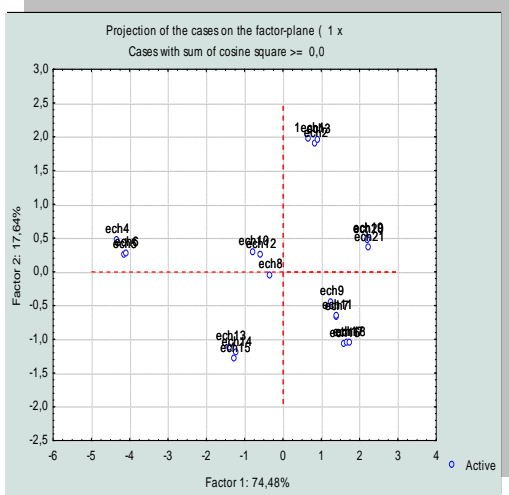
**Figure 151.** Effet du traitement sur la teneur en proline

**Tableau 46.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Proline)

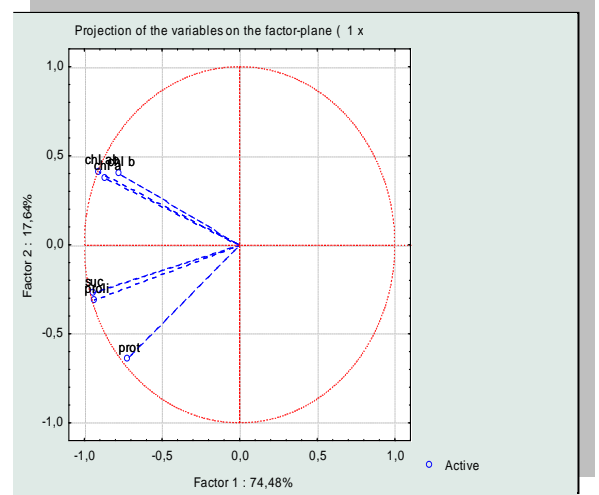
	H	P
P 1	19.29004	0.0037
P 2	18.97835	0.0042
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
P 1		
P 2	3.145230	0.0762

P 1 : Proline au tallage  
P 2 : Proline à l'épiaisson

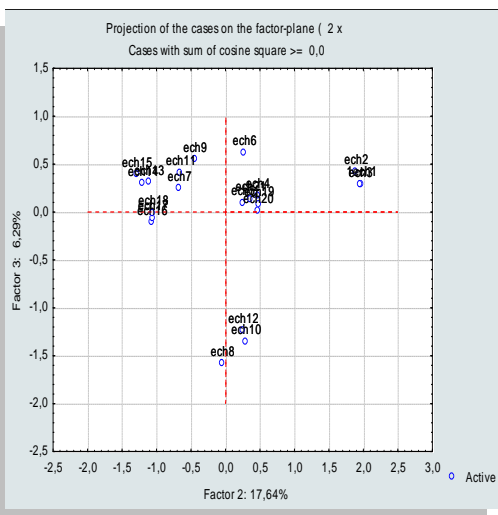
**a)- Analyse en composantes principales (tallage)**



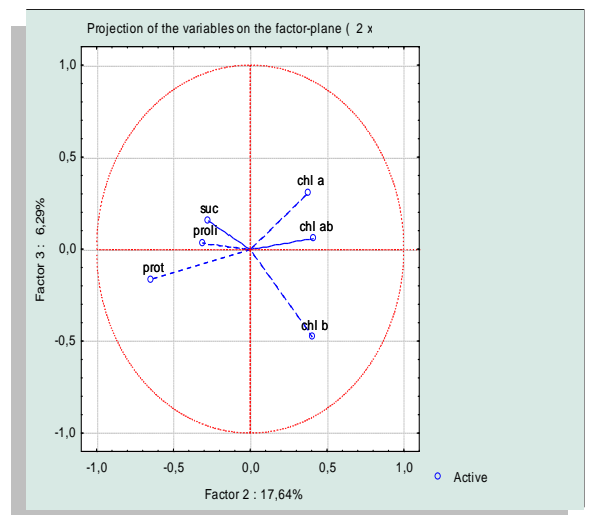
**Figure 152.** Projection des cas des facteurs 1 et 2



**Figure 153.** Analyse en composantes principales

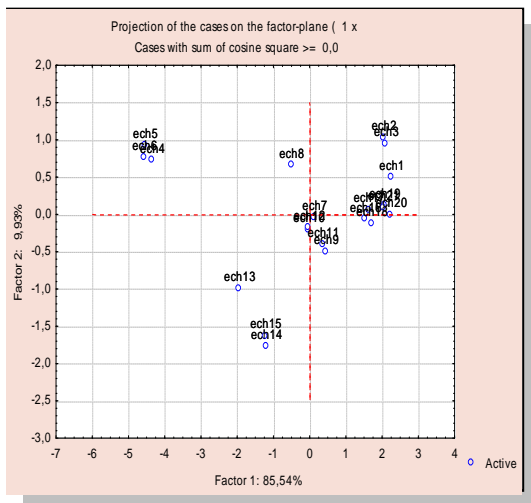


**Figure 154.** Projection des cas des facteurs 2 et 3

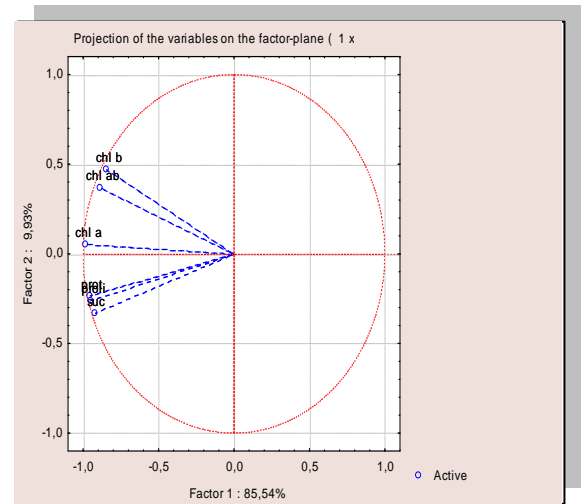


**Figure 155.** Analyse en composantes principales

## b) - Analyse en composantes principales (épiaison)



**Figure 156.** Projection des cases des facteurs 1et 2



**Figure 157.** Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales au tallage montre un axe principal de 74.48 % de la variance totale, on retrouve des corrélations positives entre sucres solubles, protéines totales, proline et chlorophylles (a), (b) et (a+b) ; tandis que sur le second axe explicatif de 17.64 %, on retrouve des corrélations négatives entre les teneurs des sucres solubles et la proline ; les chlorophylles (a), (a+b) sont en corrélation négative avec les protéines , les sucres et la proline (figure 153) .

La projection des parcelles des différents blocs de l'expérimentation dans le plan de l'analyse en composantes principales montre que les blocs 2 et 3 sont les plus distingués (figure 152 et figure 154).

L'analyse en composantes principales au stade épiaison indique sur un premier axe explicatif du 85.54 % de la variance totale, qu'il existe une corrélation positive entre les variables physio biochimiques de la plante (protéines totales, sucres solubles, prolines, chlorophylle (a), (b) et (a+b) (figure 157).

La projection des parcelles des différents blocs de l'expérimentation dans le plan de l'analyse en composantes principales montre que les parcelles des blocs 2 , 3 et 4 forment un groupe caractérisé par des teneurs en matières organiques les plus élevées (figure 156).

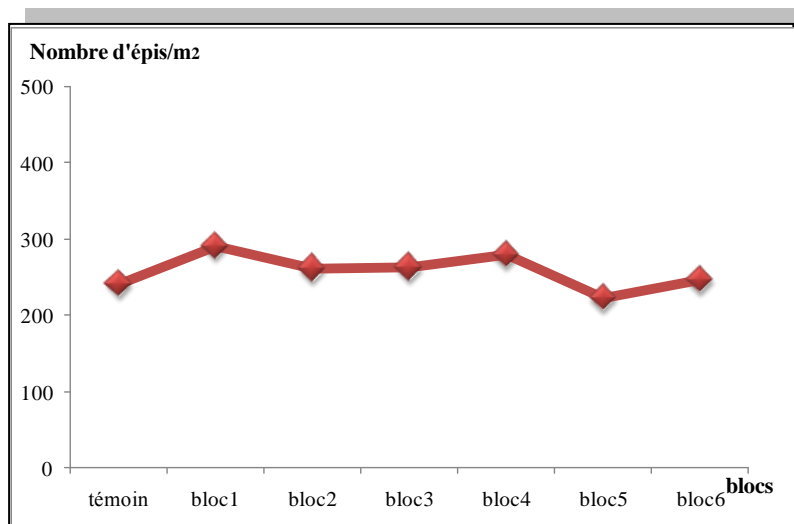
L'augmentation de la teneur en sucres solubles lors d'un stress est parmi les phénomènes les plus observés dans la réponse (Hajihashemi *et al.*, 2006). Cette augmentation serait due, selon certains auteurs, à une modification d'activités enzymatiques liées au métabolisme glucidique. L'accumulation de proline observée dans le cas de stress salin chez plusieurs espèces (Ashraf et Foolad, 2007; Nagesh

Babu et Devaraj, 2008 & Tammam *et al.*, 2008), à part son rôle d'osmoticum, contribuerait à la stabilisation des structures cellulaires (Ashraf et Foolad, 2007). L'activité photosynthétique des plantes de *Triticum durum* influe sur l'accumulation des sucres solubles et des protéines totales (Ball *et al.*, 1987 ; Wang *et al.*, 1997 ; Jamil *et al.*, 2007 & Zheng *et al.*, 2009 ).

### 2.2.3. Paramètres agronomiques

#### 2.2.3.1. Nombre d'épis/m<sup>2</sup>

Le nombre d'épis /m<sup>2</sup> est important au niveau du bloc 1 (291), alors que le nombre le plus bas est enregistré dans le bloc 5 (223) (figure 158). L'étude statistique affirme la différence entre les traitements 1 et 5 (tableau 47)



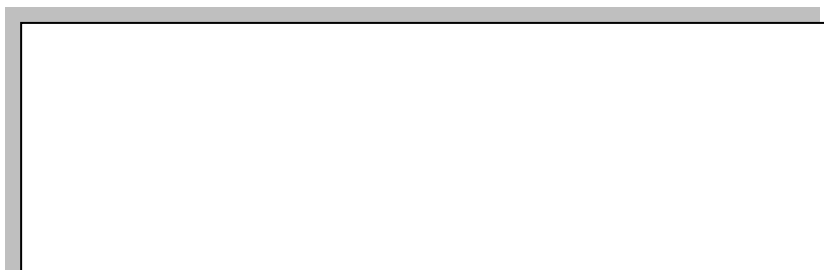
**Figure 158.** Effet du traitement sur le nombre d'épis /m<sup>2</sup>

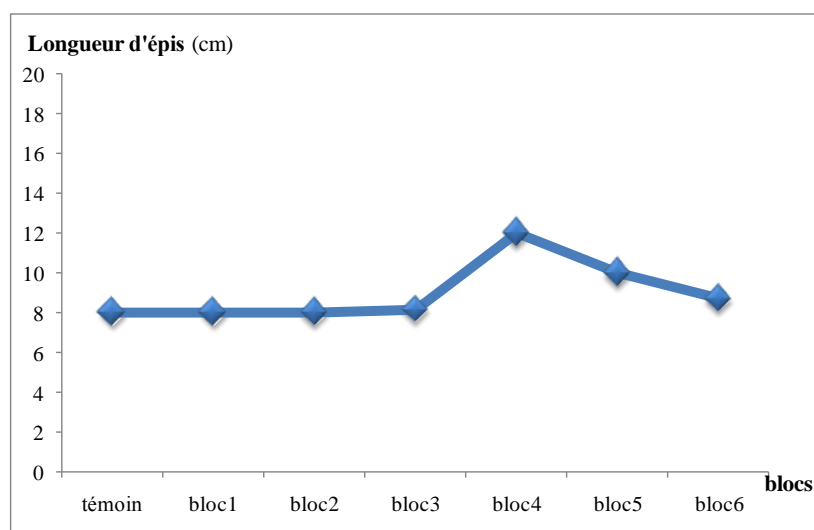
**Tableau 47.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Nombre d'épis/m<sup>2</sup>)

	H	P
Nombre d'épis/m <sup>2</sup>	17.87899	0.0065

#### 2.2.3.2. Longueur d'épis

Ce paramètre est lié à la fertilité, le nombre de grains / épi et le taux de stérilité qui sont eux même sous l'influence des conditions climatiques notamment la nutrition hydrique. Le bloc 4 présente la plus haute valeur avec une longueur de 12 cm (figure 159). L'analyse statistique indique une absence de différence significative entre les blocs (tableau 48).





**Figure 159.** Effet du traitement sur la longueur d'épis

**Tableau 48.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Longueur d'épis)

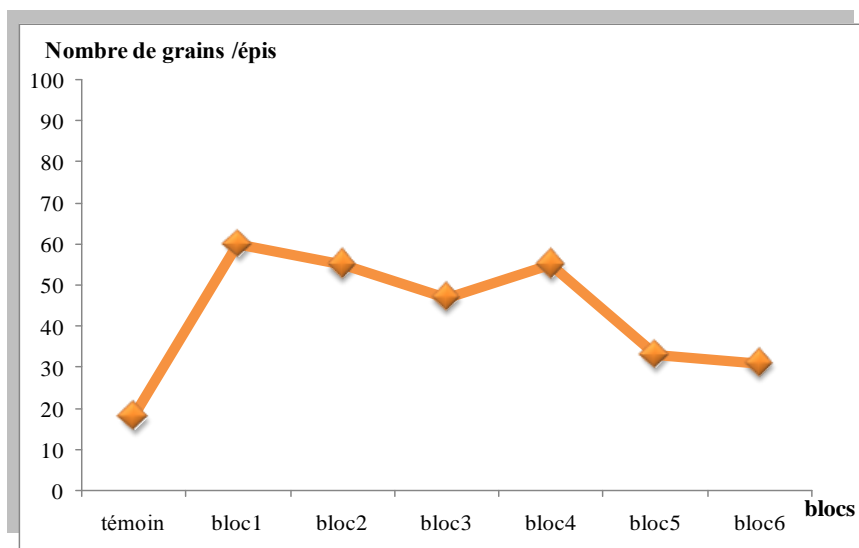
	H	P
Longueur d'épis	14.19142	0.0276

### 2.2.3.3. Nombre de grains / épis

Le nombre de grains / épis est déterminant dans la formation des composantes du rendement. Il est fonction du nombre d'épillets par épi, du taux d'avortement des organes floraux et de la réalisation de la fécondation. Il est donc lié à la fertilité de l'épi et constitue un grand facteur du rendement à l'unité de surface.

Le nombre de grains / épi de la culture du blé dur est variable d'un bloc à l'autre ; le bloc 1 (60), bloc 6 (31) tandis que le bloc témoin présente la valeur (18) la plus faible (figure 160). Une étude affirme qu'un épi d'une bonne variété peut comporter d'une dizaine jusqu'à près de 40 épillets/épi, chacun peut renfermer jusqu'à 5 à 6 fleurs fertiles, soit un potentiel de plus de 200 grains / épis (Casnin *et al.*, 2011).

Il ressort du test de médianes qu'il existe une différence hautement significative entre les traitements 1 et 6 (tableau 49).



**Figure 160.** Effet du traitement sur le nombre de grains / épis

**Tableau 49.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Nombre de grains / épis)

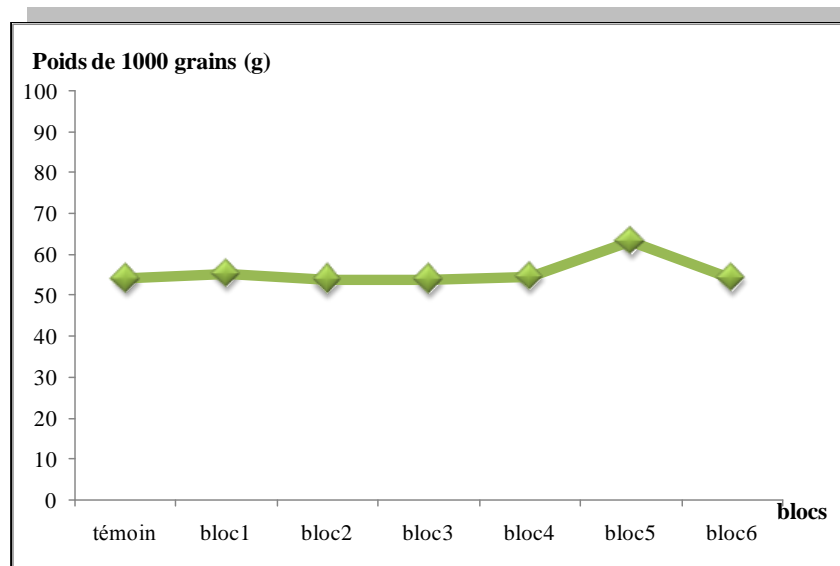
	H	P
Nombre de grains / épis	16.39180	0.0118

#### 2.2.3.4. Poids de 1000 graines

Le poids de 1000 grains donne une idée sur le taux du rendement de la culture. Le poids des 1000 grains de la culture du blé dur s'étale entre 53.7 g (blocs 2 et 3) et 63.12 g au bloc 5 (figure 161). Ces valeurs sont très importantes par rapport à celles obtenues par Hormisdas (2008) qui a travaillé sur la variété triticale implanté dans une région semi aride où les conditions climatiques et surtout l'échaudage entraînent des pertes considérables où la fin du cycle correspond à l'avènement des hautes températures estivales. Agronomiquement, le triticale possède l'avantage de pouvoir donner des rendements satisfaisants dans des zones semi arides à cause de sa résistance à la sécheresse.

Le test de médiane Kruskal-Wallis confirme la différence significative entre les blocs 1 et 5, et ce dernier avec le bloc 2 (tableau 50).





**Figure 161.** Effet du traitement sur le poids de 1000 grains

**Tableau 50.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Poids de 1000 grains)

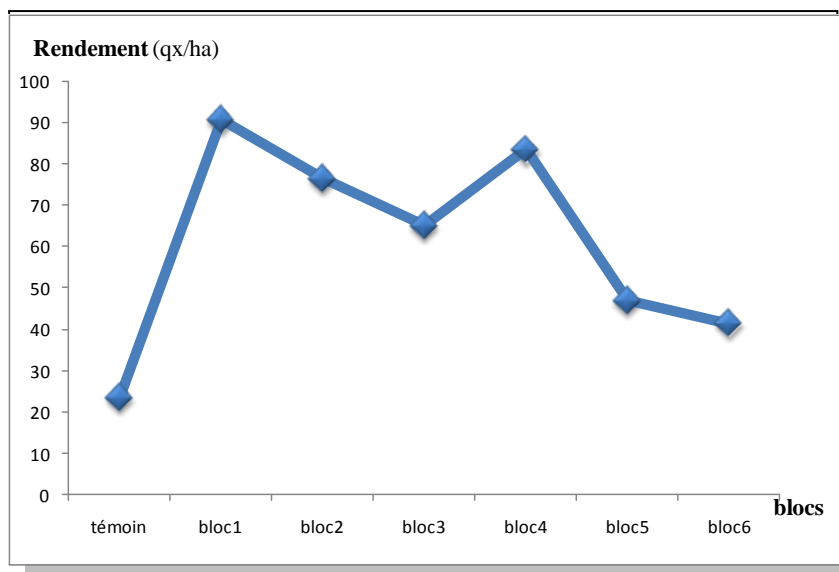
	<b>H</b>	<b>P</b>
<b>Poids de 1000 grains</b>	15.65729	0.0157

### 2.2.3.5. Rendements

Les résultats montrent que le rendement de la culture du *Triticum durum* varie de 41.38 qx/ha (bloc 6) à 90.58 qx/ha au bloc1 (figure 162). Ces gains de rendement résultent de la mécanisation de l'agriculture, du travail du sol, des amendements, de l'emploi d'engrais, en particuliers chimiques, des traitements phytosanitaires et surtout de l'amélioration génétique.

Pour cette campagne, nous remarquons que la diminution des teneurs en proline est en relation avec l'augmentation des rendements par rapport à la campagne 2010-2011.

L'analyse statistique révèle qu'il existe une différence très hautement significative entre les médianes des blocs 1 et témoin ( $p = 0.0086$ ) (tableau 51).



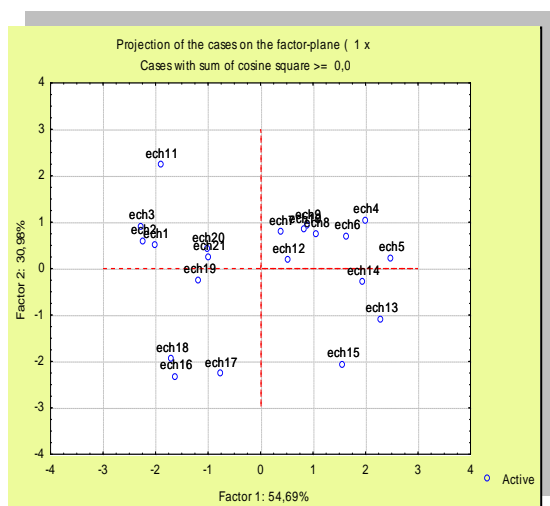
**Figure 162.** Effet du traitement sur le rendement

**Tableau 51.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Rendements)

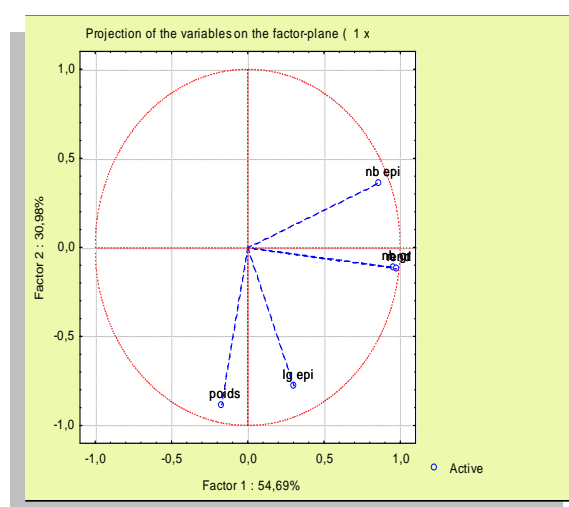
	H	P
<b>Rendements</b>	17.19481	0.0086

### a)- Analyse en composantes principales

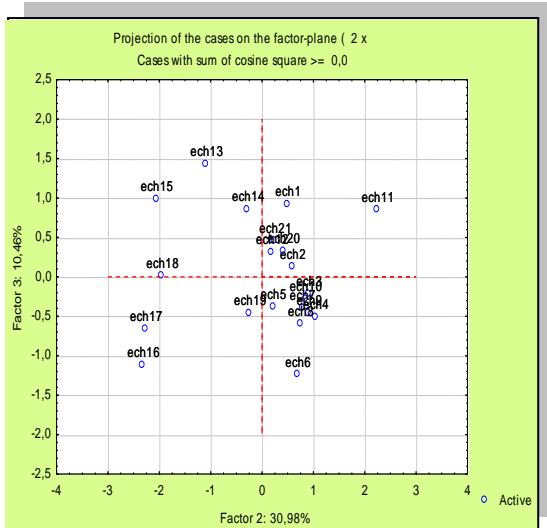
Les analyses statistiques en composantes principales de la culture du *Triticum durum* et la projection des variables étudiées dans le plan sont présentés dans les figures suivantes :



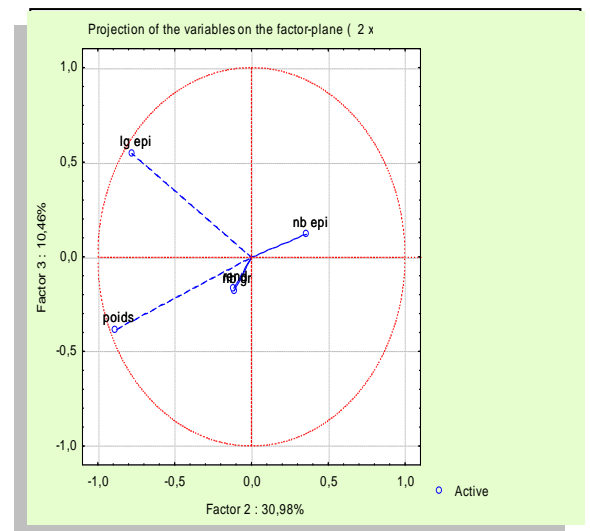
**Figure 163.** Projection des cases des facteurs 1et 2



**Figure 164.** Analyse en composantes principales



**Figure 165.** Projection des cases des facteurs 2 et 3



**Figure 166.** Analyse en composantes principales

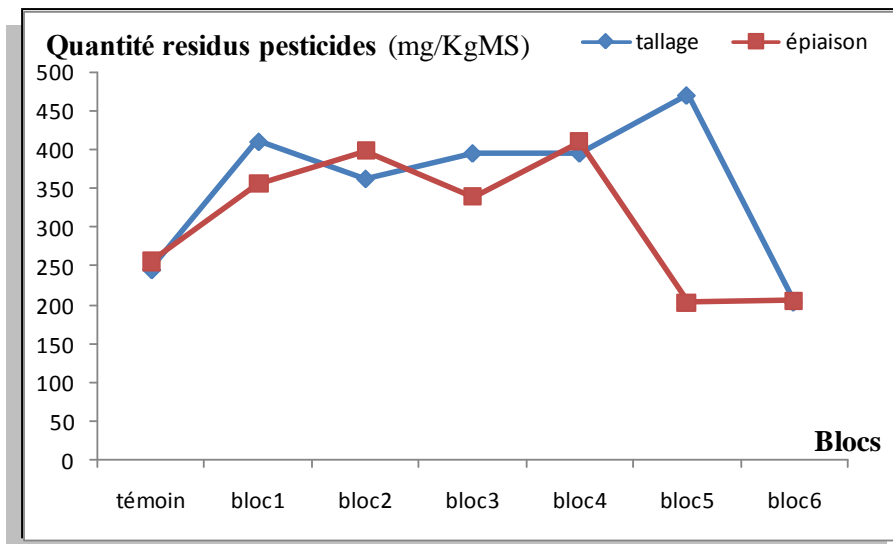
La première composante explique 54.96 % de la variance totale, on retrouve des corrélations positives entre le nombre d'épis /m<sup>2</sup> et le poids de 1000 grains. Dans la deuxième composante qui porte 30.98 % de la variance totale, on retrouve une corrélation positive entre le poids de mille grains et la longueur d'épi, et une corrélation négative entre ce dernier paramètre agronomique et le nombre d'épis /m<sup>2</sup> (figure 164).

L'observation montre que les parcelles des blocs 4 et 5 sont projetées dans la première et la deuxième composante du plan de l'analyse en composantes principales, ces parcelles ont réalisé les meilleurs rendements (figure 166).

La densité épi dépend directement du nombre de plantes levées et du tallage. Les pluies du mois de mai et de début juin ont favorisé le remplissage des grains et un fort taux de protéines est important pour réussir à faire de la semoule et des pâtes, donc il existe une relation proportionnelle entre les composantes du rendement (Combe *et al.*, 1994).

#### 2.2.4. Dosage des pesticides

Lorsqu'on pulvérise des pesticides, 5% des substances toxiques restent sur la plante, 10% vont dans l'air et 85% dans le sol et 10% de ces 85% aboutissent dans l'eau (De Luca, 2007).



**Figure 167.** Effet du traitement sur la quantité des résidus de pesticides

Les résultats du dosage des résidus de pesticides dans le sol pendant les stades tallage et épiaison de *Triticum durum* montrent une grande hétérogénéité entre les deux prélèvements (figure 167). Le test statistique confirme cette hétérogénéité par des différences significatives entre eux avec un  $p = 0.0402$  (tableau 52).

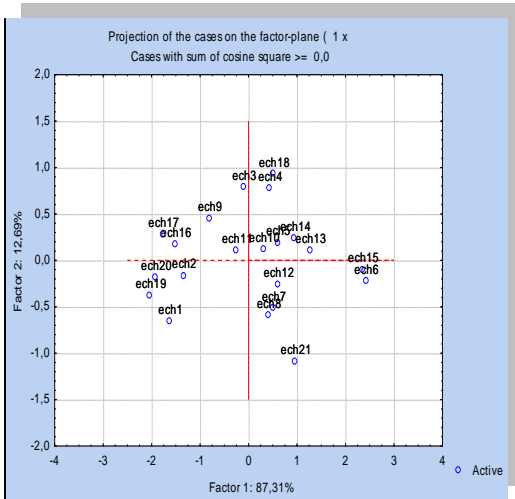
**Tableau 52.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Résidus de pesticides)

	H	P
<b>Résidus 1</b>	7.100694	0.3116
<b>Résidus 2</b>	9.991342	0.1250
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
<b>Résidus 1</b> <b>Résidus 2</b>	4.208406	0.0402

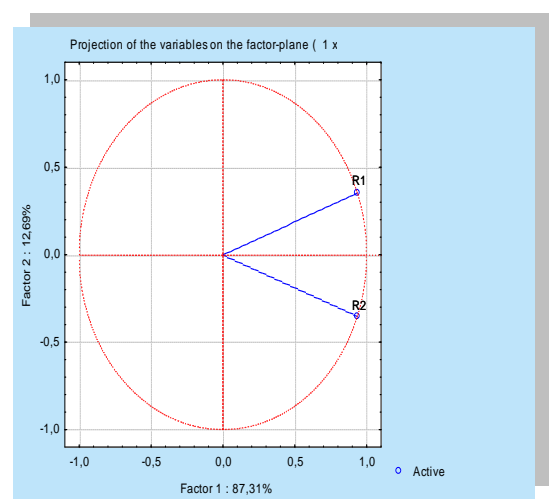
**Résidus 1 :** Résidus de pesticides au tallage

**Résidus 2 :** Résidus de pesticides à l'épiaison

### a)- Analyse en composantes principales



**Figure 168.** Projection des cases des facteurs 1et 2

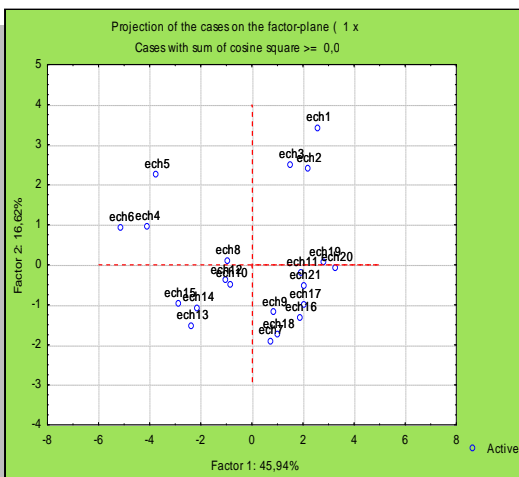


**Figure 169.** Analyse en composantes principales

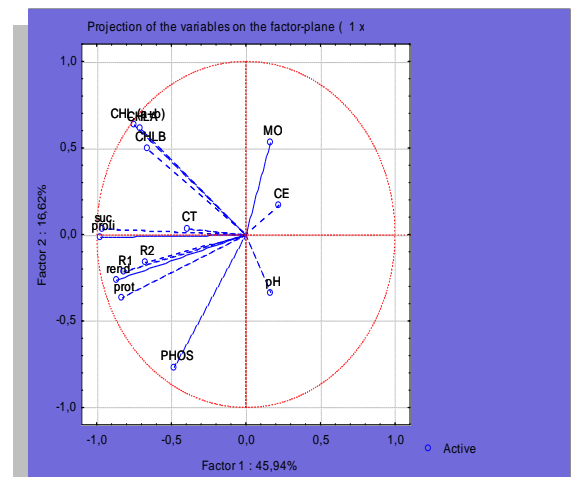
Sur l'axe horizontal (87.81 %), les résultats de dosage des résidus durant le tallage et l'épiaison sont en corrélation positive, tandis que sur l'axe vertical (12.69%), la corrélation est négative (figure 169). La projection des échantillons des parcelles étudiées montre que les blocs 5 et 6 sont les plus spécifiques (figure 168) .

La demi-vie de tout pesticide sera réduite en présence de chaleur, d'humidité, d'exposition directe à une forte lumière du soleil ou à d'importantes populations microbiennes. Le changement climatique entre les deux stades est un facteur déterminant dans la diminution de la quantité des résidus dans le sol. Cette diminution est influencée par adsorption des pesticides et la dégradation par la végétation, la faune, les taux d'adsorption et de mouvement dans le sol, le taux de perte à travers le sol et le taux de transfert vers les nappes phréatiques (Cox, 2010).

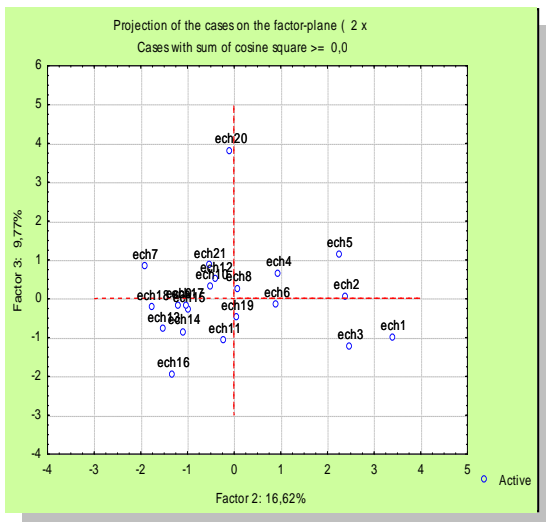
### c) Analyse en composantes principales (paramètres confondus au tallage)



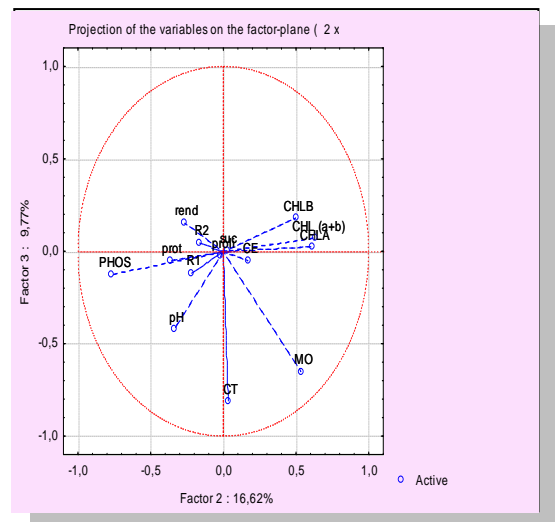
**Figure 170.** Projection des cases des facteurs 1 et 2



**Figure 171.** Analyse en composantes principales

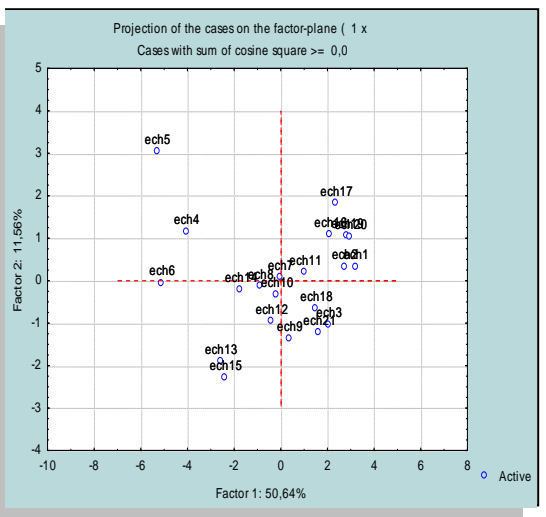


**Figure 172.** Projection des cases des facteurs 2 et 3

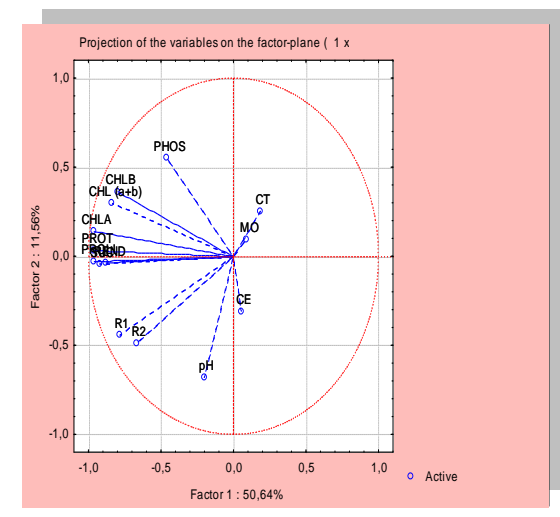


**Figure 173.** Analyse en composantes principales

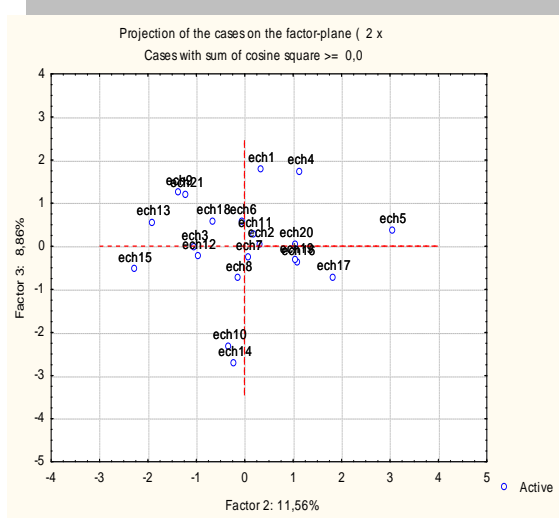
**c) Analyse en composantes principales (paramètres confondus à l'épaision)**



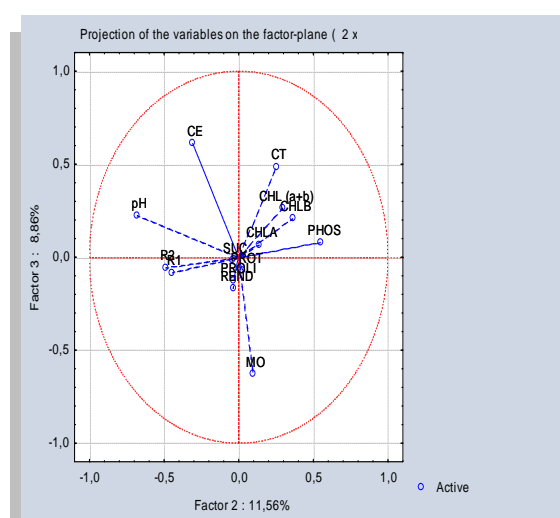
**Figure 174.** Projection des cases des facteurs 1 et 2



**Figure 175.** Analyse en composantes principales



**Figure 176.** Projection des cases des facteurs 2 et 3



**Figure 177.** Analyse en composantes principales

Sur l'axe vertical représentant 45,94%, tous les paramètres étudiés ont une corrélation positive, mais sur le deuxième axe (16,62%) les caractéristiques physiobiochimiques du blé sont corrélées négativement avec l'acidité du milieu et le phosphore assimilable. A l'épiaison, et sur le premier axe (50,64%) tous les paramètres réalisés sont en corrélation positive sauf avec la matière organique, la conductivité électrique et le calcaire total. L'observation de l'axe vertical (11,56%) montre que les résidus des pesticides sont négativement corrélés avec les paramètres physio-biochimiques de la plante.

La production d'une plante est influencée par un certain nombre de facteurs et conditions liés au milieu et à la plante elle-même que l'agriculture peut améliorer. Les facteurs du rendement représentent tous les éléments qui entrent dans la constitution de la plante : eau, carbone, éléments minéraux et énergie. Plus leur quantité est élevée, plus le rendement augmente (Prévoist, 1999 & Boulassel *et al.*, 2014).

Selon Meynard *et al.* (1994) l'analyse des composantes du rendement des céréales est aujourd'hui un outil pour porter un diagnostic sur le système de cultures en vue de leur amélioration. Plusieurs travaux (Bukman, 1999 & Belaid, 1996), ont montré que la densité de la culture est fonction du nombre de grains semés et de la survie des plantes. Belaid (1996), ajoute que le poids de 1000 grains, la qualité de la semence, les caractéristiques de lit de semence et les conditions climatiques avant et après semis, sont tous des facteurs qui influent le peuplement d'une culture. Le phosphore favorise la fécondation des plantes en permettant une meilleure épiaison (Gervy, 1970 & Mouhouche *et al.*, 2011).

## **Conclusion**

Concernant la campagne 2010-2011, les sols qui sont caractérisés par des pH proches de la neutralité, non salin avec des quantités de phosphore plus importantes que la campagne 2009-2010 et qui ont reçu les doses 92 unités, 30 unités et 60 unités de superphosphate donnent les meilleurs rendements en blé dur. L'abaissement des résidus de Clodinafop-propargyl et Cloquintocet-mexyl et la diminution des teneurs en proline par rapport à la campagne 2009-2010 influent sur l'augmentation des rendements.

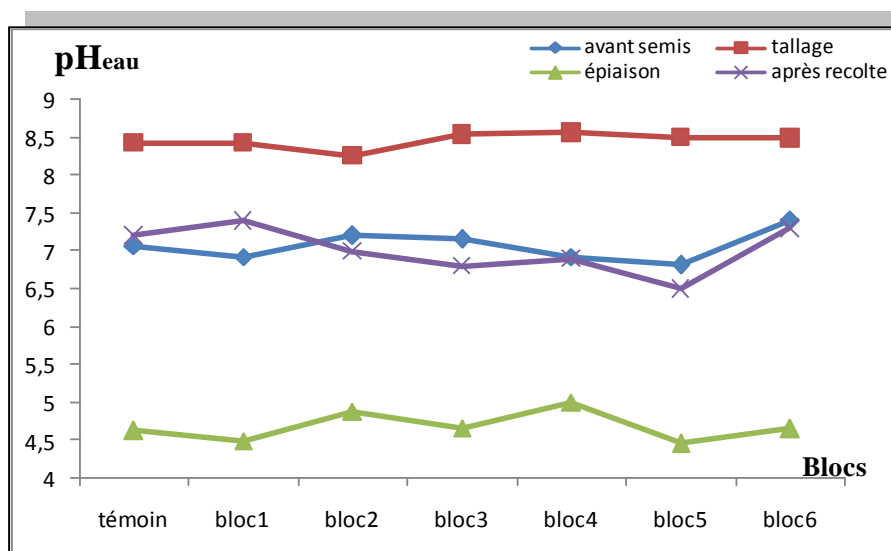
## 2.3. Campagne 2011- 2012

### 2.3.1. Caractéristiques physicochimiques du sol

#### 2.3.1.1. $pH_{eau}$

D'après les résultats obtenus, nous remarquons des fluctuations des valeurs de  $pH_{eau}$  avant semis. Ce stade est caractérisé par une moyenne de 7,06 et 7,4 la valeur maximale au niveau du bloc 6. Au tallage les valeurs de pH sont neutres et homogènes. A l'épiaison, on observe une forte acidité du milieu avec 4,46 comme valeur minimale au bloc 5, et 5 comme valeur maximale au bloc 4. Une augmentation du  $pH_{eau}$  est remarquable après récolte (figure 178).

Le test de Kruskal-Wallis montre une absence de différence significative entre tous les traitements, sauf entre les stades 1 et 4 où elle est très hautement significative (tableau 53).



**Figure 178.** Variation du  $pH_{eau}$  durant les stades de prélèvements

**Tableau 53.** Test des médianes de Kruskal-Wallis ( $pH_{eau}$ )

	H	P
$pH_{eau}$ 1	4.131944	0.6588
$pH_{eau}$ 2	2.297356	0.8904
$pH_{eau}$ 3	2.540717	0.8639
$pH_{eau}$ 4	4.273281	0.6397
<b>Comparaison entre prélèvements</b>		
$pH_{eau}$ 1	61.73449	0.0000
$pH_{eau}$ 2		
$pH_{eau}$ 3		
$pH_{eau}$ 4		



- $\text{pH}_{\text{eau}} 1$  :  $\text{pH}_{\text{eau}}$  avant semis
- $\text{pH}_{\text{eau}} 2$  :  $\text{pH}_{\text{eau}}$  tallage
- $\text{pH}_{\text{eau}} 3$  :  $\text{pH}_{\text{eau}}$  épiaison
- $\text{pH}_{\text{eau}} 4$  :  $\text{pH}_{\text{eau}}$  après récolte

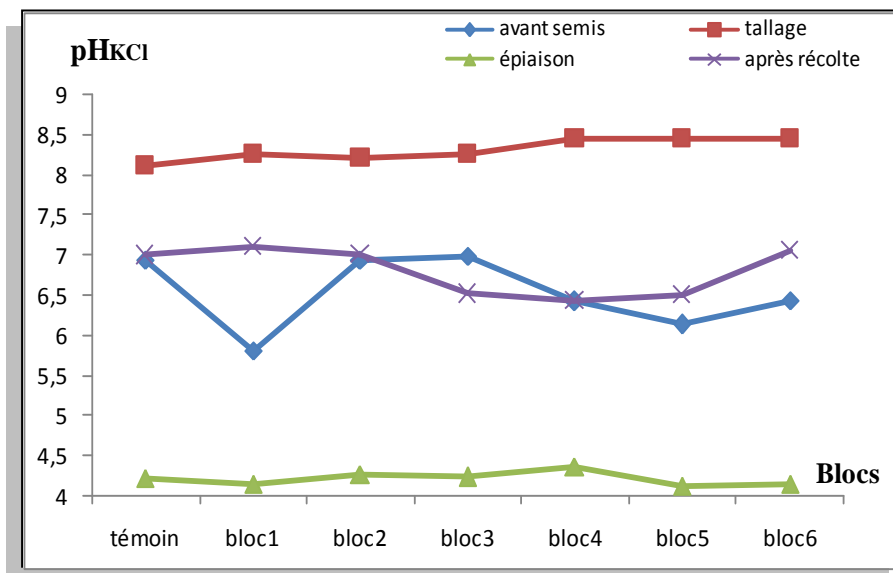
### 2.3.1.2. $\text{pH}_{\text{KCl}}$

Concernant le  $\text{pH}_{\text{KCl}}$ , l'acidité du milieu durant le stade avant semis, les valeurs observées ne dépassent pas 6.99.

Durant le tallage, il existe une très grande homogénéité des valeurs par rapport au stade précédent, dont la moyenne est 8,31 et les parcelles du bloc 6 donnent les  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  les plus élevées 8,46, alors que le bloc témoin montre les plus faibles par rapport aux traités.

L'épiaison est caractérisée par des  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  fortement acides qui sont remarquables, le bloc 5 présente toujours la valeur la plus faible 4.11 et le bloc 2 la valeur 4,26 la plus haute, où la moyenne est 4,20. La présence des ions  $\text{H}^+$  libérés dans le milieu par l'ensemble de Topik, Zoom et Ortiva ainsi que le superphosphate provoque cette forte acidité. Le dernier stade possède des  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  légèrement acides où les valeurs varient entre 6,3 au bloc 4 et 7,11 au bloc 1 (figure 179).

Le test de Kruskal-Wallis montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les doses ou les traitements appliqués. Ce test appliqué entre les 4 stades indique un  $p = 0.0000$  (tableau 55).



**Figure 179.** Variation du  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  durant les stades de prélèvements

**Tableau 54.** Test des médianes de Kruskal-Wallis ( $pH_{\text{eau}}$ )

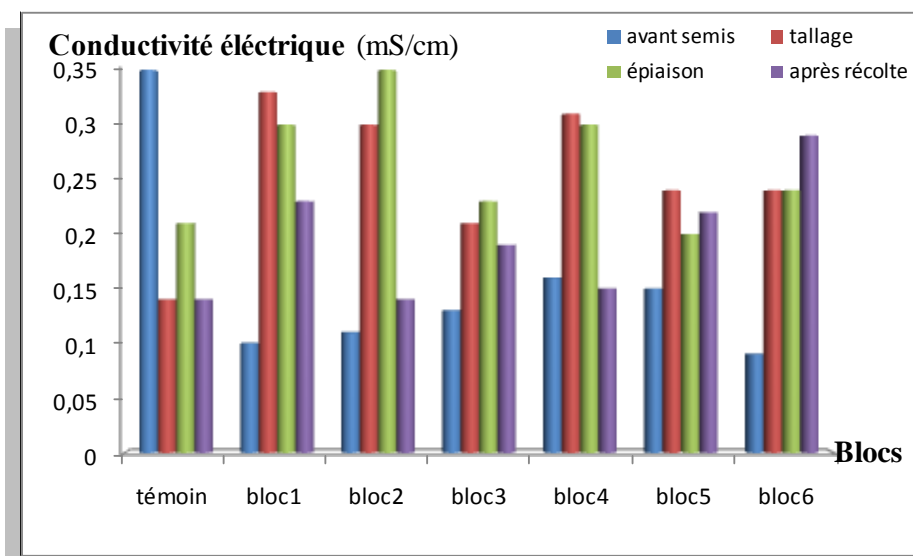
	H	P
<b>pH<sub>KCl</sub> 1</b>	4.180204	0.6523
<b>pH<sub>KCl</sub> 2</b>	2.369504	0.8828
<b>pH<sub>KCl</sub> 3</b>	1.738188	0.9421
<b>pH<sub>KCl</sub> 4</b>	4.221062	0.6463
<b>Comparaison entre prélèvements</b>		
<b>pH<sub>KCl</sub> 1</b>	71.26641	0.000
<b>pH<sub>KCl</sub> 2</b>		
<b>pH<sub>KCl</sub> 3</b>		
<b>pH<sub>KCl</sub> 4</b>		

**pH<sub>KCl</sub> 1** : pH<sub>KCl</sub> avant semis  
**pH<sub>KCl</sub> 2** : pH<sub>KCl</sub> tallage  
**pH<sub>KCl</sub> 3** : pH<sub>KCl</sub> épiaison  
**pH<sub>KCl</sub> 4** : pH<sub>KCl</sub> après récolte

### 2.3.1.3. Conductivité électrique

Tous les blocs étudiés montrent des valeurs proches de la conductivité électrique avant semis, tandis qu'au tallage il existe des fluctuations. Les valeurs varient entre 0,14 mS/cm et 0,33 mS/cm, et la moyenne est de l'ordre de 0,25 mS/cm. L'épiaison montre généralement une variation de la conductivité électrique où les valeurs typiques sont au niveau du bloc 5 avec 0,2 mS/cm et le bloc 2 avec 0,4 mS/cm. Une hétérogénéité remarquable de la conductivité électrique après récolte, une valeur faible de l'ordre de 0,14 mS/cm au niveau du bloc 2 et témoin, alors 0,29 mS/cm comme la plus haute au niveau du bloc 6 (figure 180).

Le test de Kruskal-Wallis montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les doses ou les traitements appliqués. Ce test appliqué entre les 4 stades indique un  $p = 0.0000$  (tableau 55).



**Figure 180.** Effet du traitement sur la conductivité électrique

**Tableau 55.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Conductivité Electrique)

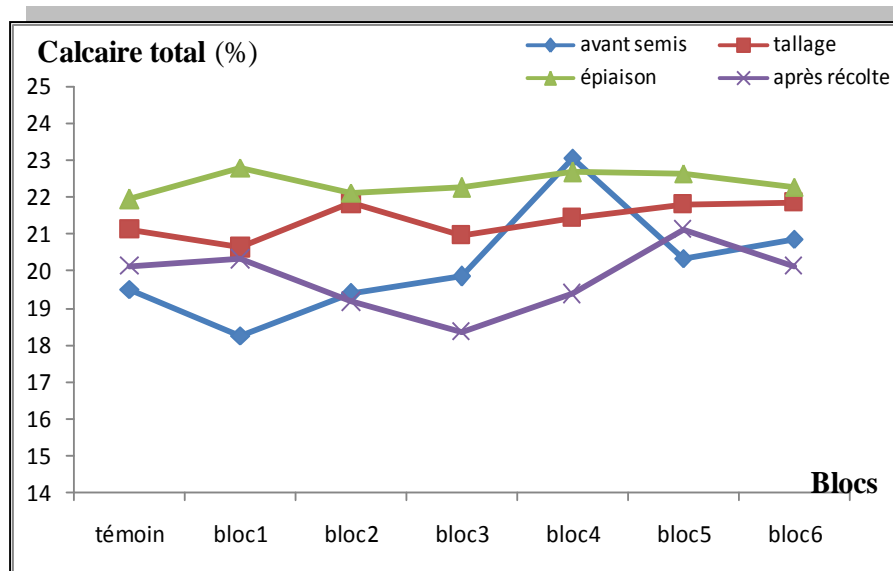
	<b>H</b>	<b>P</b>
<b>CE 1</b>	2.023261	0.9175
<b>CE 2</b>	8.205128	0.2235
<b>CE 3</b>	5.609103	0.4684
<b>CE 4</b>	3.701766	0.7170
<b>Comparaison entre prélèvements</b>		
<b>CE 1</b>	28.54302	0.0000
<b>CE 2</b>		
<b>CE 3</b>		
<b>CE 4</b>		

- CE 1** : Conductivité électrique avant semis
- CE 2** : Conductivité électrique au tallage
- CE 3** : Conductivité électrique à l'épiaison
- CE 4** : Conductivité électrique après récolte

#### **2.3.1.4. Calcaire total**

Avant semis, les teneurs en calcaire total sont très proches pour tous les blocs. Les teneurs oscillent entre 18.24 % au bloc 1 et 23.04 % au bloc 4, mais le bloc témoin présente une teneur remarquable 19.5 %.

Pendant le tallage, les teneurs en calcaire total augmentent par rapport au premier stade, la moyenne est de l'ordre de 20.15 %, alors que la plus haute valeur 21.85 % au niveau du bloc 6 et la plus faible 20.62 % au bloc 1. A l'épiaison la teneur moyenne est 22,36 %, les blocs montrent des valeurs homogènes, sauf le témoin présente une teneur faible par rapport aux blocs traités (21,93 %). Après la récolte, on a obtenu des pourcentages en calcaire total plus élevés que ceux du stade précédent, le bloc 5 avec la teneur la plus haute 21,11 % et le bloc 2 avec 19.14 % (figure 181). L'étude statistique des médianes révèle une absence de différence significative entre les traitements (tableau 56). Le test de Kruskal-Wallis mentionne une différence significative entre les stades de prélèvements mis à part les stades 1 et 2, 1 et 4, 2 et 3.



**Figure 181.** Effet du traitement sur le calcaire total

**Tableau 56.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Calcaire Total)

	H	P
CT 1	4.138528	0.6579
CT 2	2.770563	0.8370
CT 3	3.322504	0.7674
CT 4	8.676630	0.1926
<b>Comparaison entre prélèvements</b>		
CT 1	28.77503	0.0000
CT 2		
CT 3		
CT 4		

CT 1 : Calcaire totale avant semis

CT 2 : Calcaire totale tallage

CT 3 : Calcaire totale épiaison

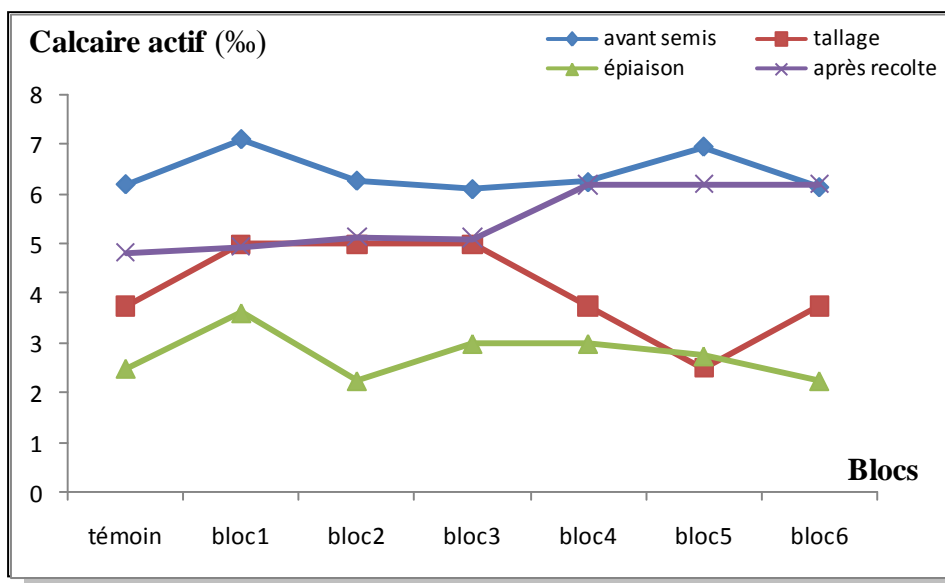
CT 4 : Calcaire totale après récolte

### 2.3.1.5. Calcaire actif

Avant semis, les résultats d'analyses du calcaire actif indiquent une homogénéité des teneurs. L'abaissement de l'ordre d'un 1/3 de la teneur en calcaire actif au niveau du bloc 5 par rapport à la période précédente. Une légère augmentation des taux est notée pendant l'épiaison par rapport au tallage, où on remarque une faible teneur au bloc 6 (2.25 ‰) et la plus élevée au bloc 1 (3.62 ‰). Après la récolte du blé, le taux du calcaire actif est plus important par rapport aux autres stades du cycle de développement de la plante. On note une moyenne 5,50 ‰, la teneur la plus élevée 6,19 ‰ est au niveau

des blocs 5 et 6, le témoin est de 4.82 ‰ (figure 182). L'analyse statistique des médianes montre une absence de différence significative entre les traitements.

Alors qu'entre les prélèvements, il existe des différences significatives sauf entre les stades 1 et 4, 4 et 2 (tableau 57).



**Figure 182.** Effet du traitement sur le calcaire actif

**Tableau 57.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Calcaire Actif)

	H	P
CA 1	3.435264	0.7526
CA 2	8.841202	0.1827
CA 3	1.641629	0.9495
CA 4	13.16362	0.0405
<b>Comparaison entre prélèvements</b>		
CA 1	57.07979	0.0000
CA 2		
CA 3		
CA 4		

CA 1 : Calcaire actif avant semis

CA 2 : Calcaire actif tallage

CA 3 : Calcaire actif épiaison

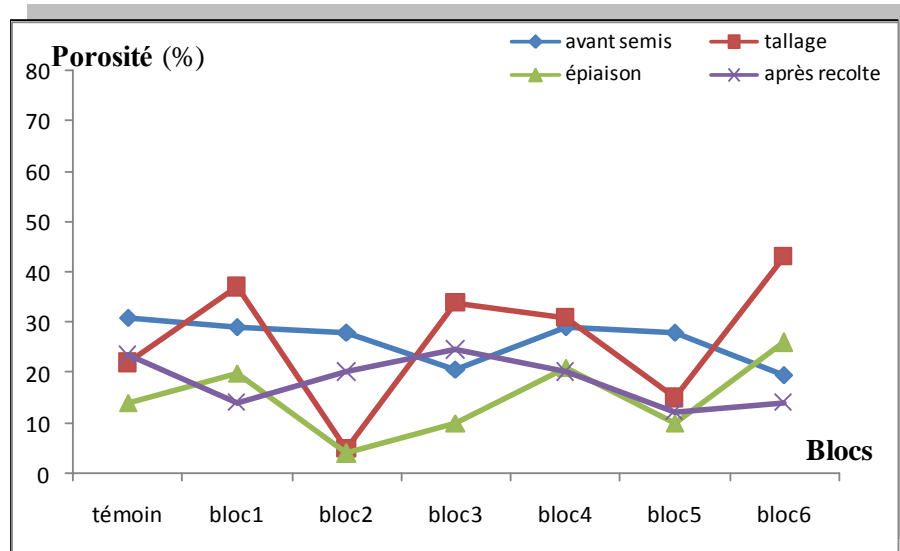
CA 4 : Calcaire actif après récolte

### 2.3.1.6. Porosité

En ce qui concerne la porosité avant semis, on remarque qu'il existe un grand écart entre la plus haute et la plus faible valeur. Le bloc témoin donne le taux le plus important 31 %. Au tallage, le bloc 2 montre un taux très faible 5 % par rapport aux autres. Le stade épiaison est caractérisé par des résultats

comparables à ceux du précédent. Le bloc 2 présente toujours le taux le plus faible (4 %). Au niveau du dernier stade, on observe une légère élévation des taux de la porosité, mais le bloc 1 présente la plus faible valeur 14,11 % (figure 183).

Le test des médianes n'indique pas une différence significative entre les traitements, par contre elle existe entre les 4 stades sauf au niveau des stades 1 et 2, 1 et 4, 2 et 4, 3 et 4 (tableau 58).



**Figure 183.** Effet du traitement sur la porosité

**Tableau 58.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Porosité)

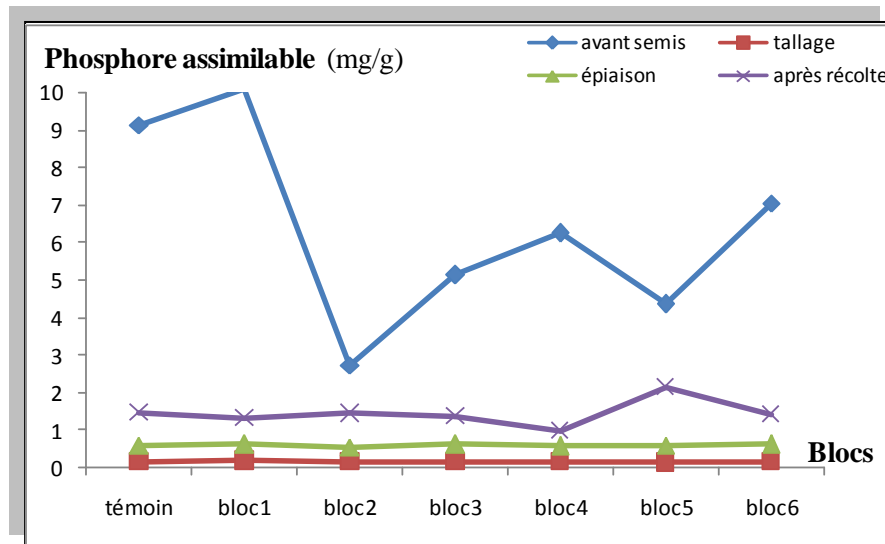
	H	P
<b>PO 1</b>	5.243982	0.5129
<b>PO 2</b>	7.204861	0.3023
<b>PO 3</b>	3.829600	0.6997
<b>PO 4</b>	8.321421	0.2155
<b>Comparaison entre prélèvements</b>		
<b>PO 1</b>	15.07444	0.0018
<b>PO 2</b>		
<b>PO 3</b>		
<b>PO 4</b>		

**PO 1 :** Porosité avant semis  
**PO 2 :** Porosité au tallage  
**PO 3 :** Porosité à l'épiaison  
**PO 4 :** Porosité après récolte

### 2.3.1.7. Phosphore assimilable

Avant semis, la concentration en phosphore assimilable est assez importante, elle atteint 10.11 mg/g au niveau du bloc 1. Pendant le tallage et épiaison, les résultats obtenus après dosage au laboratoire montrent une grande diminution du phosphore assimilable. Après récolte, le bloc 5 (2,15 mg/g) montre

une concentration importante par rapport aux deux stades précédents (figure 184). Le test de Kruskal-Wallis montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les doses utilisées, par contre le même test appliqué entre les 4 stades informe l'existence des différences significatives entre eux, mis à part le tallage et l'épiaison (tableau 59).



**Figure 184.** Effet du traitement sur le phosphore assimilable

**Tableau 59.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Phosphore Assimilable)

	H	P
<b>Phos 1</b>	2.430149	0.8762
<b>Phos 2</b>	2.041612	0.9158
<b>Phos 3</b>	1.073296	0.9827
<b>Phos 4</b>	4.524120	0.6061
<b>Comparaison entre prélèvements</b>		
<b>Phos 1</b>	64.45209	0.0000
<b>Phos 2</b>		
<b>Phos 3</b>		
<b>Phos 4</b>		

**Phos 1** : phosphore assimilable avant semis

**Phos 2** : phosphore assimilable au tallage

**Phos 3**: phosphore assimilable à l'épiaison

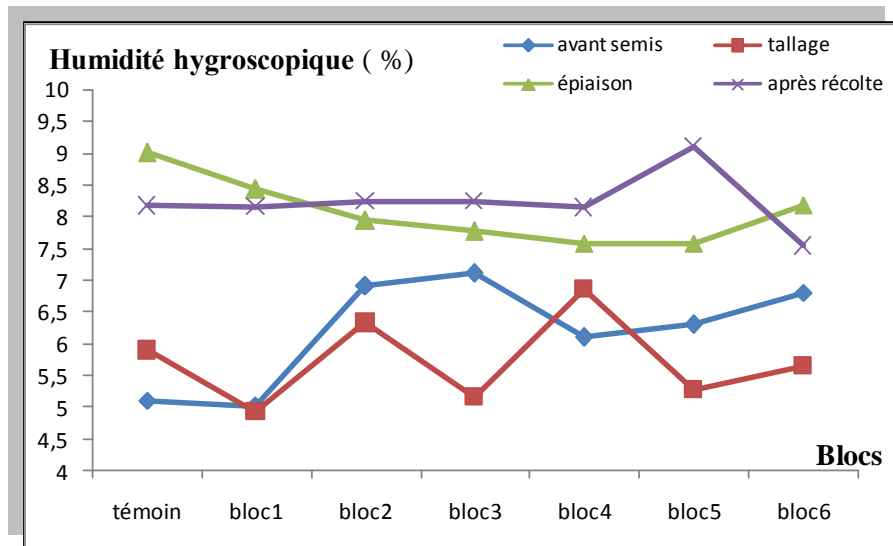
**Phos 4** : phosphore assimilable après récolte

### 2.3.1.8. Humidité hygroscopique

Avant le semis, Le bloc 3 est caractérisé par la valeur maximale qui est de l'ordre de 7.1 %, alors que le bloc 1 présente une valeur minimale 5 %. Durant le tallage, on note des fluctuations des taux de

l'humidité, les taux varient entre 4.94 % (bloc 1) et 6.86 % (bloc 4). Par ailleurs, les résultats sont homogènes à l'épiaison et après récolte (figure 185).

Une absence de différence significative entre les traitements est remarquable après l'application du test des médianes. L'étude statistique montre une différence très hautement significative entre les stades, à l'exception entre 1 et 2, 1 et 3, 3 et 4 (tableau 60).



**Figure 185.** Effet du traitement sur l'humidité hygroscopique

**Tableau 60.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Humidité Hygroscopique)

	H	P
<b>HG 1</b>	2.752492	0.8392
<b>HG 2</b>	2.895535	0.8218
<b>HG 3</b>	1.880565	0.8037
<b>HG 4</b>	3.041012	0.8037
<b>Comparaison entre prélèvements</b>		
<b>HG 1</b>	28.82267	0.000
<b>HG 2</b>		
<b>HG 3</b>		
<b>HG 4</b>		

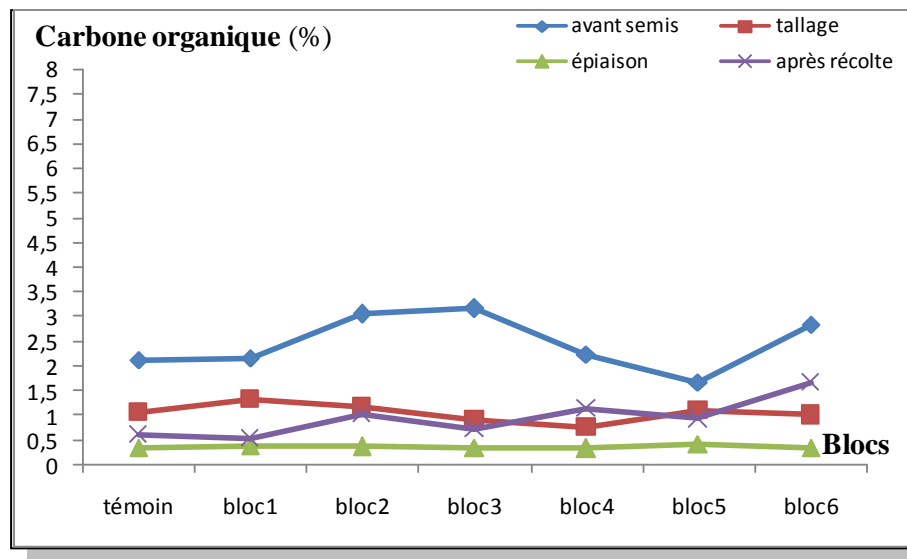
**HG 1** : Humidité hygroscopique avant semis  
**HG 2** : Humidité hygroscopique au tallage  
**HG 3** : Humidité hygroscopique à l'épiaison  
**HG 4** : Humidité hygroscopique après récolte

### 2.3.1.9. Carbone organique

Le taux du carbone organique ne dépasse pas 3.5 %. Le dernier stade présente des teneurs très faibles qui varient entre 0.33 % et 1.68 % (figure 186). Le test statistique de Kruskal-Wallis montre qu'il n'y a



pas de différence significative entre les doses. En revanche, entre les stades de prélèvements, elle est très hautement significative, mis à part entre l'épiaison et après récolte (tableau 61).



**Figure 186.** Effet du traitement sur la teneur en carbone organique

**Tableau 61.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Carbone Organique)

	H	P
CO 1	4.578731	0.5989
CO 2	8.749455	0.1882
CO 3	5.397033	0.4940
CO 4	9.785575	0.1340
<b>Comparaison entre prélèvements</b>		
CO 1	56.19470	0.0000
CO 2		
CO 3		
CO 4		

CO 1: Carbone organique avant semis  
 CO 2: Carbone organique au tallage  
 CO 3: Carbone organique à l'épiaison  
 CO 4: Carbone organique après récolte

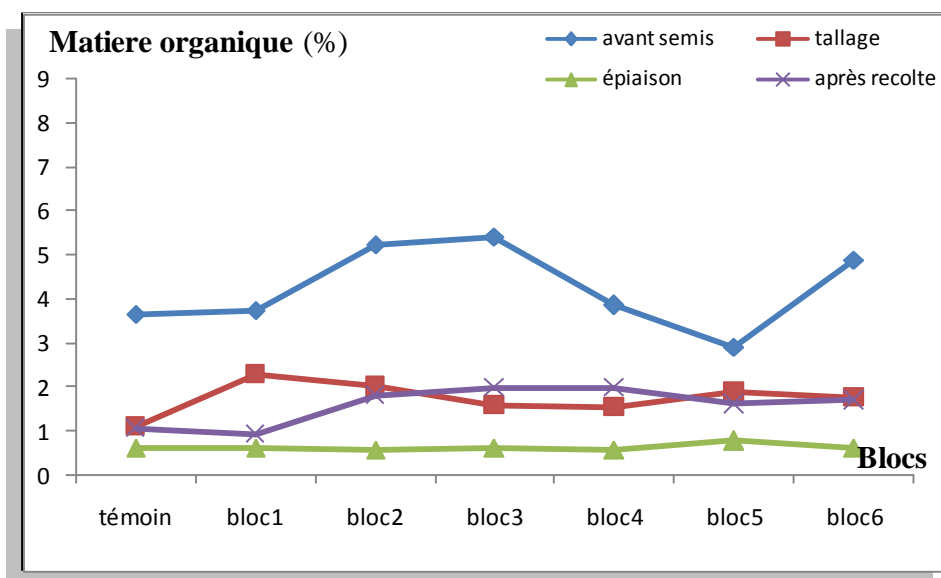
### 2.3.1.10. Matière organique

La teneur en matière organique est proportionnelle à la teneur en carbone organique, le stade avant semis indique que le bloc 3 montre 5,41 % comme valeur élevée et le bloc 5 avec 2,88 % la plus faible. Au tallage, les teneurs vont diminuer encore d'un 1/3. Les parcelles du bloc 1 donnent la plus haute valeur 2,27 % et ceux du bloc 4 (1,53 %) comme la plus basse. Alors que le témoin présente une teneur

très faible 1.1 % par rapport aux blocs traités. L'épiaison est caractérisée par les plus faibles teneurs. Les résultats présentés après récolte sont assez importants par rapport au tallage et épiaison mais restent toujours inférieurs au stade avant semis. Les parcelles des blocs 3 et 4 donnent les teneurs les plus élevées 1.96 % (figure 187).

Le test des médianes entre les traitements par l'engrais phosphaté montre une absence de différence significative entre les doses appliquées durant tous les stades des prélèvements.

L'étude statistique montre un  $p \leq 0,001$ , il y a des différences très hautement significatives entre les médianes des taux en matière organique des prélèvements : tallage et après récolte (tableau 62).



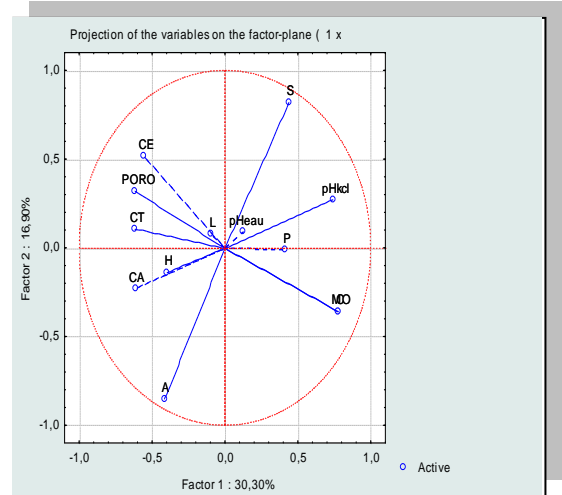
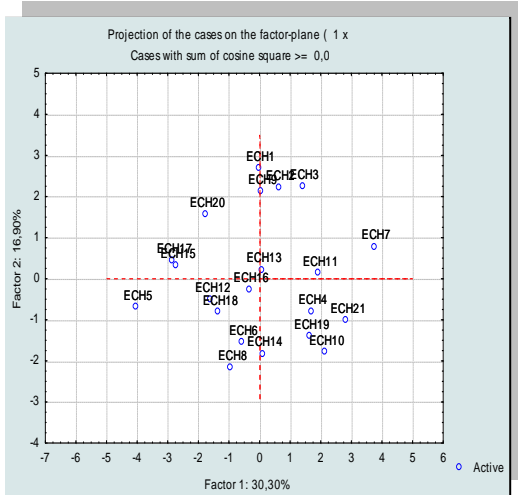
**Figure 187.** Effet du traitement sur la matière organique

**Tableau 62.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Matière Organique)

	H	P
MO 1	4.578731	0.5989
MO 2	9.856957	0.1308
MO 3	5.013089	0.5421
MO 4	4.229018	0.6457
<b>Comparaison entre prélèvements</b>		
MO 1	757.54661	0.0000
MO 2		
MO 3		
MO 4		

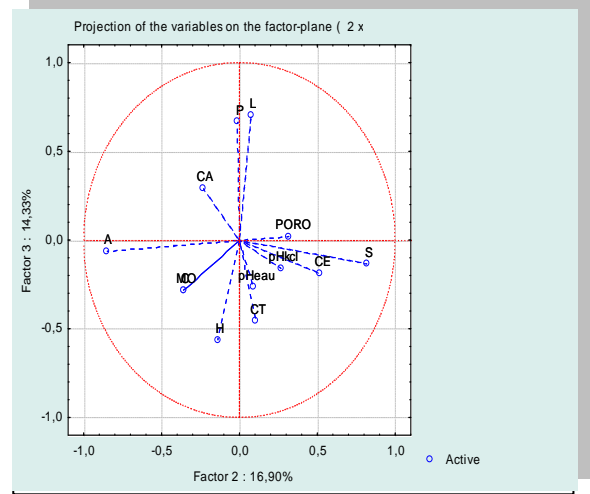
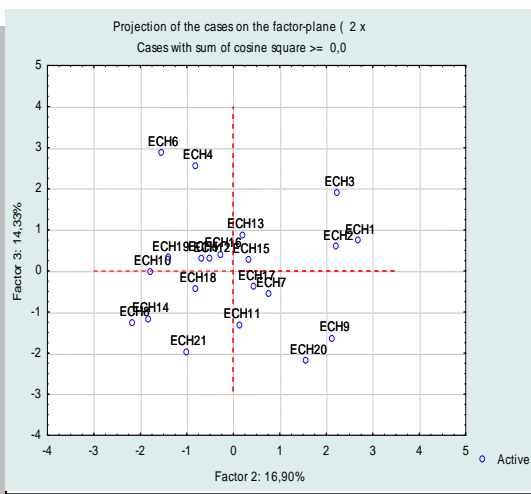
- MO 1 : Matière organique avant semis
- MO 2 : Matière organique au tallage
- MO 3 : Matière organique à l'épiaison
- MO 4 : Matière organique après récolte

**a) - Analyse en composantes principales (avant semis)**



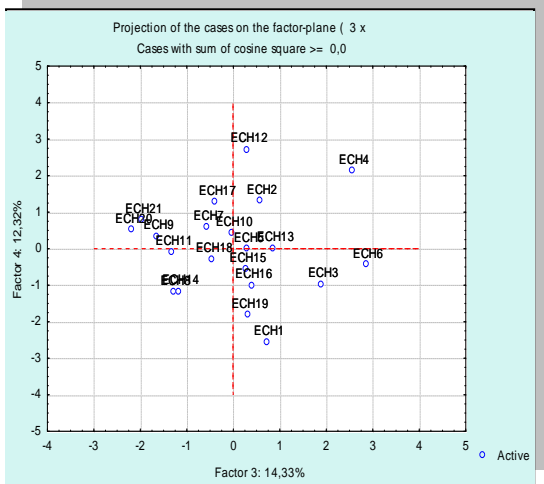
**Figure 188.** Projection des cases des facteurs 1et 2

**Figure 189.** Analyse en composantes principales

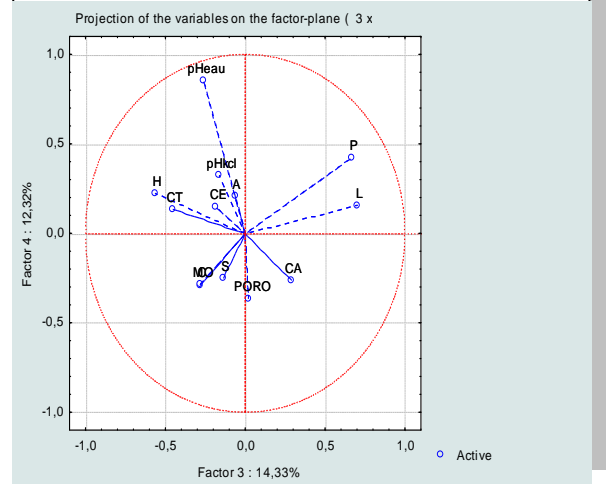


**Figure 190.** Projection des cases des facteurs 2 et 3

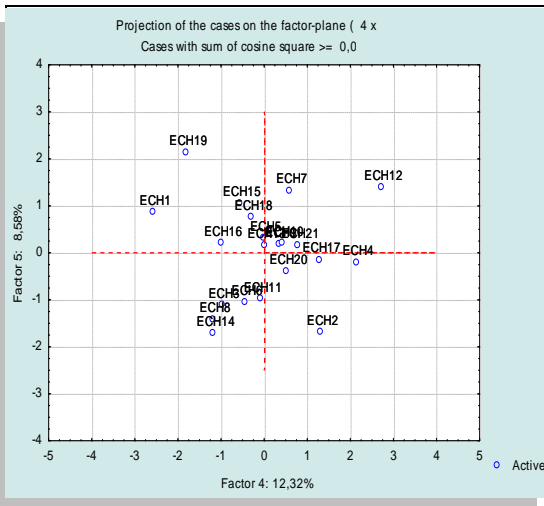
**Figure 191.** Analyse en composantes principales



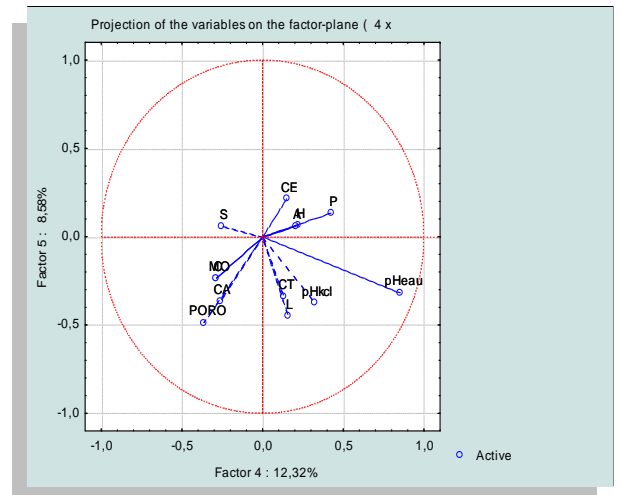
**Figure 192.** Projection des cases des facteurs 3et 4



**Figure 193.** Analyse en composantes principales

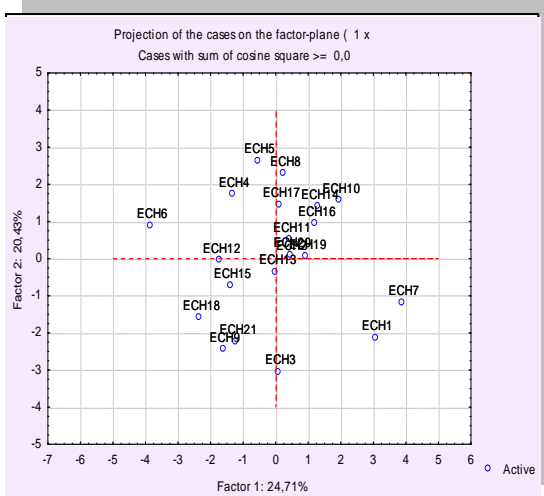


**Figure 194.** Projection des cases des facteurs 4 et 5

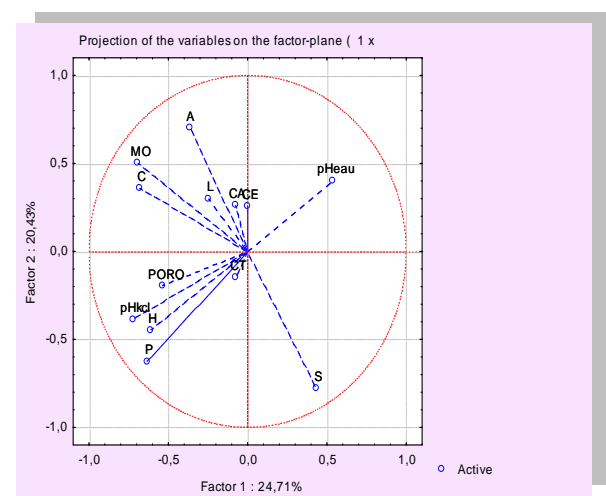


**Figure 195.** Analyse en composantes principales

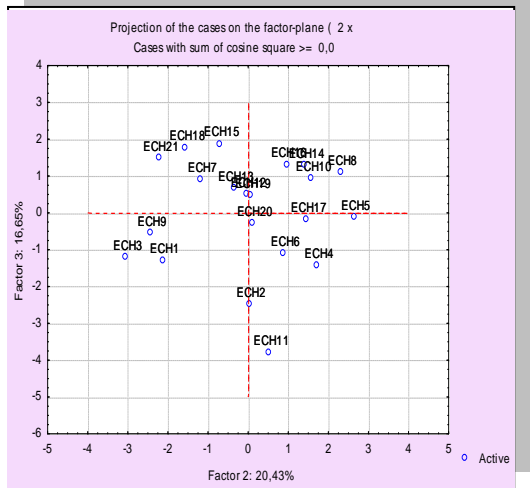
**b)- Analyse en composantes principales (après récolte)**



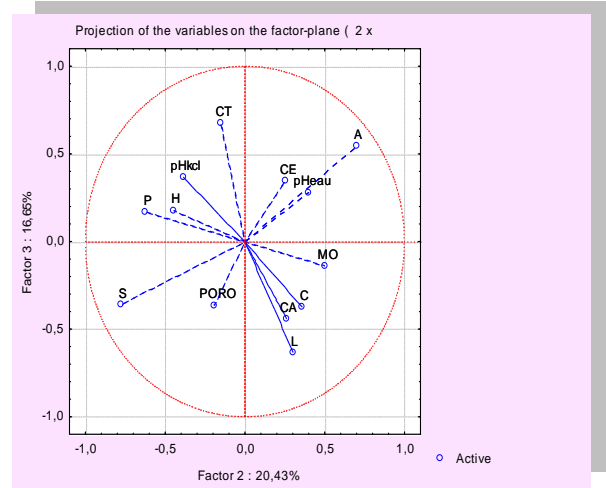
**Figure 196.** Projection des cases des facteurs 1et 2



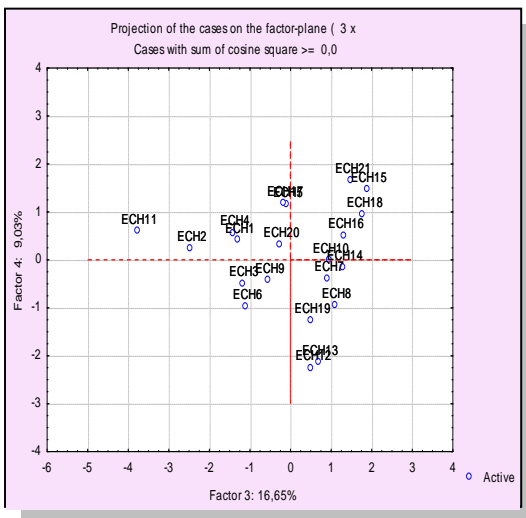
**Figure 197.** Analyse en composantes principales



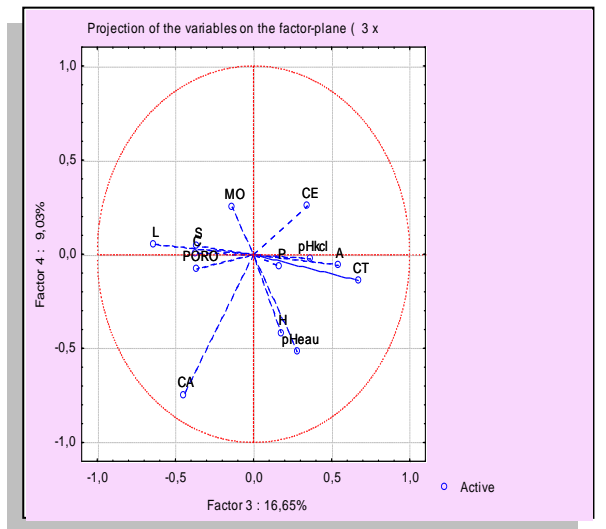
**Figure 198.** Projection des cases des facteurs 2et 3



**Figure 199.** Analyse en composantes principales

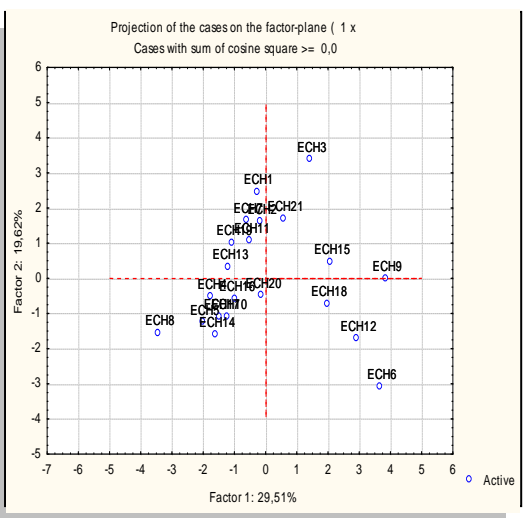


**Figure 200.** Projection des cases des facteurs 3 et 4

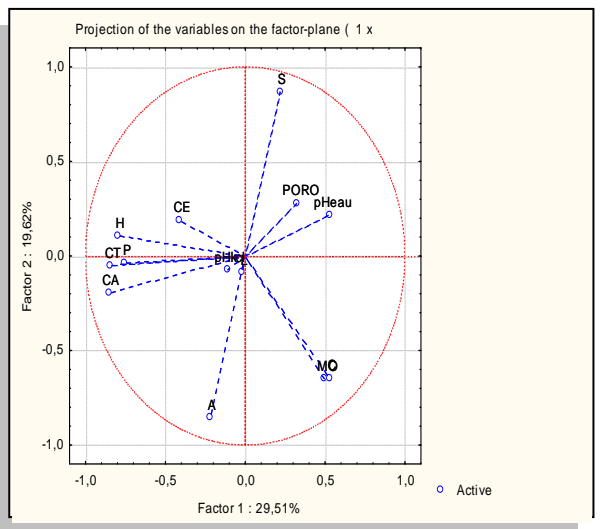


**Figure 201.** Analyse en composantes principales

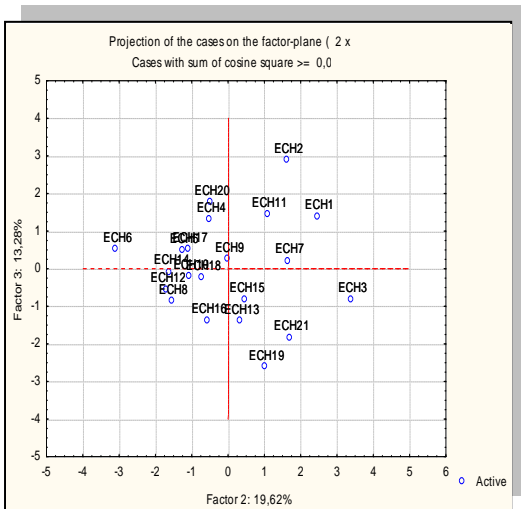
**c)- Analyse en composantes principales (épiaison)**



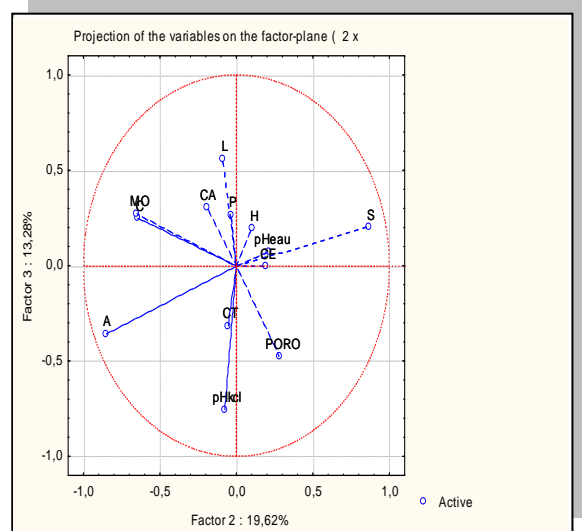
**Figure 202** Projection des cases des facteurs 1 et 2



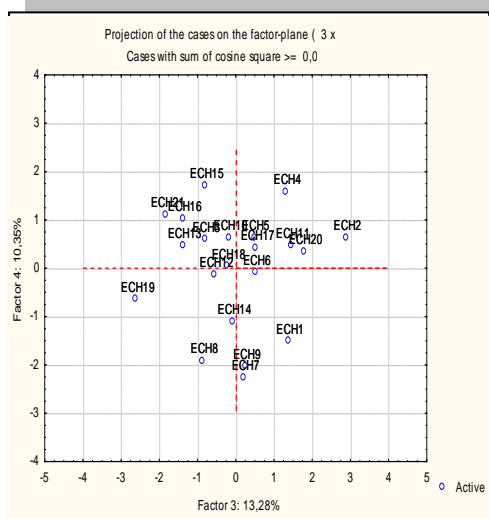
**Figure 203.** Analyse en composantes principales



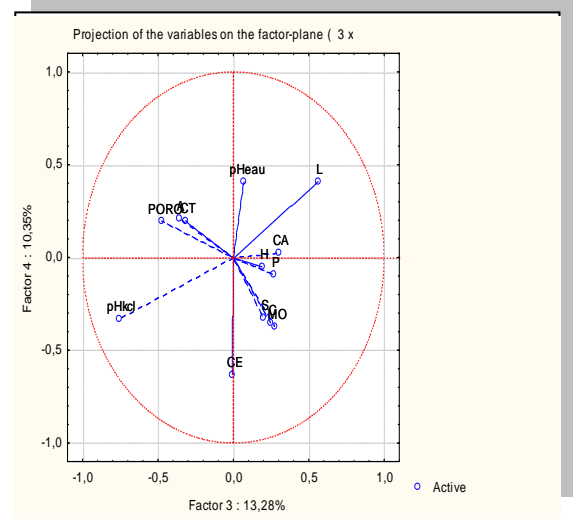
**Figure 204.** Projection des cases des facteurs 2 et 3



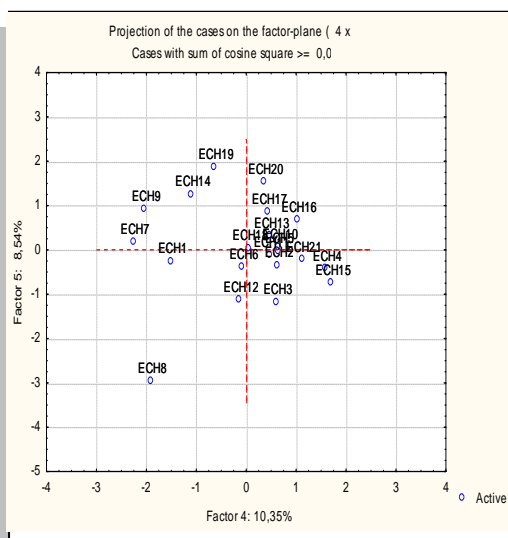
**Figure 205.** Analyse en composantes principales



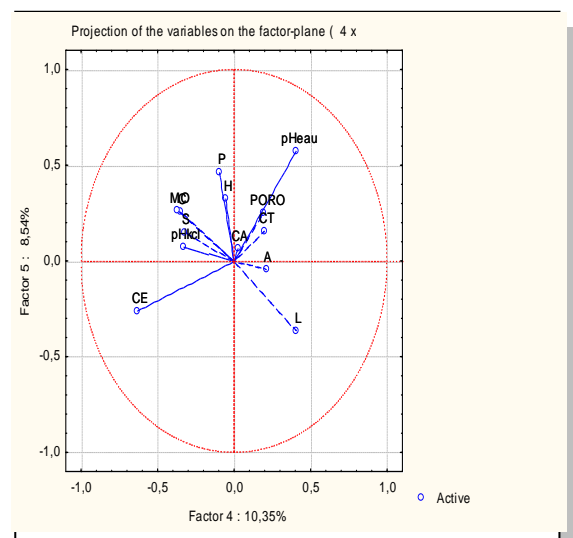
**Figure 206.** Projection des cases des facteurs 3 et 4



**Figure 207.** Analyse en composantes principales

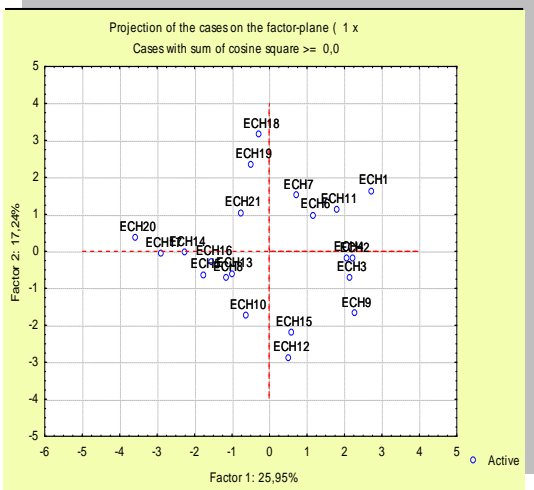


**Figure 208.** Projection des cases des facteurs 4 et 5

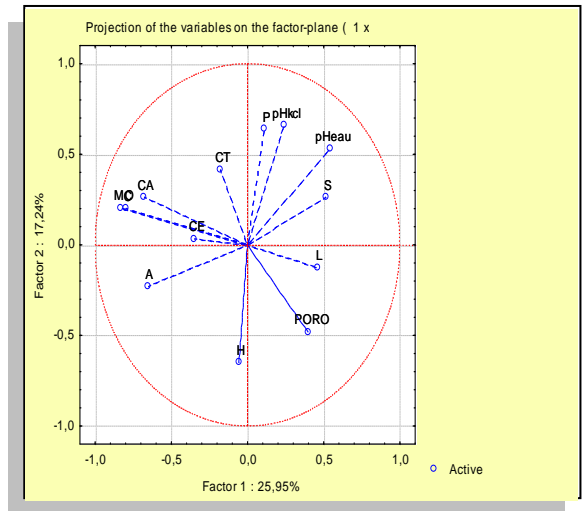


**Figure 209.** Analyse en composantes principales

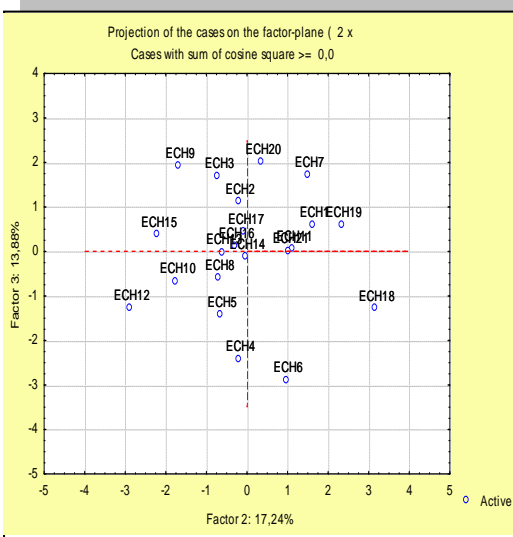
**d)-Analyse en composantes principales (après récolte)**



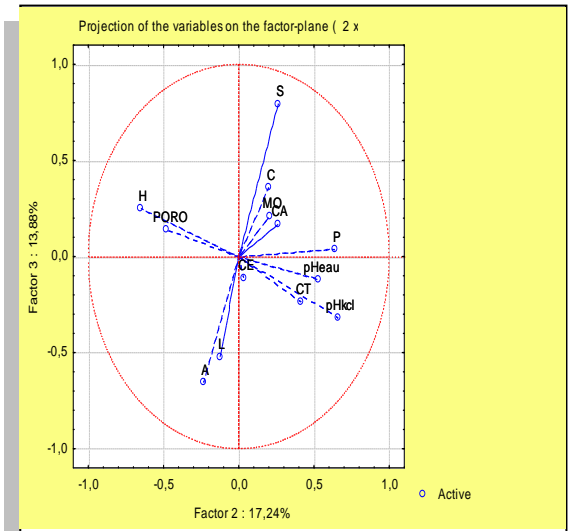
**Figure 210.** Projection des cases des facteurs 1 et 2



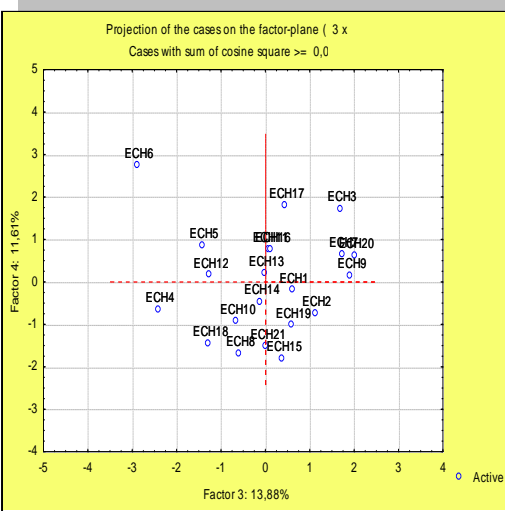
**Figure 211.** Analyse en composantes principales



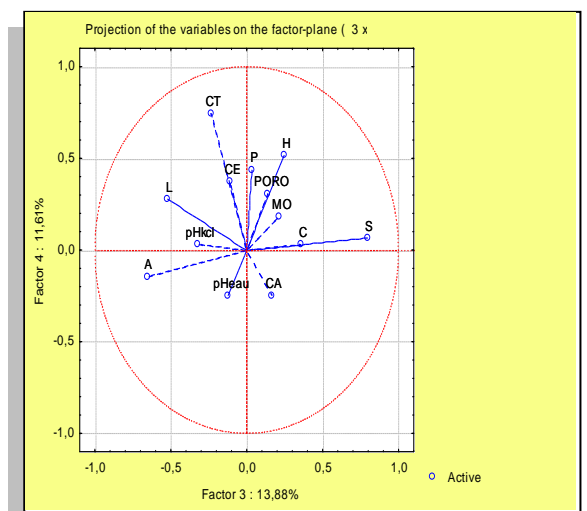
**Figure 212.** Projection des cases des facteurs 2 et 3



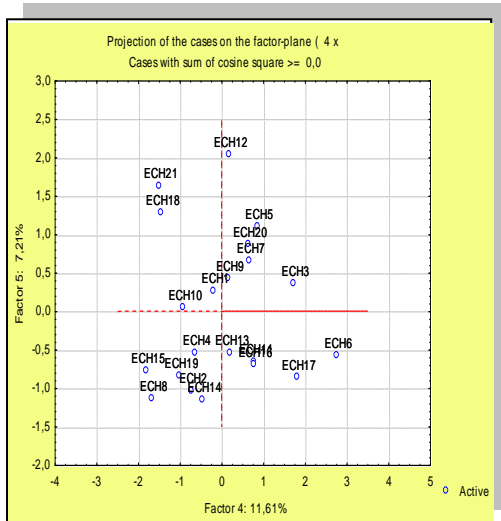
**Figure 213.** Analyse en composantes principales



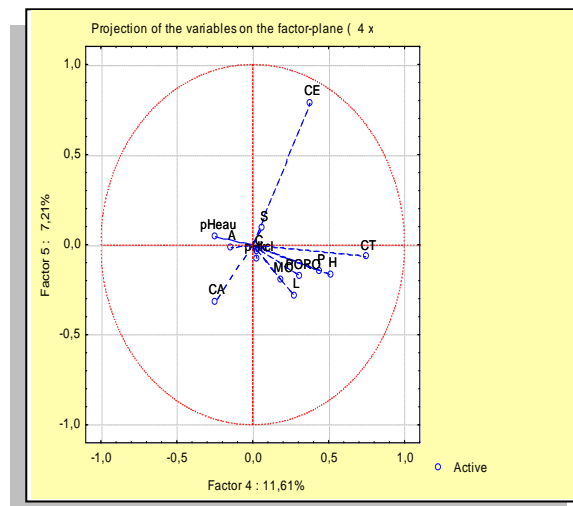
**Figure 214.** Projection des cases des facteurs 3 et 4



**Figure 215.** Analyse en composantes principales



**Figure 216.** Projection des cases des facteurs 4 et 5



**Figure 217.** Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales avant semis, sur l'axe horizontal (30.30%) renseigne sur la présence d'une corrélation positive entre conductivité électrique, porosité, calcaire total, argile et humidité. La même relation entre le pH, matière organique et sable. Alors que sur le deuxième axe (16.90%) la matière organique, calcaire actif et phosphore assimilable sont en corrélation négative avec porosité, pH, conductivité électrique et calcaire total. Sur la troisième composante (14.33%) le phosphore assimilable est en opposition avec la matière organique, le même type de corrélation est enregistré sur le quatrième axe (12.32%). Les figures 188, 190, 192 et 194 mettent en évidence que les blocs témoin, 1 et 6 sont les plus caractéristiques.

L'observation de la figure 197 renseigne sur la corrélation négative entre le pH et l'ensemble du phosphore assimilable, humidité, porosité et matière organique, mais sur le second axe le phosphore assimilable est en corrélation négative avec la matière organique, carbone, calcaire actif et conductivité électrique. Sur la troisième composante, la corrélation est opposée entre pH et conductivité électrique, phosphore assimilable et porosité, conductivité électrique et calcaire actif.

A la lumière des figures 196, 198 et 200, on peut dire que les blocs les plus caractéristiques sont 3 et 4.

Pendant le stade épiaison, sur l'axe horizontal (29.51%), le phosphore assimilable est en corrélation négative avec le  $pH_{\text{eau}}$  et porosité, même sur l'axe vertical (19.62%). Sur la troisième composante (13.28%) la corrélation est positive entre le phosphore et l'ensemble du calcaire actif, conductivité électrique et matière organique. La figure 203 affirme une corrélation négative entre le phosphore et  $pH_{\text{eau}}$  d'une part et porosité d'autre part. L'observation des figures 202, 204, 206 et 208 montrent que le bloc 2 est caractéristique.



Après la récolte, l'analyse en composante principale illustre sur le premier axe (25.95%) que les paramètres sont répartis en deux groupes qui sont corrélés positivement, le premier groupe calcaire total, actif, matière organique, argile, conductivité électrique et l'humidité et le deuxième groupe  $pH_{eau}$ ,  $pH_{KCl}$ , phosphore, sables, limons et porosité. Sur le deuxième axe (17.24%) il est visible que le phosphore assimilable est en corrélation négative avec l'humidité et la porosité. Le phosphore est en opposition avec le  $pH_{eau}$ , cette corrélation est confirmée par l'axe du quatrième facteur (11.61%). Les blocs 2 et 6 sont les plus caractéristiques (figure 210).

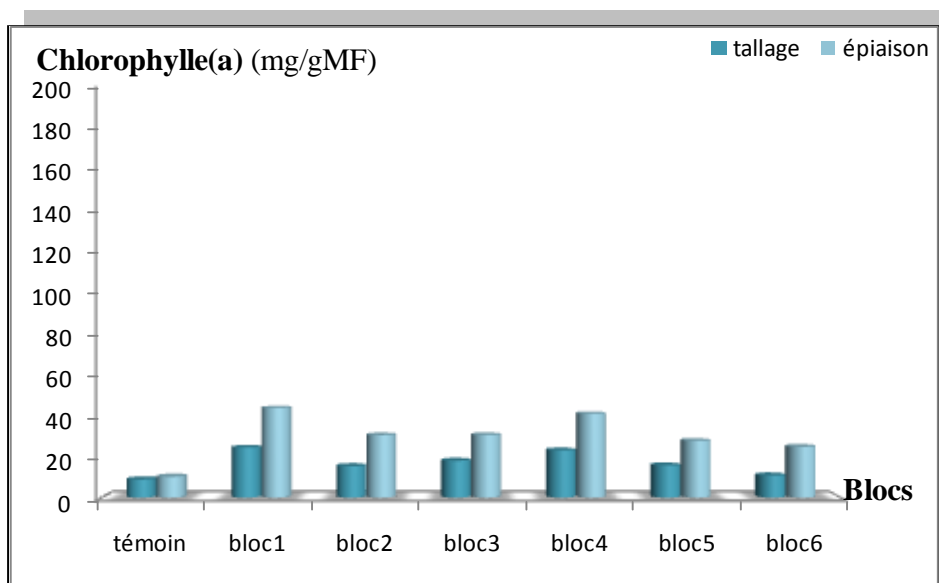
Le phosphore est un des éléments indispensables aux végétaux car il entre dans la constitution de nombreux composés organiques, notamment les acides nucléiques et l'ATP et il favorise le développement des systèmes racinaires des plantes. En outre, son rôle dans la photosynthèse est fondamental, ce processus ne pouvant intervenir sans sa participation dans les réactions biochimiques. C'est pourquoi l'analyse du phosphore des sols est orientée vers l'estimation des quantités disponibles pour les plantes en vue de mettre en œuvre une fertilisation phosphatée. En plus, le phosphore assimilable est en relation avec la texture argileuse où les ions phosphates se fixent. Il se pourrait enfin que les anions phosphoriques précipitent au contact du calcaire actif. Tous ces phénomènes de précipitation et d'adsorption sur les surfaces des minéraux argileux ou des oxy-hydroxydes ont souvent été appelés «rétrogradation» ou «fixation». Inversement, les substances organiques diminuent ce pouvoir fixateur (Dumat, 2009).

## **2.3.2. Caractéristiques physiobiochimiques de la plante**

### **2.3.2.1. Chlorophylle (a)**

La quantité de la chlorophylle (a) durant le tallage est variable d'un bloc à un autre où on trouve la plus élevée au bloc 1 (24.57 mg/g MF), la plus basse au bloc 6 (10,83 mg/g MF), le témoin présente une teneur de 8.86 mg/g MF. La confirmation de cette différence significative entre les traitements 1 et 6 est indiquée par l'étude statistique (tableau 63).

A l'épiaison, ces quantités de la chlorophylle (a) vont augmentées par rapport au stade précédent, mais dans ce cas, on trouve que le bloc 1 présente la plus haute valeur avec 44.10 mg/g MF, et la valeur 25.01 mg/g MF est présentée toujours par le bloc 6 (figure 218). Le test de Kruskal-Wallis montre qu'il existe une différence significative entre le tallage et l'épiaison (tableau 63).



**Figure 218.** Effet du traitement sur la teneur en chlorophylle (a)

**Tableau 63.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Chlorophylle a)

	H	P
<b>Chl (a) 1</b>	15.65368	0.0157
<b>Chl (a) 2</b>	10.94372	0.0901
<b>Comparaison entre prélèvements</b>		
<b>Chl (a) 1</b>	6.848371	0.0089
<b>Chl (a) 2</b>		

**Chl (a) 1 :** Chlorophylle (a) au tallage

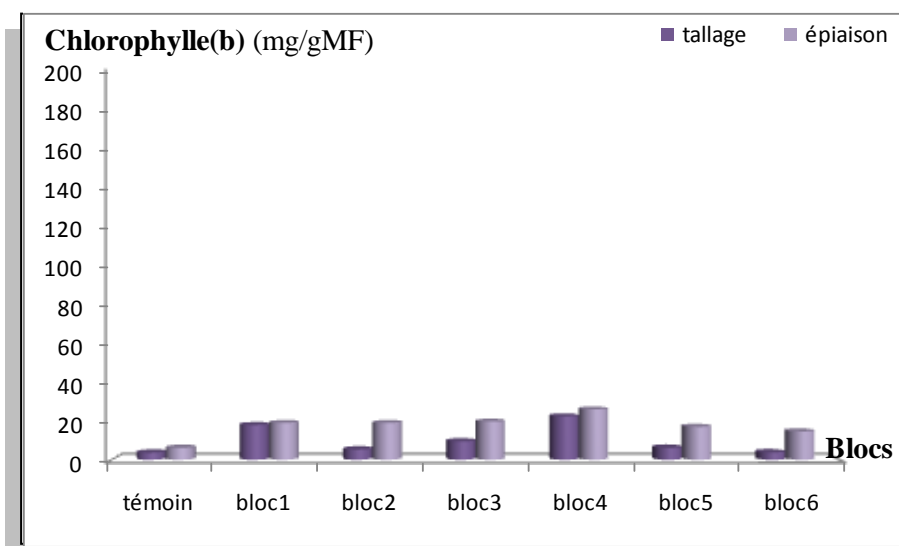
**Chl (a) 2 :** Chlorophylle (a) à l'épiaison

### 2.3.2.2. Chlorophylle (b)

Les quantités de la chlorophylle (b) sont inférieures à ceux de la chlorophylle (a). La chlorophylle (b) est un pigment très important au déroulement de la photosynthèse. Au tallage on enregistre des quantités variables de ce type de pigment où on trouve la plus faible quantité (3.82 mg/g MF) au niveau du bloc 6 et 22.56 mg/g MF comme plus haute au bloc 4.

Les quantités deviennent plus importantes au deuxième stade phénotypique de *Triticum durum*, le bloc 4 garde la grande valeur 26.17 mg/g (figure 219).

L'analyse statistique révèle absence de différence significative entre les doses. Cependant il existe une différence hautement significative entre les deux stades de prélèvements (tableau 64).



**Figure 219.** Effet du traitement sur la teneur en chlorophylle (b)

**Tableau 64.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Chlorophylle b)

	H	P
<b>Chl (b) 1</b>	11.85185	0.0369
<b>Chl (b) 2</b>	11.63416	0.0402
<b>Comparaison entre prélèvements</b>		
<b>Chl (b) 1</b>		
<b>Chl (b) 2</b>	4.522828	0.0334

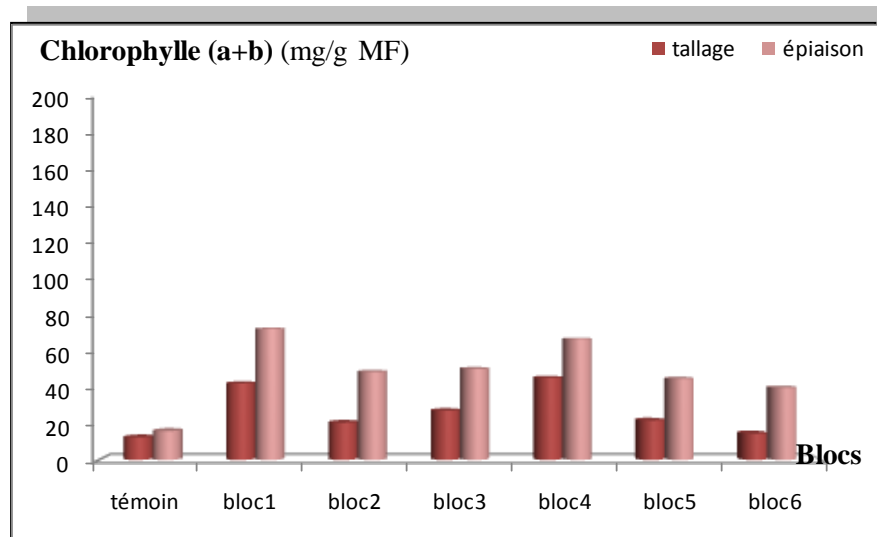
**Chl (b) 1 :** Chlorophylle (b) au tallage

**Chl (b) 2 :** Chlorophylle (b) à l'épiaison

### 2.3.2.3. Chlorophylle (a+b)

La chlorophylle (a+b) est le principal pigment assimilateur des végétaux photosynthétiques. Les résultats obtenus pour la chlorophylle (a+b) montrent une variabilité entre les blocs (figure 220). On a enregistré la quantité la plus élevée au niveau du bloc 1 (73.17 mg/g MF).

Le test de Kruskal-Wallis montre l'absence d'une différence significative entre les doses. Le même test appliqué sur les stades de prélèvements indique qu'il existe une différence significative entre eux (tableau 65).



**Figure 220.** Effet du traitement sur la teneur en chlorophylle (a+ b)

**Tableau 65.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Chlorophylle a+b)

	H	P
<b>Chl (a+b) 1</b>	14.038398	0.229
<b>Chl (a+b) 2</b>	11.7558	0.0676
<b>Comparaison entre prélèvements</b>		
<b>Chl (a+b) 1</b>		
<b>Chl (a+b) 2</b>	5.835298	0.0157

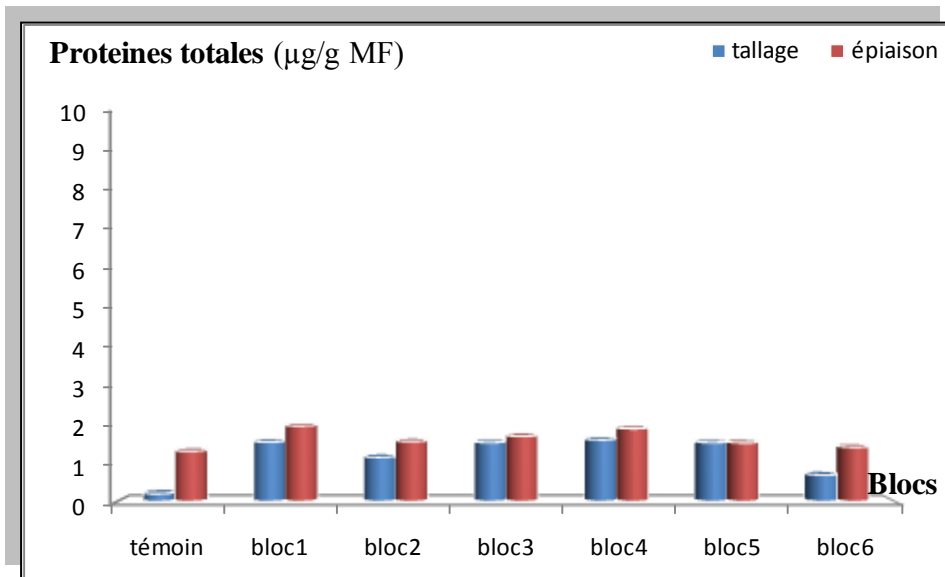
**Chl (a+b) 1 :** Chlorophylle (a+b) au tallage

**Chl (a+b) 2 :** Chlorophylle (a+b) à l'épiaison

#### 2.3.2.4. Protéines totales

Les protéines totales se présentent avec des faibles quantités par rapport aux chlorophylles. Au tallage, cette matière organique montre une moyenne de 1.17  $\mu\text{g/g}$  MF. La plus haute valeur au bloc 1 (1.54  $\mu\text{g/g}$  MF) et la plus faible au niveau du bloc 6 (0.69  $\mu\text{g/g}$  MF), mais cette faible quantité est importante par rapport au témoin (0.20  $\mu\text{g/g}$  MF). Une légère augmentation des quantités des protéines totales est remarquable à l'épiaison (figure 221)

Aucune différence significative entre les médianes des traitements ou entre les prélèvements n'est enregistrée après une analyse statistique où le  $P \geq 0,001$  (tableau 66).



**Figure 221.** Effet du traitement sur la teneur en protéines totales

**Tableau 66.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Proteines Total)

	H	P
<b>PT1</b>	4.492094	0.6104
<b>PT 2</b>	5.160173	0.5234
<b>Comparaison entre prélèvements</b>		
<b>PT1</b>		
<b>PT2</b>	3.147015	0.0761

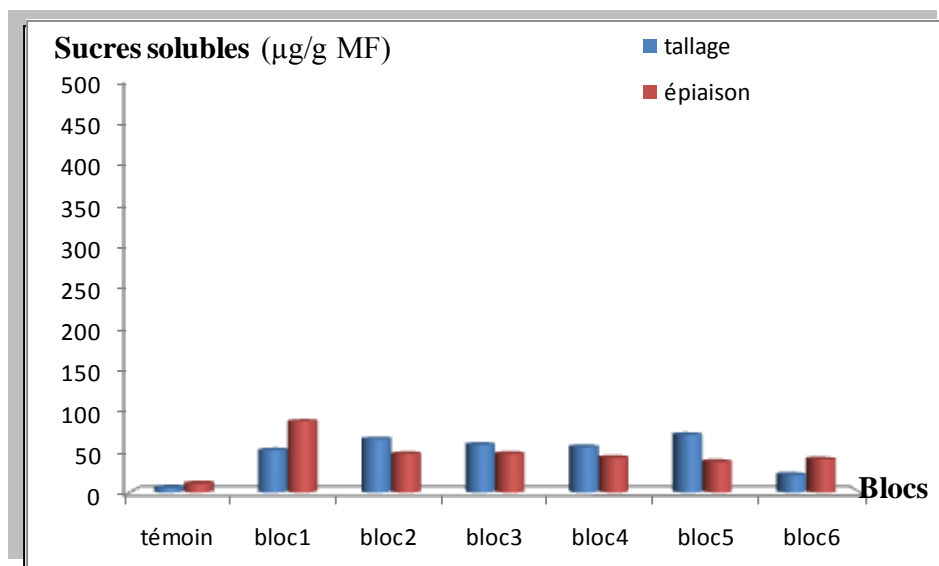
**PT1 :** Proteines totales au tallage

**PT2 :** Proteines totales à l'épiaison

### 2.3.2.5. Sucres solubles

Les sucres solubles constituent une source glucidique rapidement métabolisable et couvrent les besoins immédiats de la plante. Ce sont des intermédiaires métaboliques qui sont également une forme de transport et qui peuvent être, dans certains cas, considérés comme une forme de stockage. Ainsi, le saccharose, sucre soluble majoritaire de la plupart des espèces, contribue largement au stockage hivernal en s'accumulant dans les vacuoles. Son accumulation est initiée par une baisse des températures hivernales et contribue à augmenter la résistance au froid, la température de congélation s'abaisse suite à l'augmentation de la pression osmotique donnant au sorbitol un rôle cryoprotecteur des membranes et des protéines cellulaires (Siminovitch *et al.*, 1953 ; Sauter *et al.*, 1987 ; Pallonen *et al.*, 1999 & Libbey, 2003) ; de faibles quantités des sucres solubles sont élaborés par les plantules de blé. Durant le premier prélèvement, le bloc 5 montre la plus haute valeur (71.3 µg/g MF), alors qu'au deuxième le bloc 1 avec 87.68 µg/g MF (figure 222).

Après une analyse statistique, il n'y a pas de différence significative entre les traitements et entre les deux stades de prélèvements (tableau 67).



**Figure 222.** Effet du traitement sur la teneur en sucres solubles

**Tableau 67.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Sucres Solubles)

	H	P
S 1	4.370804	0.6266
S 2	4.058913	0.6687
<b>Comparaison entre prélèvements</b>		
S 1		
S 2	1.855346	0.1732

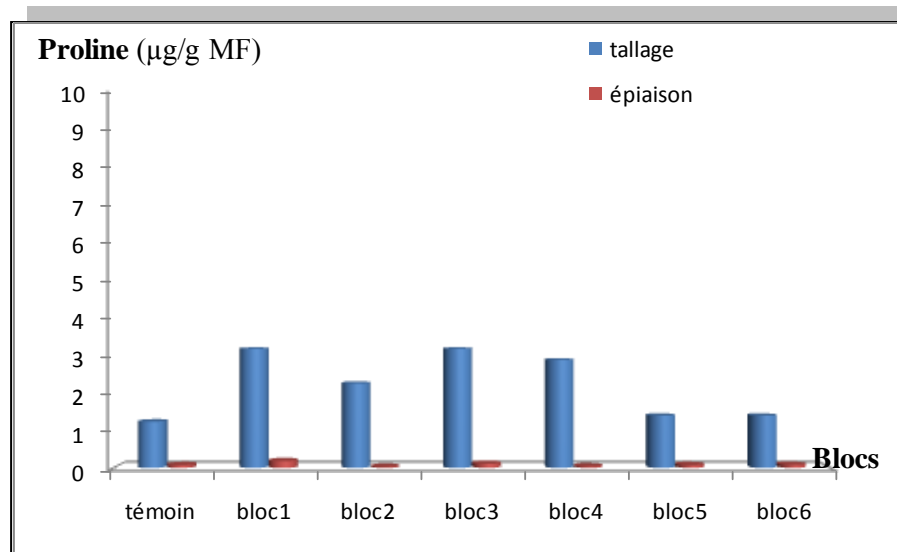
S 1 : Sucres solubles au tallage  
S 2 : Sucres solubles à l'épiaison

### 2.3.2.6. Proline

La proline est un osmoticum qui s'accumule dès que la plante est en phase d'une contrainte qui perturbe le fonctionnement de son cycle. La quantité dans les plantules des blocs de notre parcelle expérimentale au tallage donne une moyenne de 2,23 µg/g MF, alors que la quantité la plus élevée 3,2 µg/g MF est représenté par le bloc 3, mais les blocs 5 et 6 enregistrent 1,4 µg/g MF comme la plus faible quantité.

A l'épiaison, les teneurs diminuent de l'ordre d'1/3 par rapport au tallage où on enregistre des valeurs qui ne dépassent pas 1µg/g MF (figure 223). L'explication de l'accumulation de la proline est différente selon les auteurs (Valentovic *et al.*, 2006), certains comme Hanson *et al.* (1977) affirment que c'est une

conséquence pathologique, d'autres comme Stewart et Lee (1974) suggèrent que la proline à des fortes concentrations agit comme soluté pour l'ajustement osmotique ; cette dernière pourrait, également intervenir dans la régulation du pH cytoplasmique (Pesci et Beffagna, 1984) ou pour servir de réservoir de composés azotés et de carbone pour utilisation ultérieure dans la croissance. Selon Wilfred (2005), la capacité d'accumuler la proline chez les plantes est un facteur variétal et un signe de tolérance au stress. Le test de Kruskal-Wallis montre une absence de différence significative entre les doses, cependant elle existe entre les deux stades de prélèvements (tableau 68).



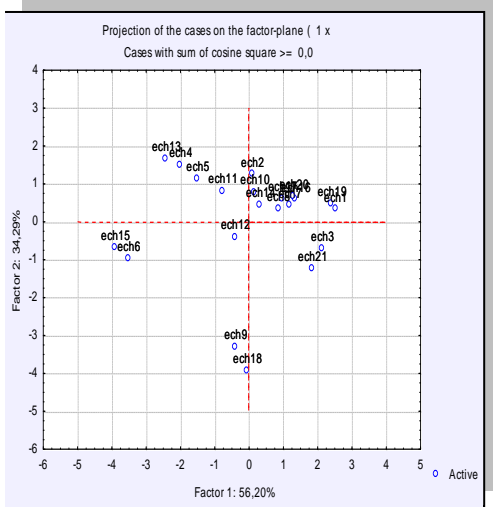
**Figure 223.** Effet du traitement sur la teneur en proline

**Tableau 68.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Proline)

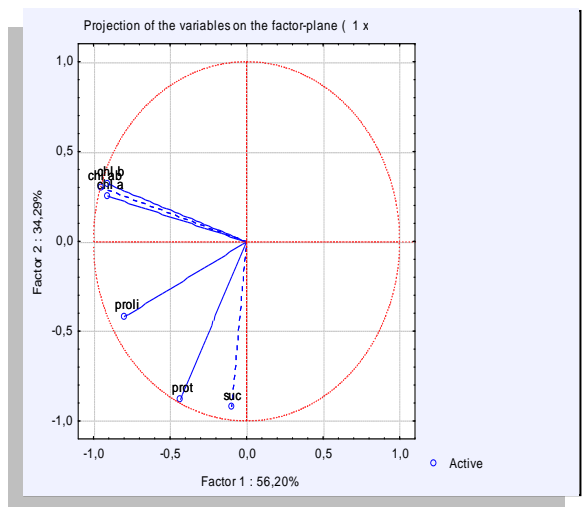
	H	P
<b>PR 1</b>	13.11660	0.0412
<b>PR 2</b>	3.134199	0.7958
<b>Comparaison entre prélèvements</b>		
<b>PR 1</b>		
<b>PR 2</b>	8.016163	0.0046

**PR 1** : Proline au tallage  
**PR 2** : Proline à l'épiaison

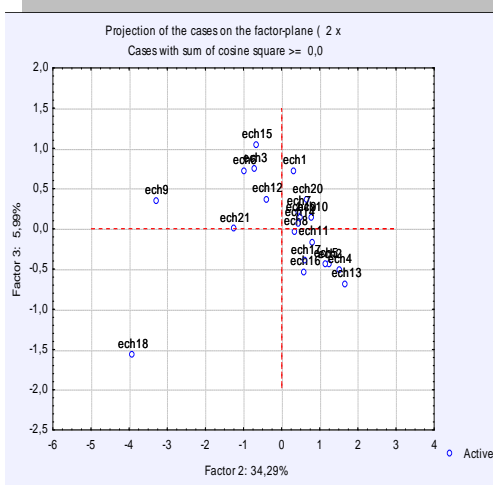
### a)- Analyse en composantes principales au tallage



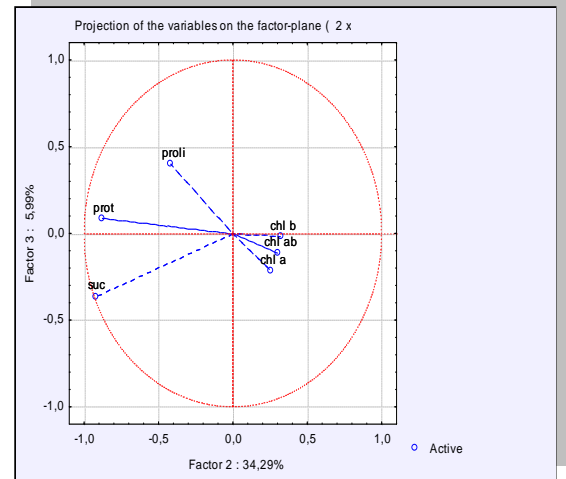
**Figure 224.** Projection des cases des facteurs 1et 2



**Figure 225.** Analyse en composantes principales

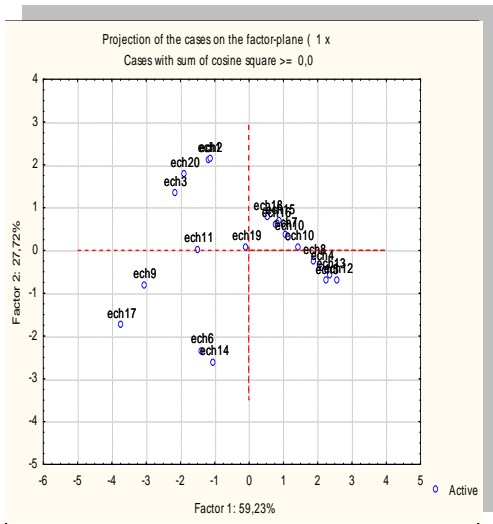


**Figure 226.** Projection des cases des facteurs 2 et 3

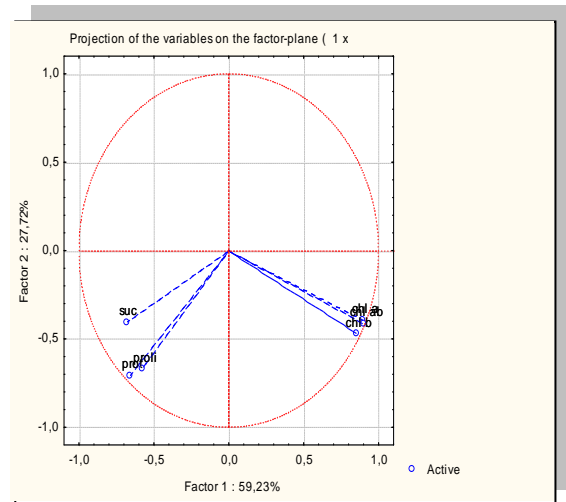


**Figure 227.** Analyse en composantes principales

### b) Analyse en composantes principales à l'épiaison

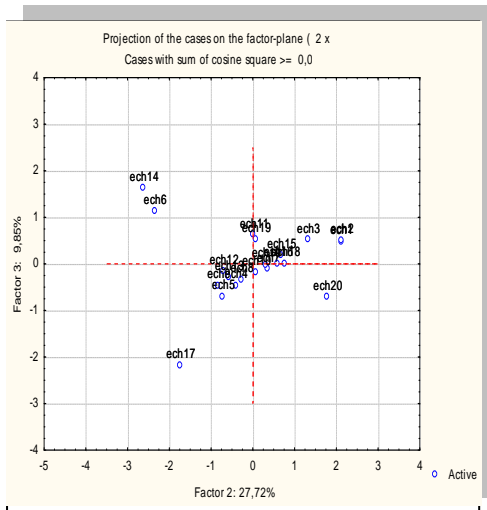


**Figure 228.** Projection des cases des facteurs 1et 2

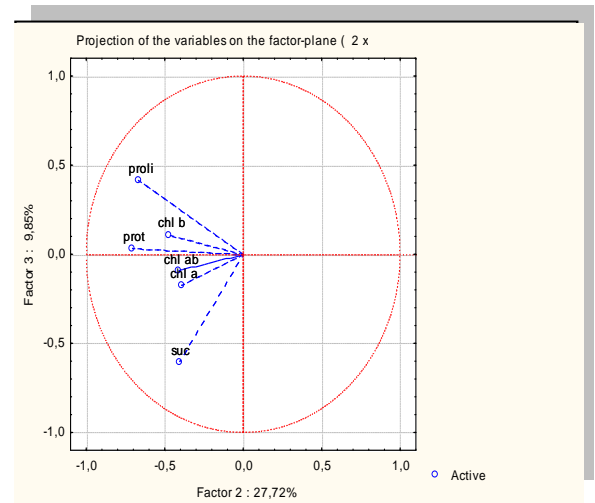


**Figure 229.** Analyse en composantes principales





**Figure 230.** Projection des cases des facteurs 2 et 3



**Figure 231.** Analyse en composantes principales

Sur le premier axe horizontal (56.20%), les paramètres physiobiochimiques sont en corrélation positives, par ailleurs sur l'axe vertical les trois types de chlorophylle sont opposés aux autres. La même remarque l'épiaison, et sur le premier axe, par contre sur le deuxième tous les paramètres sont en corrélation positive (figure 227). En ce qui concerne les blocs caractéristiques, on observe bien la présentation du bloc 5 pour les deux stades.

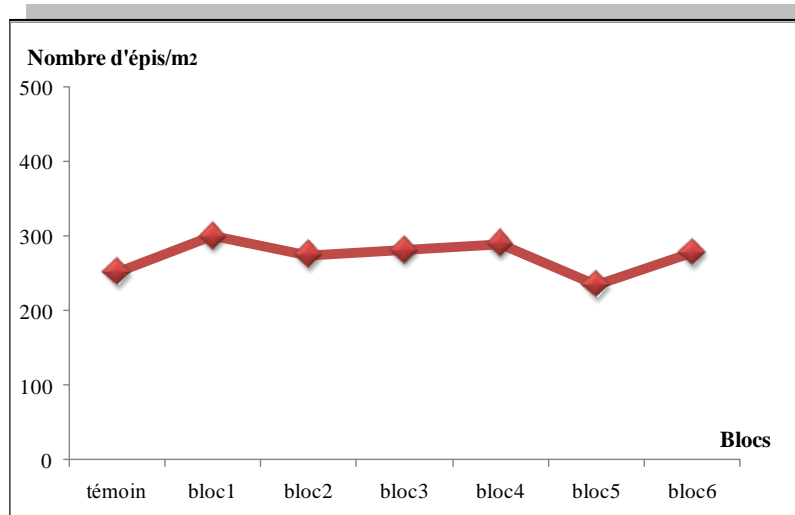
L'élaboration des matières organiques et l'accumulation de proline dans les tissus, une des stratégies de tolérances vis-à-vis de traitements, ce qui indique que le *Triticum durum* est une plante résistante aux conditions du milieu (Zerrad *et al.*, 2014).

### 2.3.3. Paramètres agronomiques

#### 2.3.3.1. Nombre d'épi / m<sup>2</sup>

Le nombre d'épis/m<sup>2</sup> de *Triticum durum* dans tous les blocs ne dépassent pas 300 épis/m<sup>2</sup>. La plus haute valeur 300 épis / m<sup>2</sup> est au niveau du bloc 1, alors que la plus faible valeur 235 épis / m<sup>2</sup> est au niveau du bloc 5 (figure 232).

Le test de Kruskal-Wallis indique la présence d'une différence très hautement significative entre les doses appliquées sur les blocs 2 et 5, ce dernier et le bloc 3 (tableau 69).



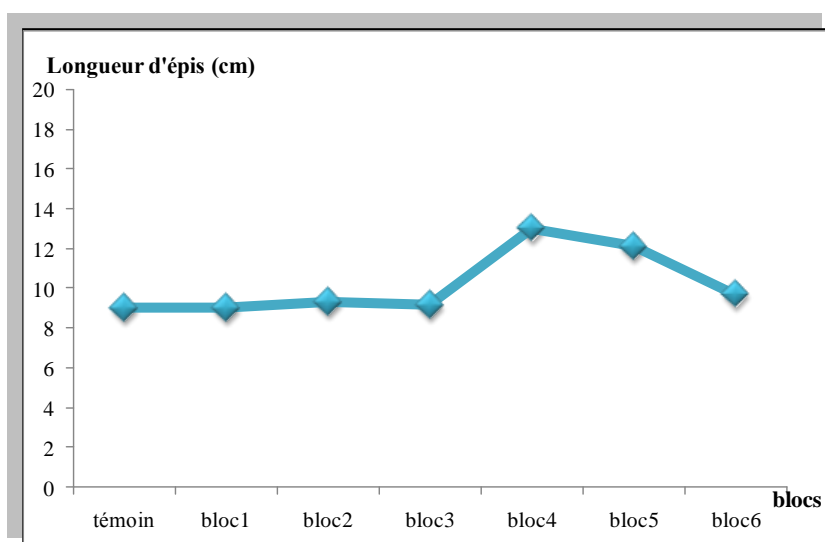
**Figure 232.** Effet du traitement sur le nombre d'épis / m<sup>2</sup>

**Tableau 69.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Nombre d'épi / m<sup>2</sup>)

	H	P
Nombre d'épi / m <sup>2</sup>	15.65729	0.0157

### 2.3.3.2. Longueur d'épis

La longueur d'épis des plantes est variable sauf au niveau des blocs 1 et témoin où on note le même résultat 9 cm, alors que le bloc 5 présente la valeur la plus élevée 12.1 cm (figure 233). L'analyse statistique montre qu'il existe une différence significative entre les blocs 2 et 5, 5 et 3 (tableau 70).



**Figure 233.** Effet du traitement sur la longueur d'épis

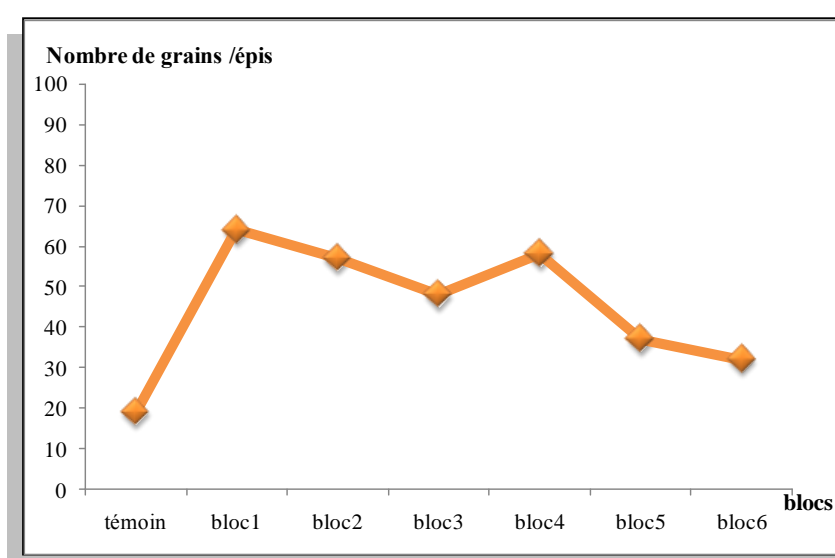
**Tableau 70.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Longueur d'épi)

	H	P
Longueur d'épi	15.65729	0.0157

### 2.3.3.3. Nombre de grain /épis

Concernant le nombre de grains par épi, le bloc 1 avec la valeur 64 présente le résultat le plus intéressant par rapport aux autres blocs traités et le bloc témoin (figure 234).

L'étude statistique indique l'existence d'une différence significative entre les traitements 2 et 5, 5 et 3 (tableau 71).



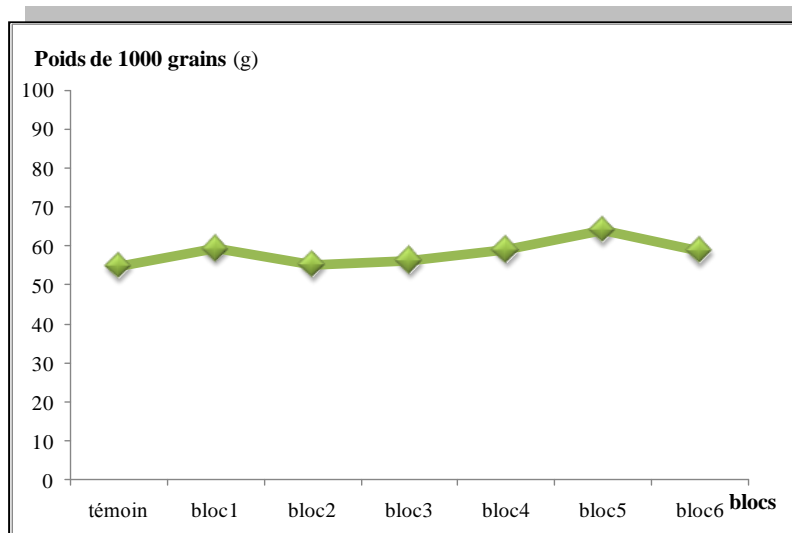
**Figure 234.** Effet de traitement sur le nombre de grains / épis

**Tableau 71.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Nombre de grain /épis)

	H	P
Nombre de grain /épis	15.65729	0.0157

### 2.3.3.4. Poids de 1000 grains

Les traitements effectués montrent que les valeurs du poids de 1000 grains au niveau de tous les blocs traités sont très proches, et le bloc 5 donne le poids le plus important 64.01 g. Le test des médianes renseigne sur l'existence d'une différence significative entre les blocs 2 et 5, 5 et 3 (tableau 72).



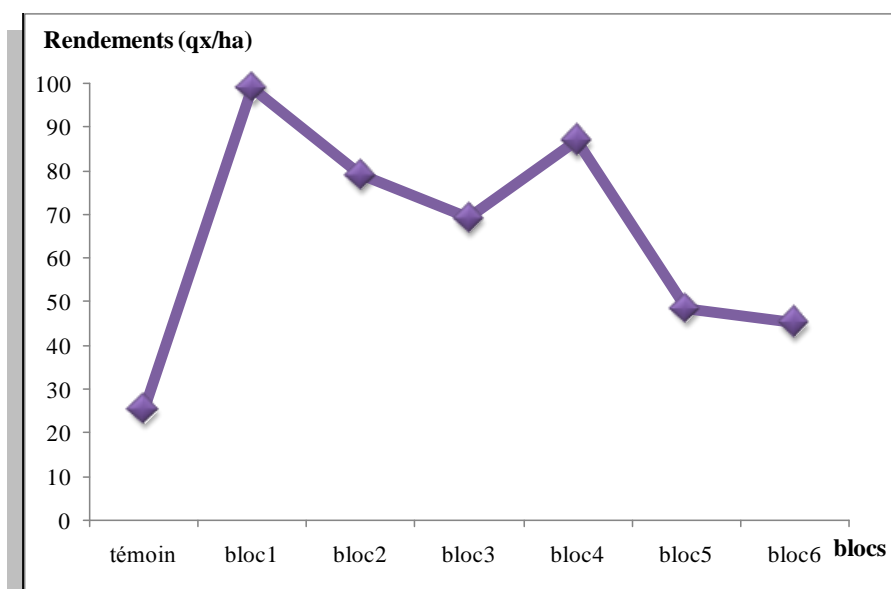
**Figure 235.** Effet de traitement sur le poids de 1000 grains

**Tableau 72.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Poids de 1000 grains)

	H	P
Poids de 1000 grains	15.65729	0.0157

### 2.3.3.5. Rendement (qx/h)

Le rendement des plantes étudiées est variable selon les blocs. On note une moyenne de 66,66 qx/ha, le bloc 1 montre le rendement le plus important 98,95 qx/ha ; le bloc témoin donne le rendement le plus faible (25,12 qx/h) (figure 236). Le test de Kruskal-Wallis note la présence d'une différence hautement significative entre le bloc 1 et le témoin (tableau 73).

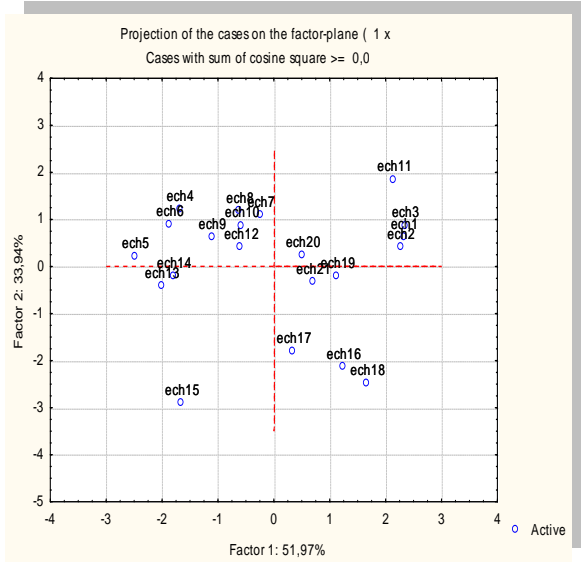


**Figure 236.** Effet de traitement sur le rendement

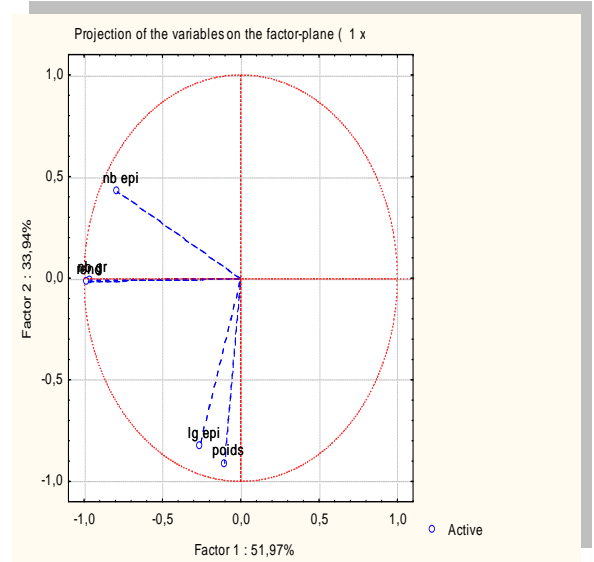
**Tableau 73.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Rendements)

	H	P
Rendements	17.19481	0.0086

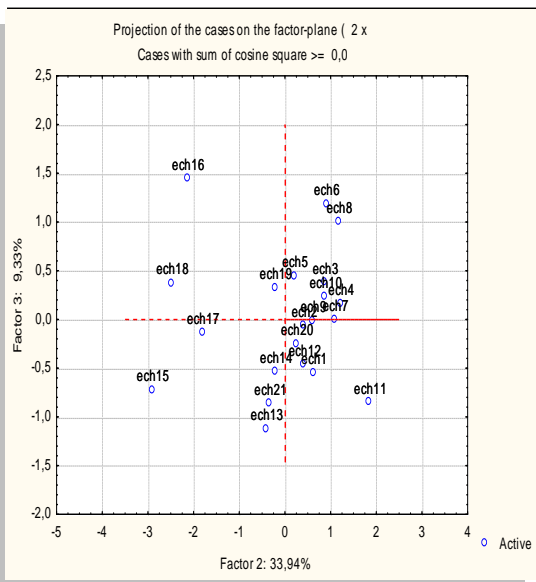
**a)- Analyse en composantes principales**



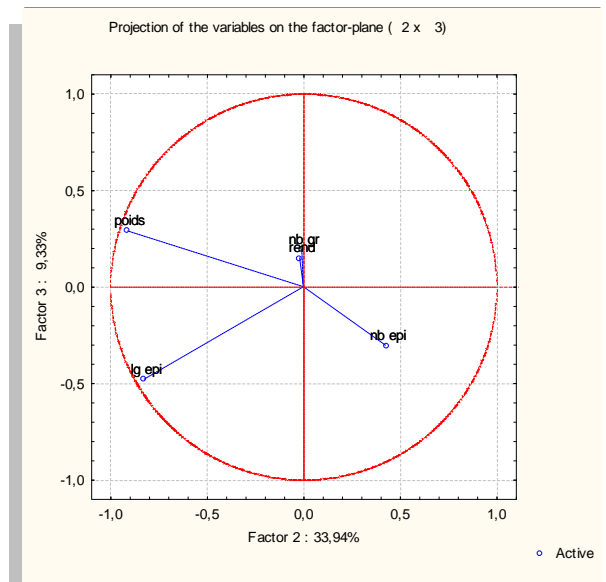
**Figure 237.** Projection des cases des facteurs 1 et 2



**Figure 238.** Analyse en composantes principales



**Figure 240.** Projection des cases des facteurs 2 et 3



**Figure 241.** Analyse en composantes principales

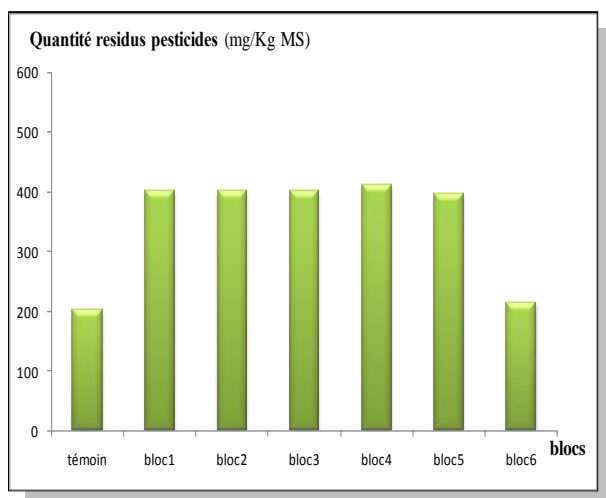
L'analyse en composantes principales fait sortir que sur le premier axe, les paramètres agronomiques étudiés sont en corrélation positive. Le deuxième axe explique 33.94 % de la variance totale, on trouve que le poids de 1000 grains est en corrélation négative avec le nombre d'épis/ m<sup>2</sup>. La projection des sous parcelles montre que les blocs 4 et 5 sont importants.

Le rendement de cette année est plus élevé par rapport à l'année précédente, ce qui traduit l'amélioration des conditions du milieu (climatiques et édaphiques). Le transfert des sucres solubles stockés dans le pédoncule de l'épi est un facteur important. L'accumulation des sucres pendant la pré-anthèse contribue à raison de 13 à 70 % au rendement en grains. Sous stress, le pédoncule de l'épi représente un site de stockage des réserves d'assimilés en vue d'un meilleur remplissage des grains, ces sucres accumulés proviennent de l'hydrolyse des réserves d'amidon des racines. Le rendement, sous système de culture pluviale est la résultante de la durée, la vitesse de remplissage et la capacité de translocation des assimilés stockés dans la tige. Sous de telles conditions de production, le poids des grains atteint rarement leur valeur maximale, d'où une baisse du rendement en grains (Abbassenne *et al.*, 1998). Les résultats de nos travaux sont en concordance avec ceux réalisés par bahlouli *et al.*, (2008) qui ont travaillé sur 5 variétés de blé dur au niveau de l'ITGC de Sétif.

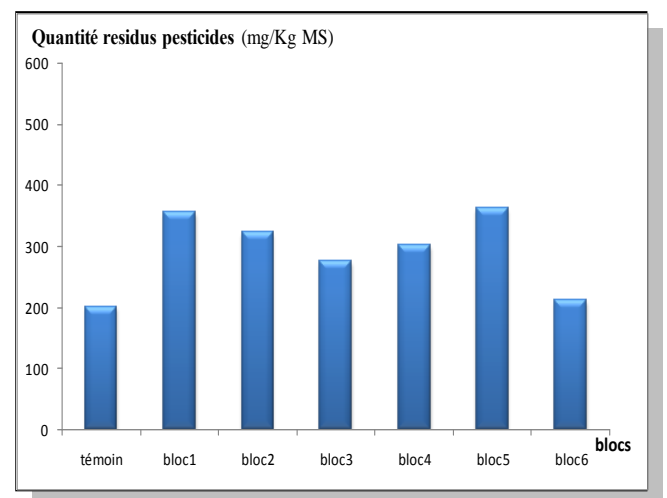
### 2.3.4. Dosage des pesticides

Durant le tallage, le bloc témoin qui n'a reçu aucune dose d'engrais phosphaté a donné la plus faible quantité de résidus dans le sol (200 mg/kg MS). Le bloc 4 avec 454 mg/kg MS (figure 223).

Pour le test des médianes, aucune différence significative n'est trouvée entre les blocs. Par contre, au niveau des deux stades de prélèvements, il existe une différence significative (tableau 74).



**Figure 242.** Effet de traitement la quantité des résidus de pesticides au tallage



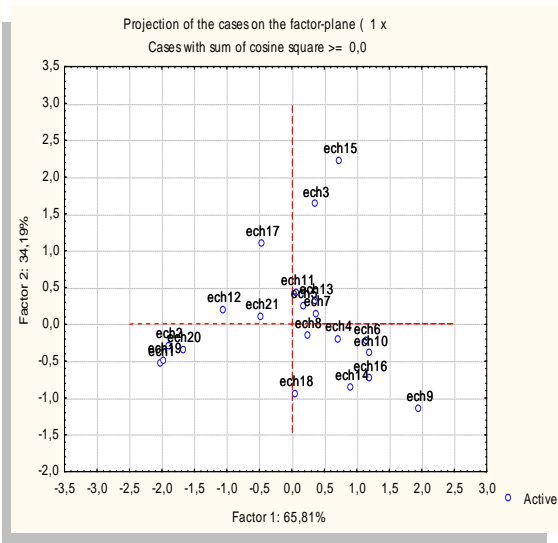
**Figure 243.** Effet de traitement la quantité des résidus de pesticides à l'épiaison

**Tableau 74.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Résidus pesticides)

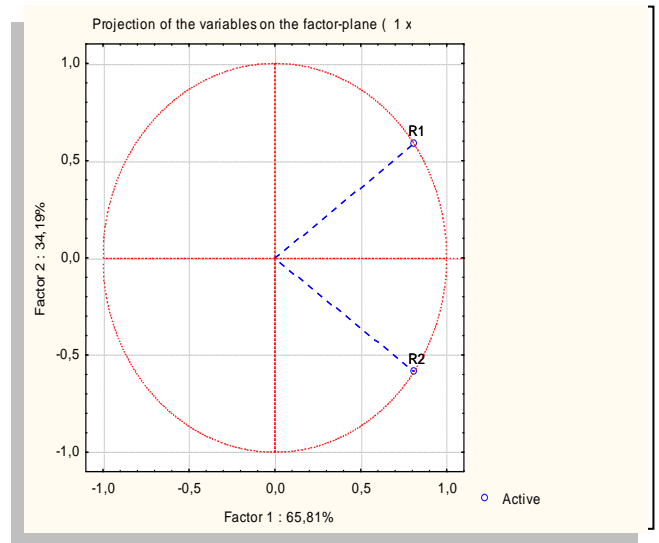
	H	P
Résidus 1	6.692658	0.3502
Résidus 2	12.41558	0.0533
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
Résidus 1	4.523195	0.0334
Résidus 2		

**Résidus 1 :** Résidus pesticides au tallage  
**Résidus 2 :** Résidus pesticides à l'épiaison

**a)- Analyse en composantes principales**



**Figure 244.** Projection des cases des facteurs 1et 2

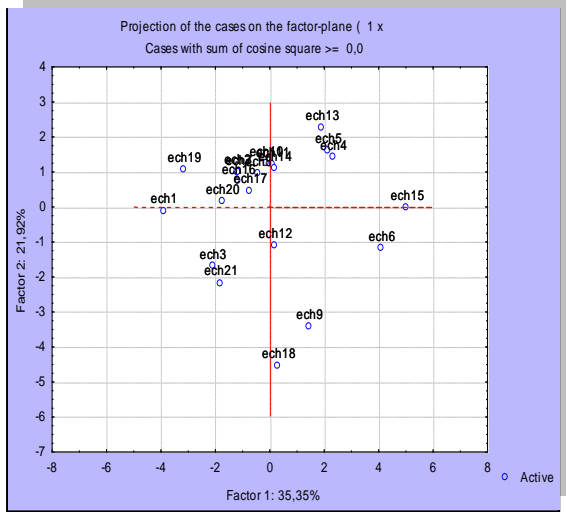


**Figure 245.** Analyse en composantes principales

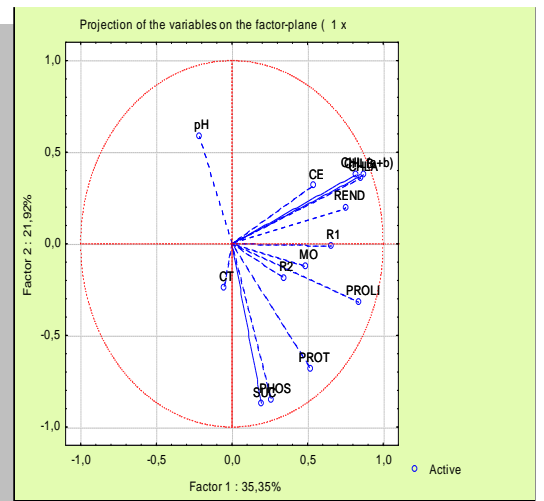
Les quantités des résidus durant les deux prélèvements sur le premier axe (65.81%) sont en corrélation positive, ce qui n'est pas le cas sur le deuxième axe (34.19%). Le bloc 4 est caractéristique (figure 244).

Les quantités de résidus de pesticides dans le sol pour cette campagne sont plus importantes que la campagne 2010-2011, ce qui indique que la texture argileuse possède une grande capacité de rétention et accumulation des résidus malgré les phénomènes de dégradation durant les deux stades : tallage et épiaison (Rasmussen, 2001 & McCurdy *et al.*, 2008).

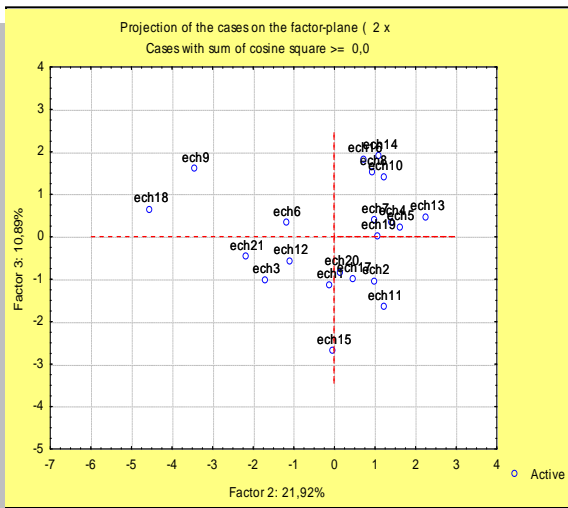
**b) Analyse en composantes principales (paramètres confondus au tallage)**



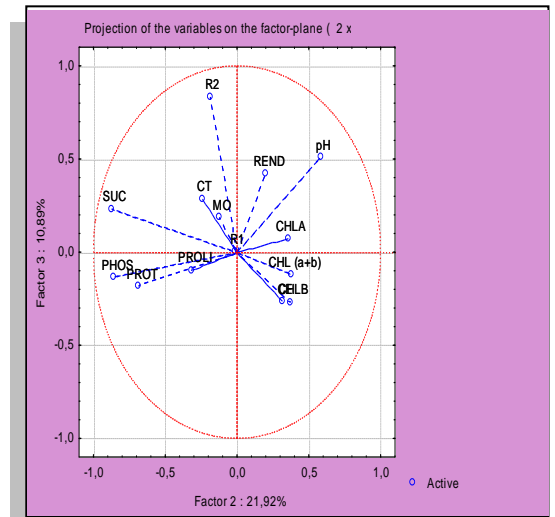
**Figure 246.** Projection des cases des facteurs 1et 2



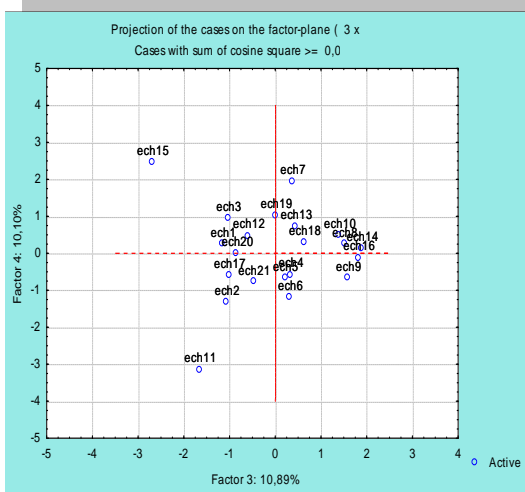
**Figure 247.** Analyse en composantes principales



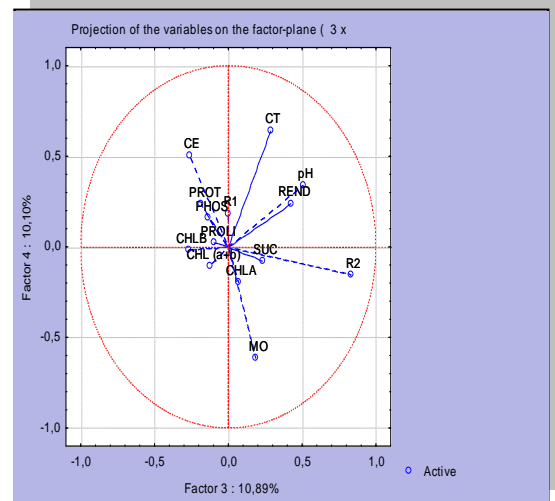
**Figure 248.** Projection des cases des facteurs 2 et 3



**Figure 249.** Analyse en composantes principales

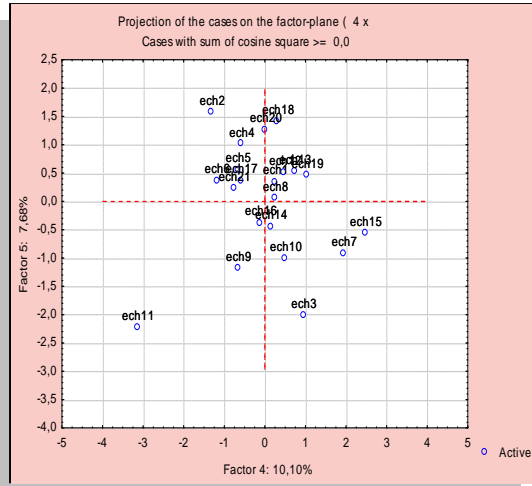


**Figure 250.** Projection des cases des facteurs 3 et 4

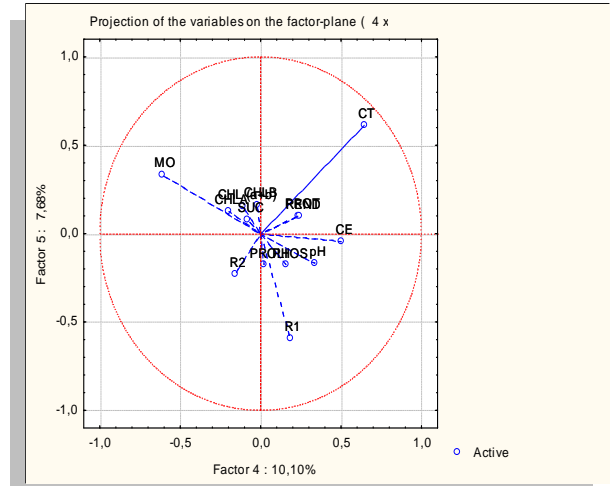


**Figure 251.** Analyse en composantes principales



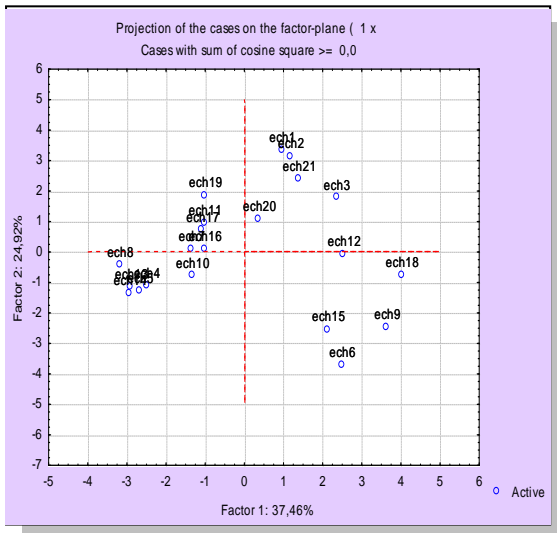


**Figure 252.** Projection des cases des facteurs 4 et 5

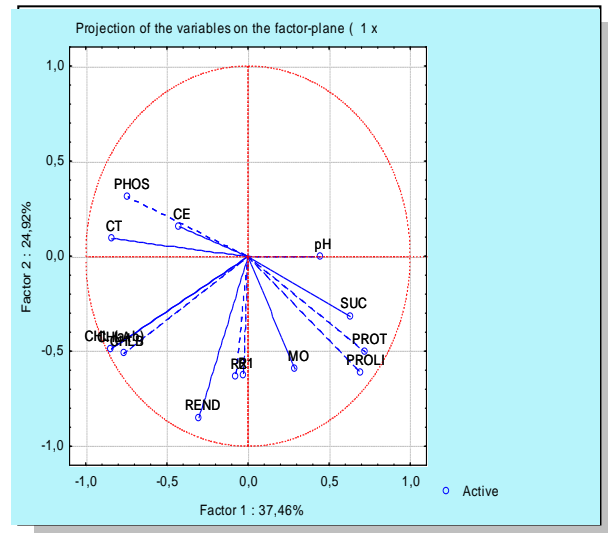


**Figure 253.** Analyse en composantes principales

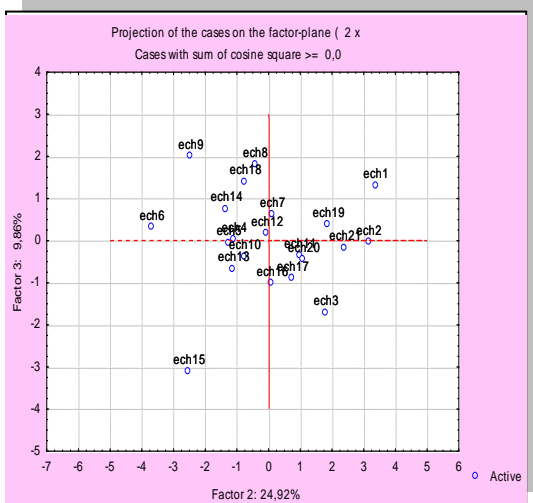
**c) Analyse en composantes principales (paramètres confondus à l'épiaison)**



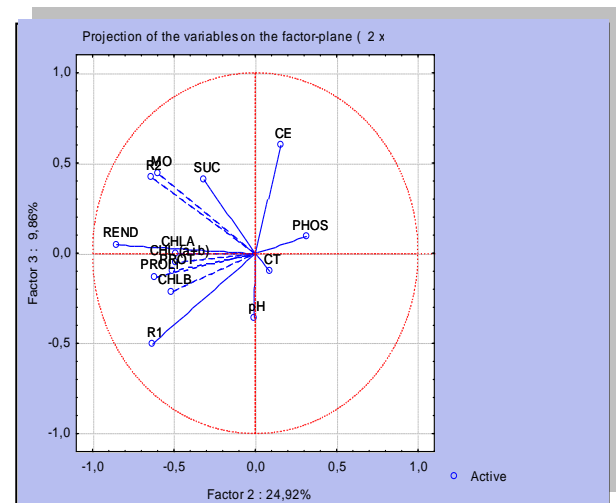
**Figure 254.** Projection des cases des facteurs 1 et 2



**Figure 255.** Analyse en composantes principales



**Figure 256.** Projection des cases des facteurs 2 et 3



**Figure 257.** Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales des paramètres confondus au tallage et sur l'axe horizontale (35,35%) présente une corrélation positive entre rendement, chlorophylle, résidus et caractéristiques du sol sauf le pH (figure 247). sur le deuxième axe (21,92 %), la chlorophylle est en corrélation négative avec sucres solubles, proline, protéines totales et résidus et positive avec le pH. Les axes 3 et 4 représentant 10,89 % et 10,10% montrent que la matière organique, calcaire total et résidus sont les paramètres caractéristiques.

A l'épiaison, et sur l'axe vertical (37,46 %), les sucres solubles, protéines totales, proline, pH, matière organique sont négativement corrélés avec la chlorophylle, rendement et résidus (figure 255). Sur l'axe horizontal (24,92 %) le phosphore assimilable, pH, conductivité électrique corrélés négativement avec le reste des paramètres étudiés (figure 257).

Des travaux ont montré que ces résidus pouvaient être remobilisés notamment via la modification physicochimique des composantes du sol ou encore via l'action des micro-organismes (Khan, 1982). La remise en circulation des résidus serait un phénomène lent qui aboutirait soit à leur minéralisation et/ou à leur réincorporation dans l'humus ou à leur relargage dans la solution du sol évoquant un possible transfert en profondeur. La stabilisation des pesticides (ou de leurs métabolites) peut par conséquent permettre leur neutralisation vis-à-vis d'un éventuel transfert vers les eaux de surface ou profondes. Cependant, elle ne garantit pas leur élimination définitive n'étant possible qu'après minéralisation (Guimont, 2005 & Serra, 2015). La qualité de la matière organique influencerait également la rétention des résidus sur le sol (Benoît *et al.*, 1999).

## **Conclusion**

La campagne 2011-2012 caractérisée par une variation saisonnière de pH, des sols non salins et des teneurs en phosphore assimilables plus élevées que les campagnes (2009-2010 et 2010-2012) pratiquement au niveau des blocs qui ont reçu les doses 92 unités et 25 unités de superphosphate.

Les doses 92 unités, 60 unités, 25 unités et 30 unités de phosphore donnent les meilleurs rendements mais avec faibles teneurs en sucres solubles et protéines totales en comparant par les deux campagnes précédentes.

Des teneurs très faibles en proline malgré l'accumulation des quantités assez importantes des résidus de Topik par rapport à la campagne 2010-2011, ce qui traduit l'adaptation de la plante avec les conditions du milieu qui lui rend plus résistante, tolérante et capable de donner plus de rendement .

## 2.4. Campagne 2012-2013

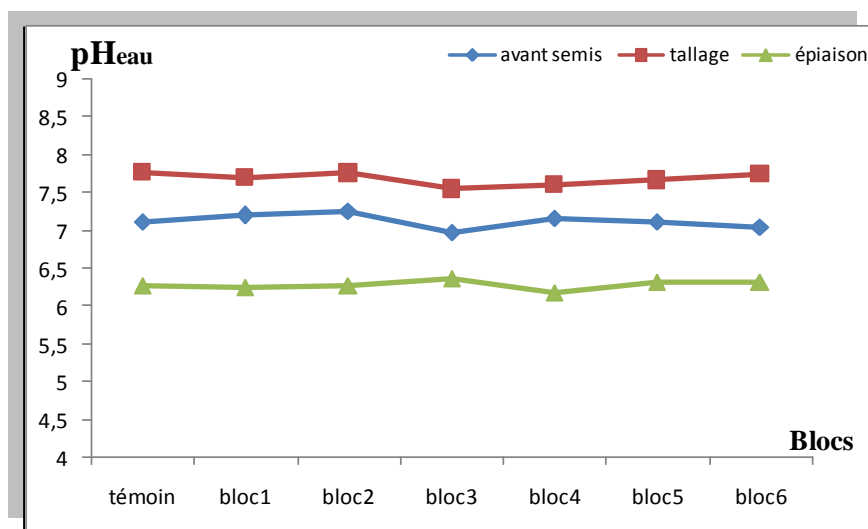
### 2.4.1. Caractéristiques physicochimiques du sol

#### 2.4.1.1. pH<sub>eau</sub>

Avant semis, le pH du milieu est proche de la neutralité, où on enregistre des valeurs de pH eau qui varient entre 6,98 au (bloc 3) et 7,25 au (bloc 2), avec une moyenne de 7,12. Au tallage, le pH augmente mais reste toujours neutre pour tous les blocs. Le bloc 2 montre la plus haute valeur 7,76 (figure 258).

Par ailleurs, à l'épiaison on note des pH<sub>eau</sub> acides par rapport aux deux stades précédents. On enregistre des pH qui oscillent entre 6,18 et 6,37 avec une moyenne de 6,28. L'acidité du milieu peut être due aux molécules pesticides qui peuvent subir des transformations chimiques, en plus de l'existence des ions de phosphores libérés par le superphosphate (Fournier, 1988 ; Scheunert, 1992 ; Larson et Weber, 1994 et Schwarzenbach *et al.*, 2003).

Le test de Kruskal-Wallis montre qu'il n'y a pas de différence significative entre tous les blocs durant l'essai. Cependant entre les 3 prélèvements, le  $P = 0.0000$ , ce qui signifie la différence très hautement significative (tableau 75).



**Figure 258.** Variation du pH<sub>eau</sub> en fonction des stades de prélèvements

**Tableau 75.** Test des médianes de Kruskal-Wallis ( $pH_{\text{eau}}$ )

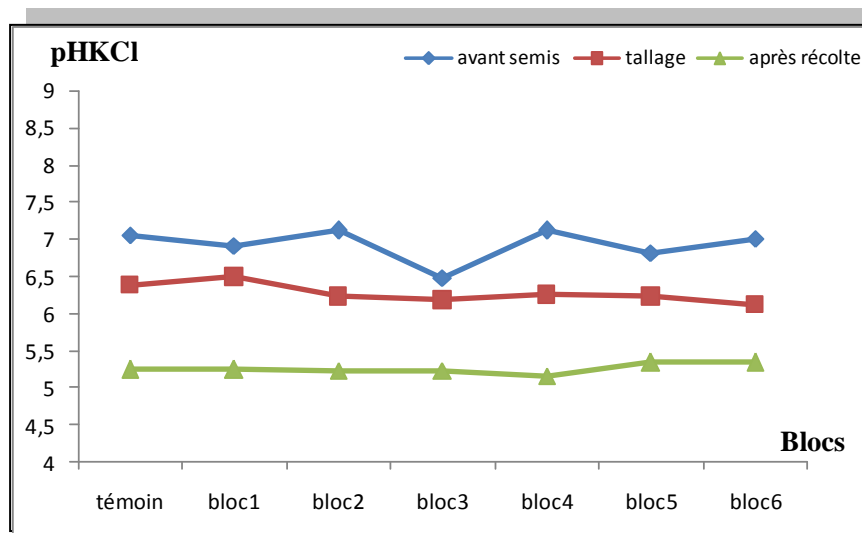
	H	P
$pH_{\text{eau 1}}$	2.112554	0.9091
$pH_{\text{eau 2}}$	1.894235	0.9292
$pH_{\text{eau 3}}$	<b>1.250814</b>	<b>0.9743</b>
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
$pH_{\text{eau 1}}$	41.32391	0.0000
$pH_{\text{eau 2}}$		
$pH_{\text{eau 3}}$		

$pH_{\text{eau 1}}$  :  $pH_{\text{eau}}$  avant semis  
 $pH_{\text{eau 2}}$  :  $pH_{\text{eau}}$  au tallage  
 $pH_{\text{eau 3}}$  :  $pH_{\text{eau}}$  à l'épiaison

#### 2.4.1.2. $pH_{\text{KCl}}$

Le  $pH_{\text{KCl}}$  est toujours inférieur au  $pH_{\text{eau}}$ . Avant semis, les blocs 2 et 4 sont caractérisés par un  $pH_{\text{KCl}}$  élevé 7,11 par rapport aux autres. Au stade suivant, le  $pH_{\text{KCl}}$  va diminuer jusqu'à 6,12 au niveau du bloc 6. En ce qui concerne l'épiaison, les résultats indiquent des valeurs de pH acides qui ne dépassent pas 5,35. Les blocs 5 et 6 montrent un pH identique de 5,34, alors que le plus faible est au niveau du bloc 4 (figure 259). Le taux d'acidité optimal va dépendre du type de sol et des rotations pratiquées. Plusieurs travaux qui ont été faits par des chercheurs tels que Mortreux (2008) affirment que les cultures de blé préfèrent des pH légèrement acides.

L'étude statistique révèle l'absence de différence significative entre les blocs de chaque stade. Alors qu'entre les 3 prélèvements, il existe une différence très hautement significative (tableau 76).



**Figure 259.** Variation du  $pH_{\text{KCl}}$  en fonction des stades de prélèvements

**Tableau 76.** Test des médianes de Kruskal-Wallis ( $pH_{KCl}$ )

	<b>H</b>	<b>P</b>
<b><math>pH_{KCl}</math> 1</b>	1.160365	0.9788
<b><math>pH_{KCl}</math> 2</b>	5.981795	0.9964
<b><math>pH_{KCl}</math> 3</b>	1.102431	0.9814
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
<b><math>pH_{KCl}</math> 1</b>	45.96808	0.0000
<b><math>pH_{KCl}</math> 2</b>		
<b><math>pH_{KCl}</math> 3</b>		

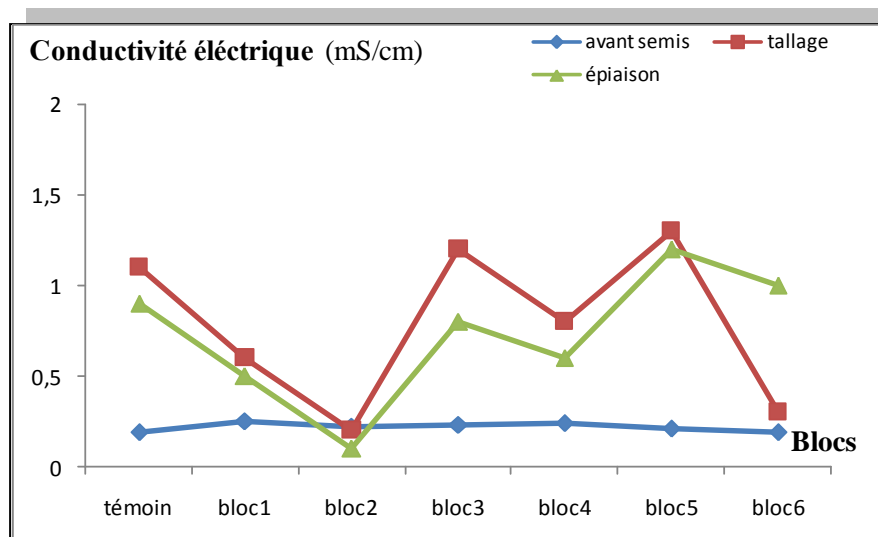
**$pH_{KCl}$  1** :  $pH_{KCl}$  avant semis  
 **$pH_{KCl}$  2** :  $pH_{KCl}$  au tallage  
 **$pH_{KCl}$  3** :  $pH_{KCl}$  à l'épiaison

### 2.4.1.3. Conductivité électrique

On note une variabilité des résultats de la conductivité électrique pendant le stade avant semis où les valeurs oscillent entre 0.19 mS/cm (bloc 6 et témoin) et 0.25 mS/cm (le bloc 1). Au tallage, la conductivité électrique augmente où on observe 1.3 mS/cm (bloc 5) et 0.2 mS/cm comme la plus basse valeur (bloc 2). Une diminution de la conductivité électrique est remarquable à l'épiaison, avec des résultats qui ne dépassent pas 1,4 mS/cm. Les deux valeurs caractéristiques sont enregistrées au niveau du bloc 5 par 1.2 mS/cm et le bloc 1 par 0.5 mS/cm (figure 260).

L'accumulation de sels dans notre sol est une des principales menaces physiologiques pour les plantules de *Triticum durum* en limitant leur assimilation des éléments nutritifs et en réduisant la qualité de l'eau à la disposition pour ces végétaux. Cette accumulation excessive de sels dans le sol peut être due à l'irrigation avec des eaux riches en sels et l'utilisation intensive d'engrais, en particulier quand les terres ont une faible perméabilité et des possibilités limitées de lessivage (Mamy, 2008 & Zaakour *et al.*, 2014).

Le test des médianes entre les doses ne donne aucune différence significative. Le même test appliqué sur les stades montre une différence hautement significative entre eux (tableau 77).



**Figure 260.** Effet du traitement sur la conductivité électrique

**Tableau 77.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Conductivité Electrique)

	H	P
CE 1	4.187364	0.6513
CE 2	9.108225	0.1676
CE 3	10.73638	0.969
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
CE 1	48.39823	0.0000
CE 2		
CE 3		

CE 1 : Conductivité électrique avant semis

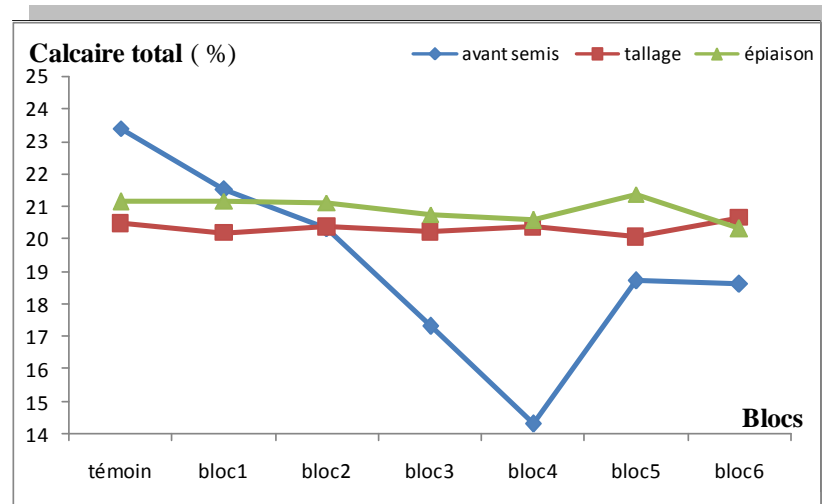
CE 2 : Conductivité électrique au tallage

CE 3 : Conductivité électrique après récolte

#### 2.4.1.4. Calcaire total

Avant semis, la moyenne du calcaire total est 19,15 %, le bloc 4 avec 14.3 % et le bloc 1 avec 21.5%. Les valeurs du calcaire total sont très proches au tallage, mais ne dépassent pas 22 % avec une moyenne de 20,32 %. A l'épiaison, une légère augmentation du calcaire total par rapport au précédente, mais les valeurs restent toujours inférieures à 22 % où la moyenne est 20,91 %, ainsi que la plus haute valeur 21,35 % est au niveau du bloc 5, tandis que la plus faible 20,3 % est notée au bloc 6 (figure 261). A la lumière de ces taux de calcaire total, on peut conclure que nos sols sont modérément calcaires, sachant que le pH est relationnel avec le taux du calcaire total. Sur des terres agricoles mais fortement calcaires, il existe un risque de blocage des éléments traces et du phosphore ; donc il faut contrôler le taux du

calcaire dans ce type de sol (Mahwachi, 2008). L'analyse statistique renseigne sur une absence significative entre les doses et les prélèvements (tableau 78).



**Figure 261.** Effet du traitement sur la teneur en calcaire total

**Tableau 78.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Calcaire Total)

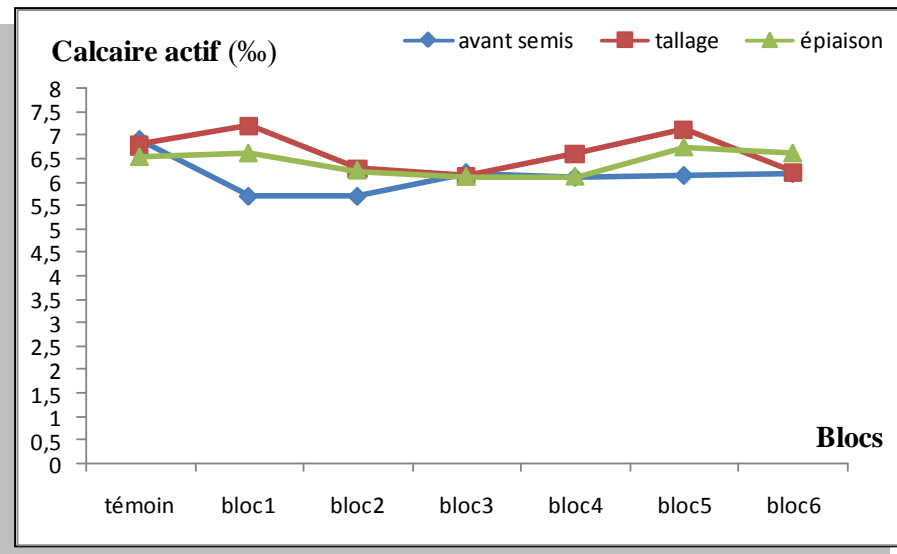
	H	P
CT 1	5.142857	0.5256
CT 2	6.406589	0.3792
CT 3	6.193884	0.4018
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
CT 1	6.892716	0.0319
CT 2		
CT 3		

CT 1 : Calcaire total avant semis  
 CT 2 : Calcaire actif au tallage  
 CT 3 : Calcaire total après récolte

#### 2.4.1.5. Calcaire actif

Les teneurs en calcaire actif sont homogènes selon les stades de prélèvements et qui ne dépassent pas 8‰ (figure 262). La connaissance du calcaire actif est indispensable pour juger la fertilité d'un sol (Bouhier, 1983). La détermination du calcaire actif constitue un bon indice pour guider les agriculteurs à choisir les porte-greffes les mieux adaptés à leurs sols (Baize, 1988). Le calcaire actif augmente dans le même sens que le calcaire total et influe sur l'immobilisation du phosphore et des oligo-éléments (Dogar, 1997). Le blé dur tolère des taux de calcaire actif allant jusqu'à 8 ‰, les résultats obtenus présentent des taux du calcaire actif inférieurs ou égales à 7,21‰ et restent donc toujours inférieur à la limite de tolérance de cette espèce (8 ‰), ce qui évite les risques de chlorose

calcaire. Le test statistique indique une absence de différence significative entre les doses. Alors qu'il montre l'inverse entre les prélèvements 1 et 2 (tableau 79).



**Figure 262.** Effet du traitement sur la teneur en calcaire actif

**Tableau 79.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Calcaire Actif)

	H	P
CA 1	4.027868	0.6729
CA 2	4.813853	0.5679
CA 3	3.105320	0.7955
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
CA 1	5.790661	0.0553
CA 2		
CA 3		

CA 1 : Calcaire actif avant semis

CA 2 : Calcaire actif au tallage

CA 3 : Calcaire actif à l'épiaison

#### 2.4.1.6. Porosité

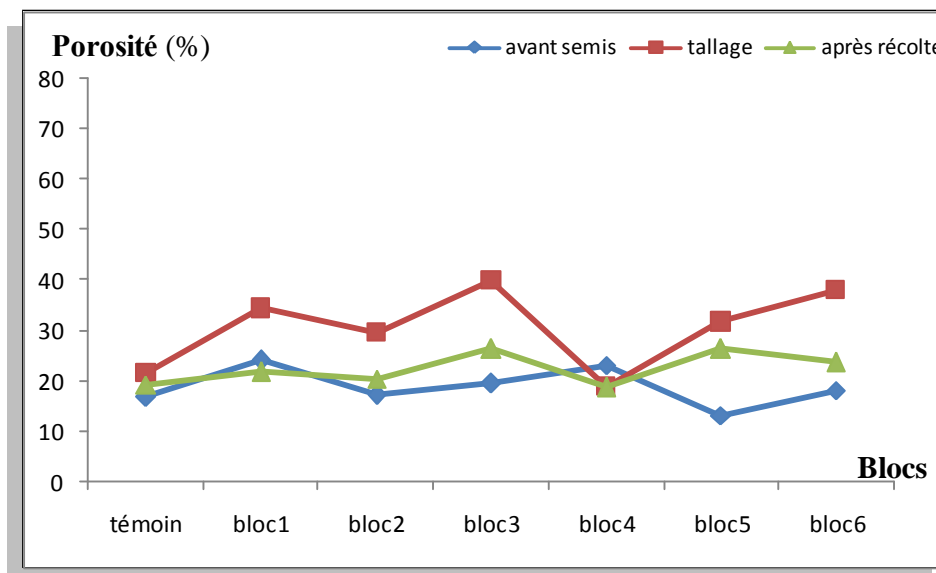
La porosité est un paramètre physique très important pour caractériser un sol cultivé. Le bloc 4 présente la valeur 23.15 % et le bloc 5 une teneur de 13.1 % comme faible pourcentage. L'analyse statistique n'indique aucune différence significative entre les blocs (tableau 80).

Au tallage, le sol devient plus poreux et l'augmentation des taux l'indique. La moyenne générale est 30.54 % (figure 263). Il existe une différence hautement significative entre les blocs 3 et 4.



Une diminution des taux de la porosité est remarquable durant l'épiaison, où la valeur la plus faible 18.61 % est notée au niveau du bloc 4, alors que la plus haute 26.34 % pour les blocs 3 et 5. Pour ce prélèvement, il n'y a pas de différence significative entre les traitements. Le test de Kruskal-Wallis appliqué sur les prélèvements porte des différences significatives entre eux, sauf entre avant semis et épiaison (tableau 80).

Les valeurs basses du pH maintiennent l'existence de forces de cohésion entre les constituants (charges négatives des argiles et positives des oxydes des matières organiques), et ainsi que la stabilité physique des sols. Avant semis, le labour modifiant de façon profonde le comportement du sol semble maintenir une porosité favorable pour le développement racinaire des plantes (Hartmann *et al.*, 1994 & Tavares – Filho, 1998 ).



**Figure 263.** Effet du traitement sur la porosité

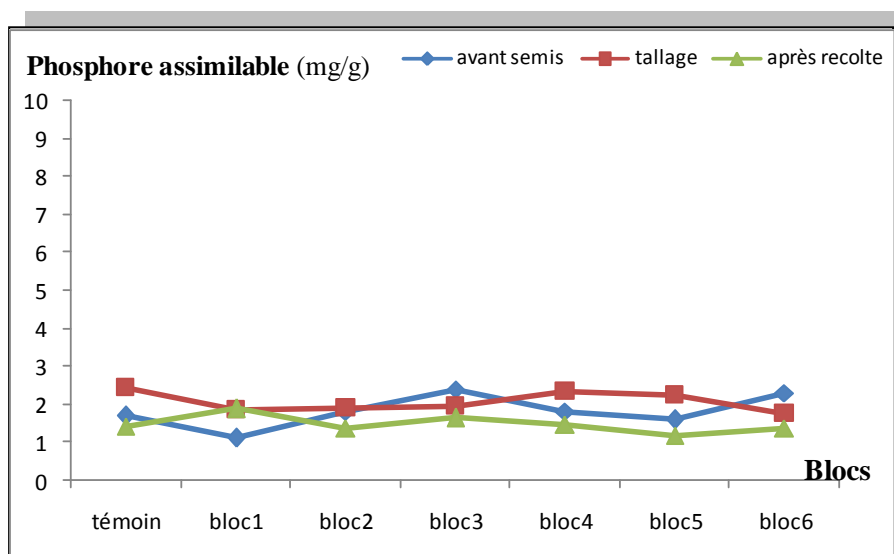
**Tableau 80.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Porosité)

	H	P
<b>PO 1</b>	2.300195	0.8901
<b>PO 2</b>	14.70130	0.0227
<b>PO 3</b>	4.985922	0.5456
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
<b>PO 1</b>		
<b>PO 2</b>	21.07599	0.0000
<b>PO 3</b>		

**PO 1 :** Porosité avant semis  
**PO 2 :** Porosité au tallage  
**PO 3 :** Porosité à l'épiaison

### 2.4.1.7. Phosphore assimilable

Avant semis, la quantité du phosphore assimilable est variable d'un bloc à un autre ; le bloc 3 représente la quantité la plus importante 2,4 g/kg MS, alors que le bloc 1 montre 1,11 g/kg MS. On observe globalement que les quantités du phosphore assimilable ne dépassent pas 3 g/kg, la moyenne est 2,07 g/kg MS. Pendant l'épiaison il y a un abaissement des quantités du phosphore assimilable par rapport aux deux stades précédents, avec une moyenne de 1,48 g/kg MS (figure 264). Pour les doses du phosphore appliquées, il n'y a pas de différence significative entre eux. L'étude statistique montre une absence de différence significative entre les 3 stades, à l'exception entre les stades 1 et 3, 2 et 3 (tableau 81).



**Figure 264.** Effet du traitement sur la teneur en phosphore assimilable

**Tableau 81.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Phosphora Assimilable)

	H	P
<b>Phos 1</b>	10.07650	0.1215
<b>Phos 2</b>	2.863331	0.8258
<b>Phos 3</b>	5.238406	0.5136
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
<b>Phos 1</b> <b>Phos 2</b> <b>Phos 3</b>	16.05950	0.0003

**Phos 1** : Phosphore assimilable avant semis

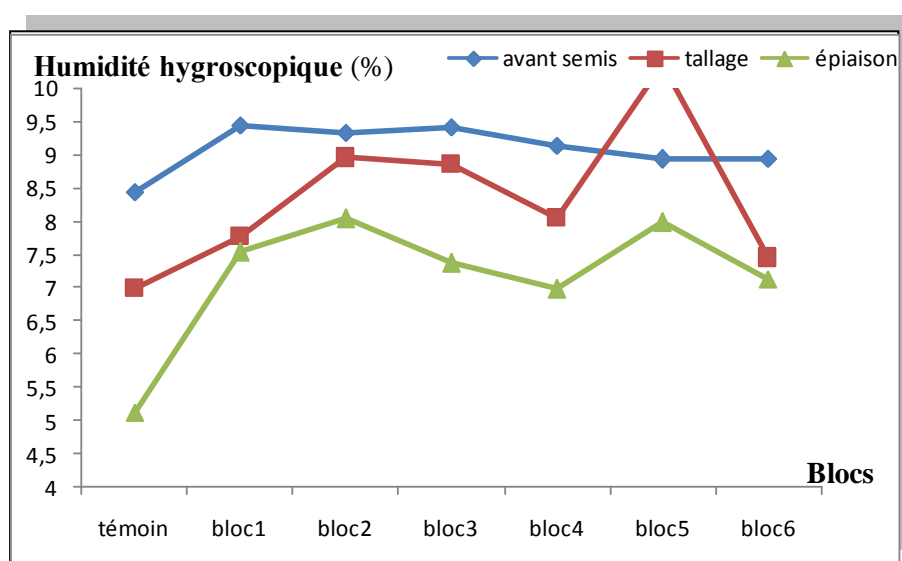
**Phos 2** : Phosphore assimilable au tallage

**Phos 3** : Phosphore assimilable à l'épiaison

### 2.4.1.8. Humidité hygroscopique

Avant semis, les résultats de l'humidité hygroscopique sont très proches selon les blocs. On observe globalement une moyenne de 9.09 %, le bloc 1 avec 9.45 % comme valeur importante par rapport au témoin (8.45 %). Au tallage, la moyenne des taux de l'humidité hygroscopique diminue vers 7 %. On enregistre 10.37 % au bloc 5. Une diminution est remarquable à l'épiaison, où on enregistre les valeurs importantes au niveau du bloc 2 avec 8.04 % et au bloc témoin par 5.12 % (figure 265).

L'analyse statistique révèle une absence de différence significative entre les doses de l'engrais durant la saison d'étude. En revanche, la différence est hautement significative, sauf entre les stades avant semis et tallage, en plus entre ce dernier et l'épiaison (tableau 82).



**Figure 265.** Effet du traitement sur la teneur en humidité hygroscopique

**Tableau 82.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Humidité Hygroscopique)

	H	P
<b>HG 1</b>	1.805195	0.9698
<b>HG 2</b>	5.056277	0.6531
<b>HG 3</b>	3.190476	0.8668
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
<b>HG 1</b>	15.22458	0.0005
<b>HG 2</b>		
<b>HG 3</b>		

**HG 1 :** Humidité hygroscopique avant semis

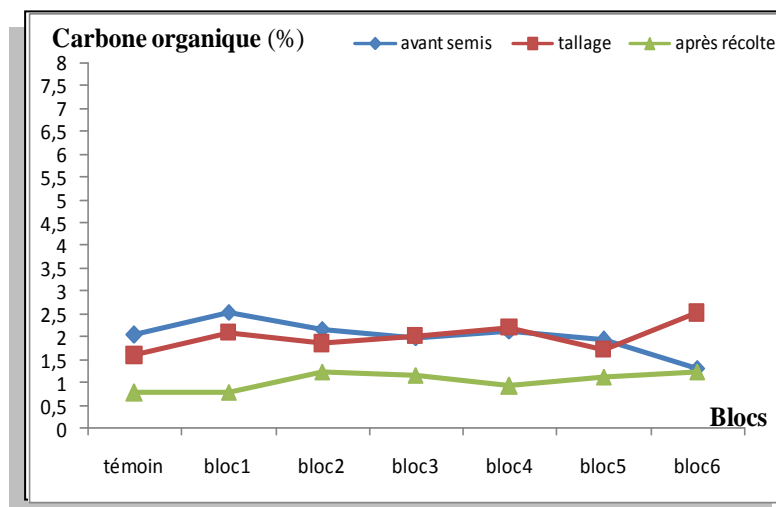
**HG 2 :** Humidité hygroscopique au tallage

**HG 3 :** Humidité hygroscopique à l'épiaison

### 2.4.1.9. Carbone organique

Avant semis, le taux du carbone organique ne dépasse pas 3 %, et la moyenne des résultats est 2.01 %. Une valeur de 2,53 % est notée au niveau du bloc 1, mais la plus basse 1,31 % représentée par le bloc 6. Au tallage, le bloc 6 montre la valeur la plus élevée 2,21 %. Le taux du carbone organique diminue à l'épiaison par rapport aux deux stades précédents. La moyenne est 1.03 %, dont un pourcentage très élevé 1,23 % est marqué par le bloc 3 (figure 266). Le test de Kruskal-Wallis montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements portés aux blocs. Ce test appliqué entre les 3 stades montre qu'il existe une différence très hautement significative entre eux mais absente entre le tallage et avant semis (tableau 83).

La dynamique du carbone dans le sol est fonction de deux paramètres majeurs les flux entrants et la vitesse de minéralisation. D'après les teneurs obtenues, le sol est faible en carbone organique. Des études similaires réalisées par certains chercheurs (Bellamy *et al.*, 2005 ; Lemerrier *et al.*, 2006 & Saby *et al.*, 2008) montrent que la minéralisation rapide de la matière organique rend le sol faible en carbone organique.



**Figure 266.** Effet du traitement sur la teneur en carbone organique

**Tableau 83.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Carbone Organique)

	H	P
CO 1	4.034632	0.6720
CO 2	1.499783	0.9595
CO 3	4.460338	0.6146
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
CO 1	24.75623	0.0000
CO 2		
CO 3		

CO 1: Carbone organique avant semis

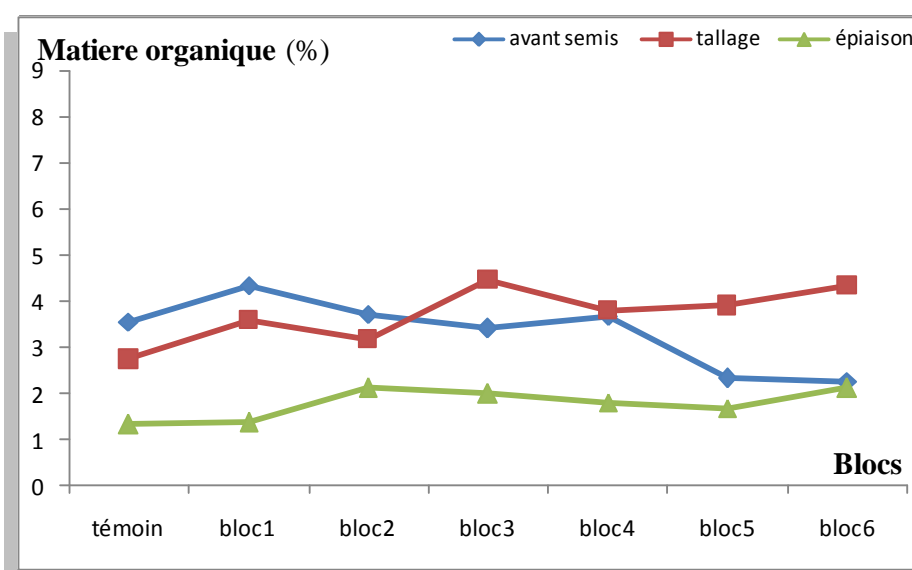
CO 2: Carbone organique au tallage

CO 3: Carbone organique à l'épiaison

#### 2.4.1.10. Matière organique

Avant semis, le taux moyen de la matière organique ne dépasse pas 4.5 % où la plus haute valeur est enregistrée au bloc 1 et la plus faible au bloc 6. Une augmentation remarquable des taux de la matière organique durant le tallage par rapport au stade précédent. Le bloc 3 avec un taux de 4.47 % enregistre la valeur la plus haute tandis que la plus faible est notée par les parcelles du bloc 2, alors que le bloc témoin représente un taux inférieur par rapport aux blocs traités (2,74 %). Un abaissement des résultats à l'épiaison est notable par les blocs. Les blocs 2 et 6 représentent la plus haute teneur (2.11 %) et la plus faible (1,37 %) par le bloc 1, le témoin est configuré par 1.32 % (figure 267). L'étude statistique des médianes fait apparaître une absence de différence significative entre les doses appliquées. Le test de Kruskal-Wallis révèle qu'elle existe entre les périodes, mis à part entre le tallage et l'avant semis (tableau 84).

La matière organique joue un rôle essentiel pour la structure du sol et sa stabilité (Chenu *et al.*, 2011 & Swederski *et al.*, 2012), la rétention en eau, la nutrition minérale des plantes et l'activité biologique des micro-organismes du sol (Attard *et al.*, 2011). Elle constitue un élément clé pour la gestion durable des écosystèmes. De plus, elle constitue un puits potentiel du carbone (Bernoux *et al.*, 2011). En se basant sur ces études et selon l'échelle internationale de qualification de la matière organique, on peut dire que les échantillons sols sont moyennement élevés. La texture argileuse a une relation avec ces teneurs en matière organique (Soltner, 1981).



**Figure 267.** Effet du traitement sur la teneur en matière organique

**Tableau 84.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Matière Organique)

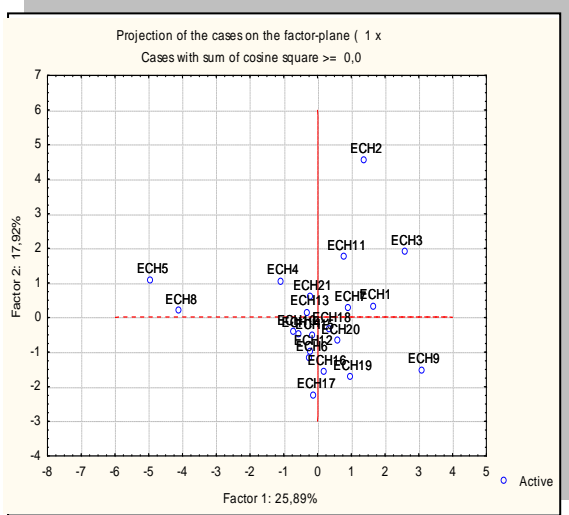
	H	P
MO 1	4.519481	0.6067
MO 2	2.329213	0.8871
MO 3	4.052883	0.6695
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
MO 1	26.78281	0.0000
MO 2		
MO 3		

MO 1 : Matière organique avant semis

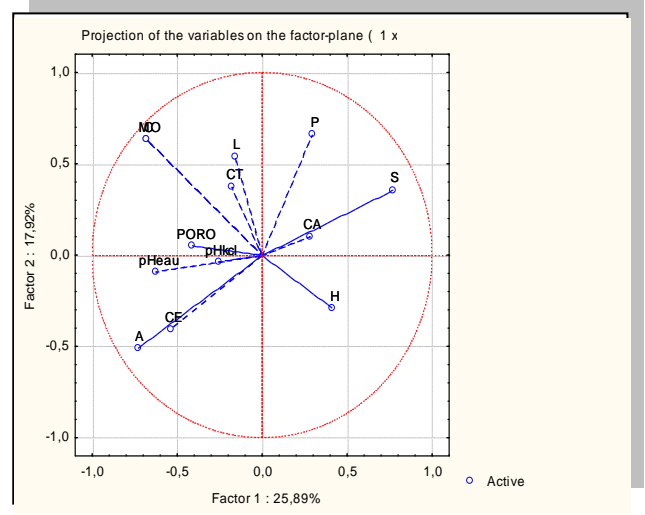
MO 2 : Matière organique au tallage

MO 3 : Matière organique à l'épiaison

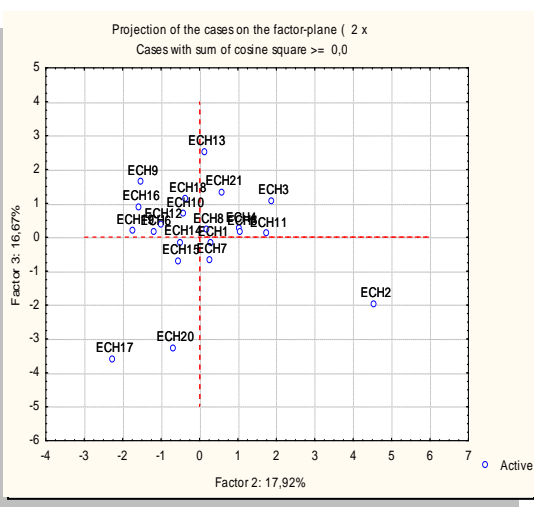
**a)- Analyse en composantes principales (avant semis)**



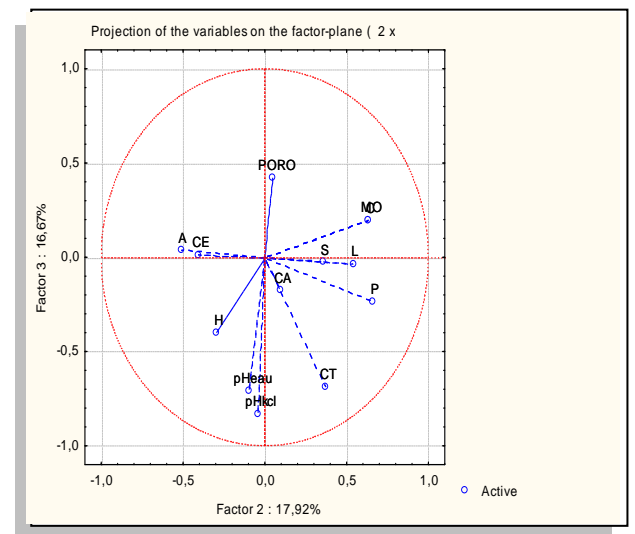
**Figure 268.** Projection des cases des facteurs 1 et 2



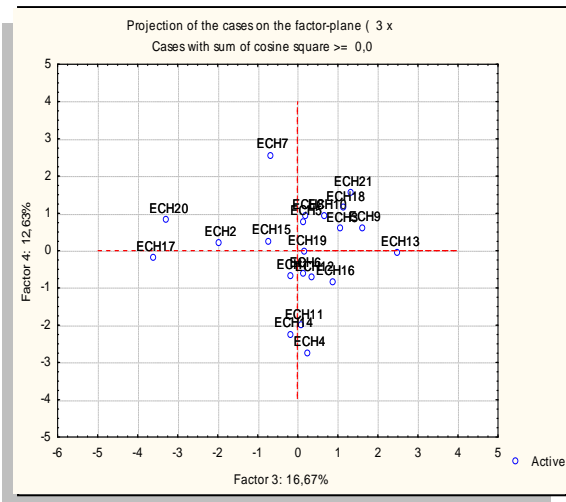
**Figure 269.** Analyse en composantes principales



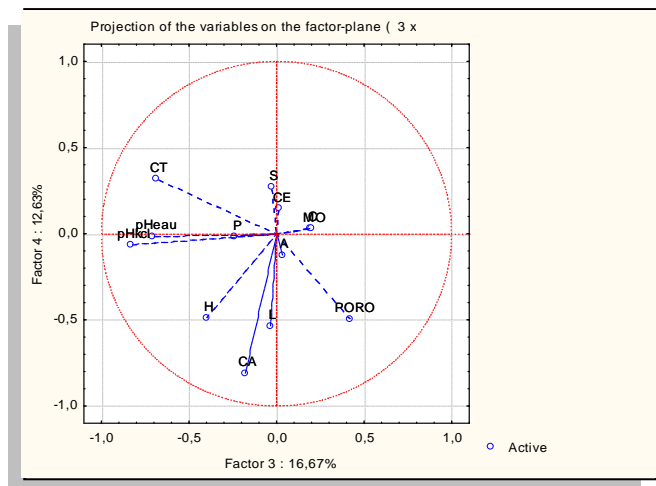
**Figure 270.** Projection des cases des facteurs 2 et 3



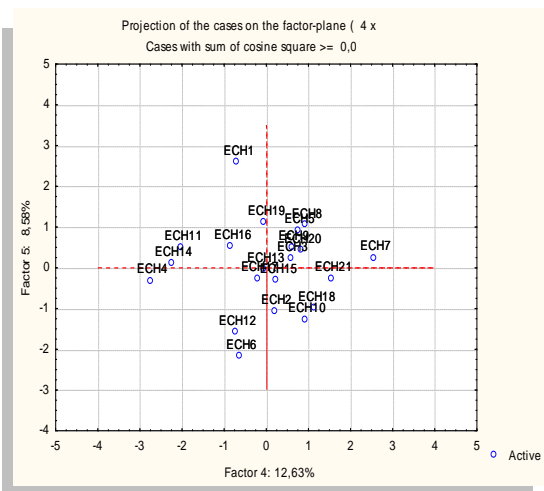
**Figure 271.** Analyse en composantes principales



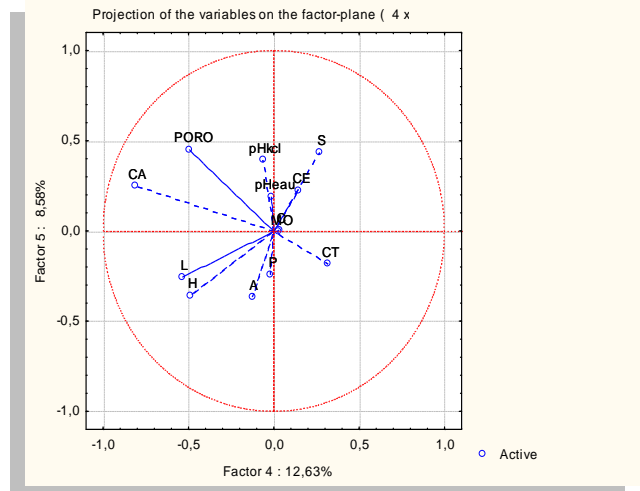
**Figure 272.** Projection des cases des facteurs 3 et 4



**Figure 273.** Analyse en composantes principales

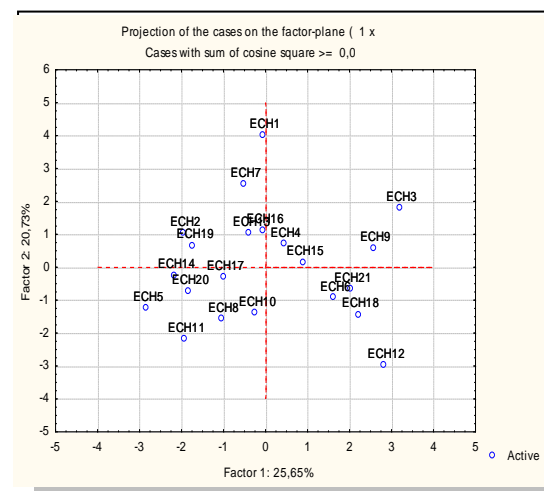


**Figure 274.** Projection des cases des facteurs 4 et 5

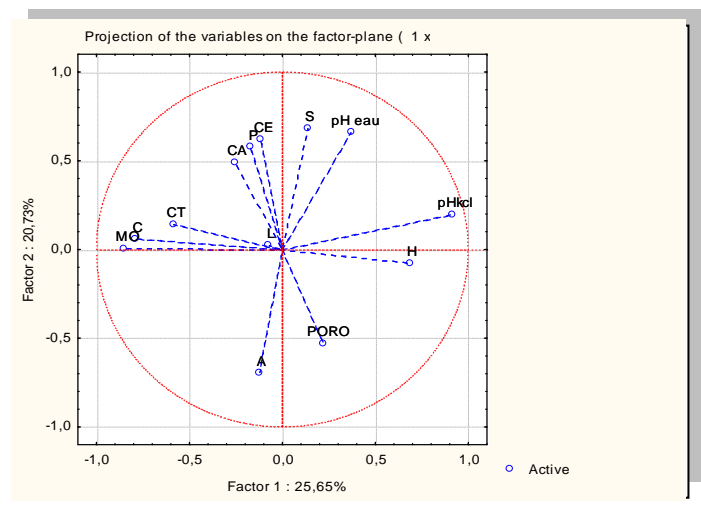


**Figure 275.** Analyse en composantes principales

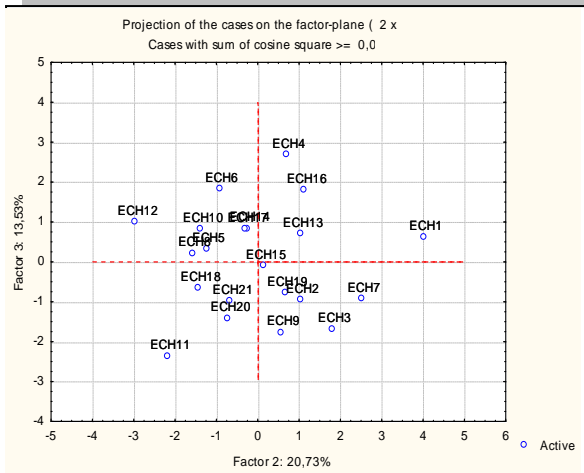
**b)- Analyse en composantes principales (tallage)**



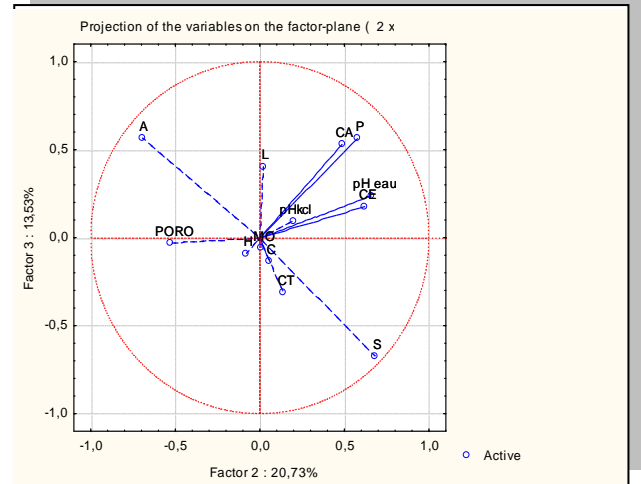
**Figure 276.** Projection des cases des facteurs 1 et 2



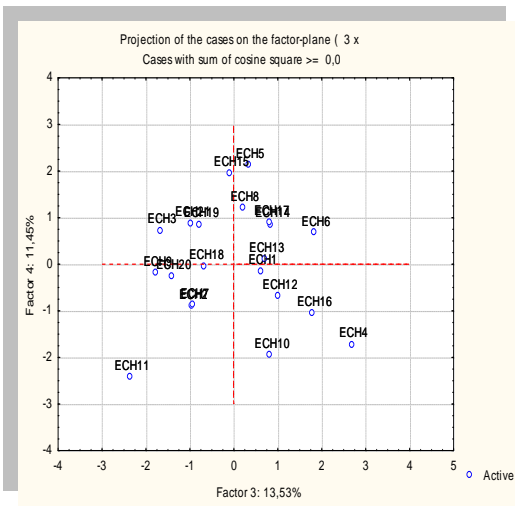
**Figure 277.** Analyse en composantes principales



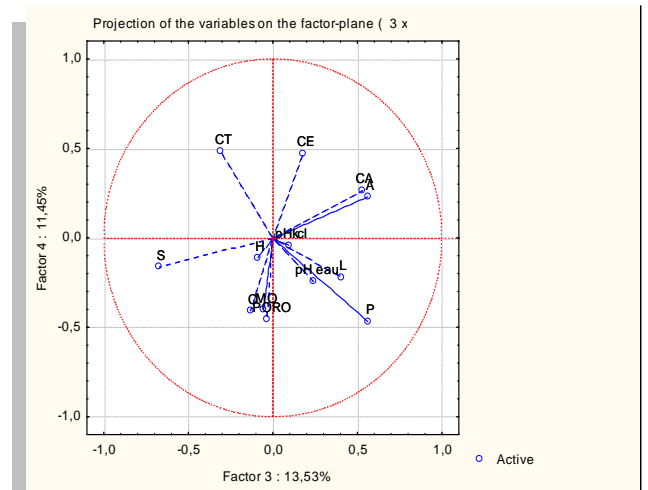
**Figure 278.** Projection des cases des facteurs 2 et 3



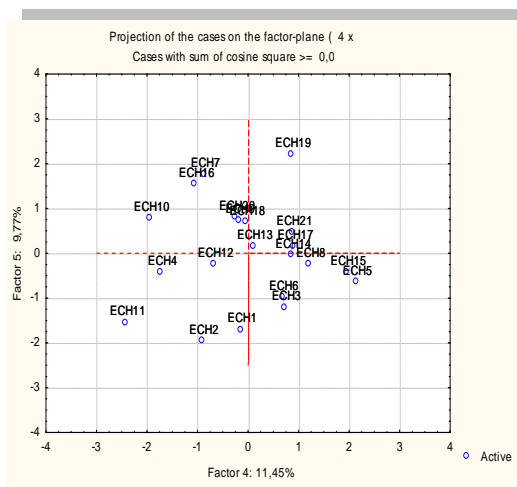
**Figure 279.** Analyse en composantes principales



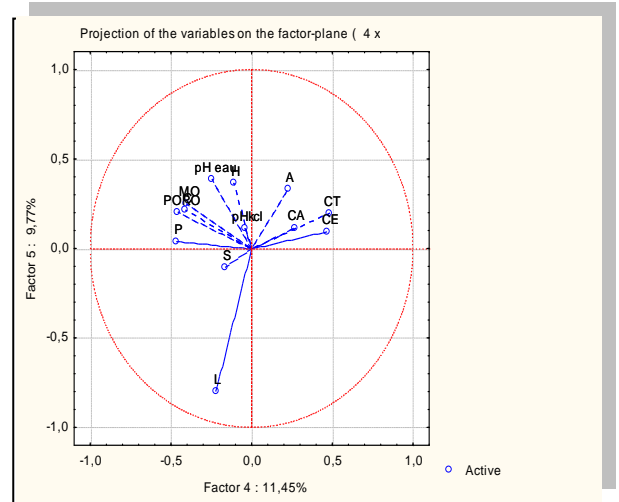
**Figure 280.** Projection des cases des facteurs 3 et 4



**Figure 281.** Analyse en composantes principales



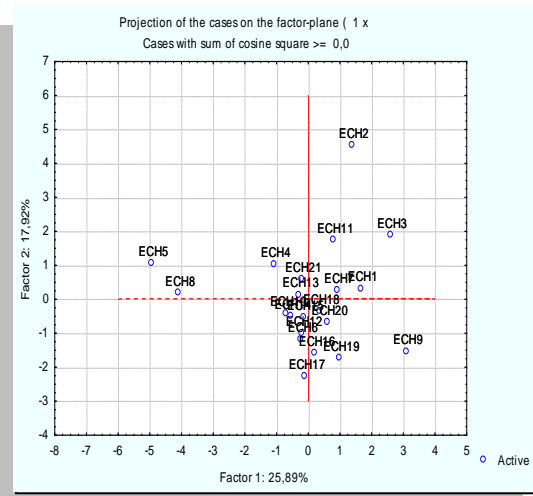
**Figure 282.** Projection des cases des facteurs 4 et 5



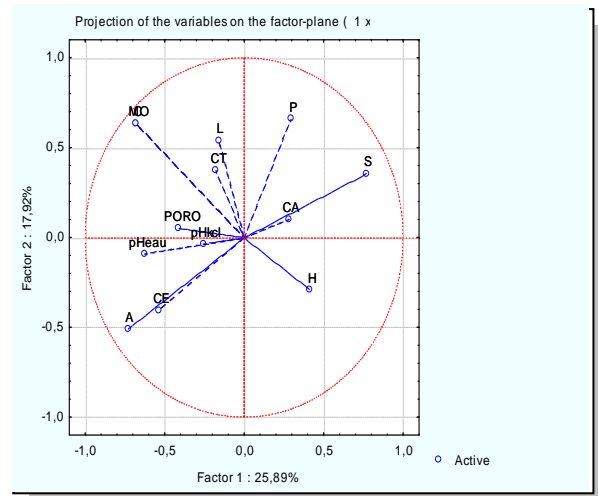
**Figure 283.** Analyse en composantes principales



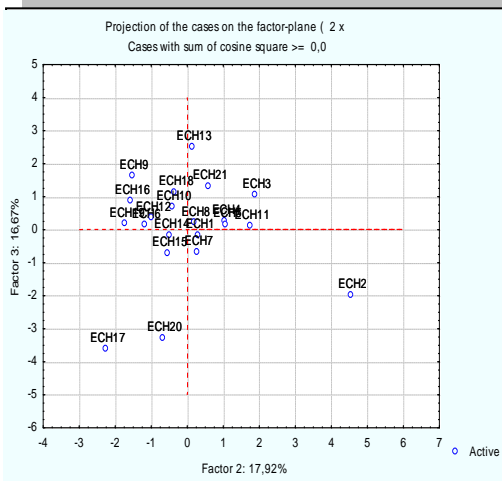
### c)- Analyse en composantes principales (épaision)



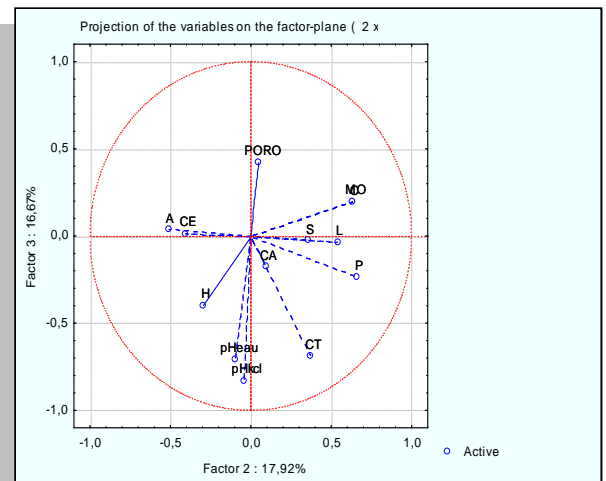
**Figure 284.** Projection des cases des facteurs 1 et 2



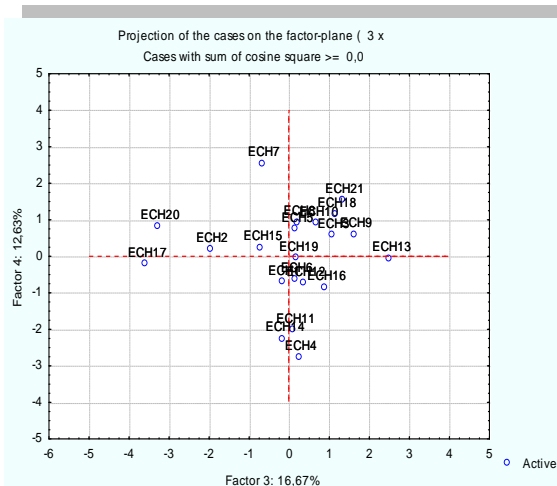
**Figure 285.** Analyse en composantes principales



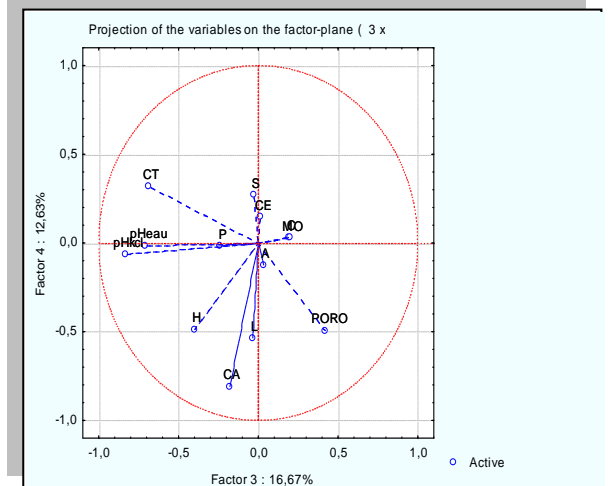
**Figure 286.** Projection des cases des facteurs 2 et 3



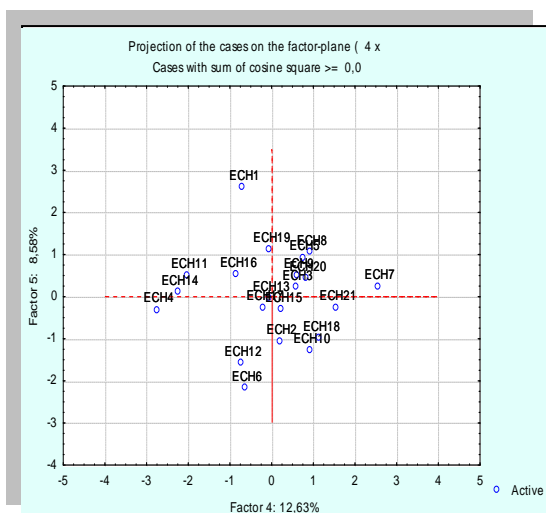
**Figure 287.** Analyse en composantes principales



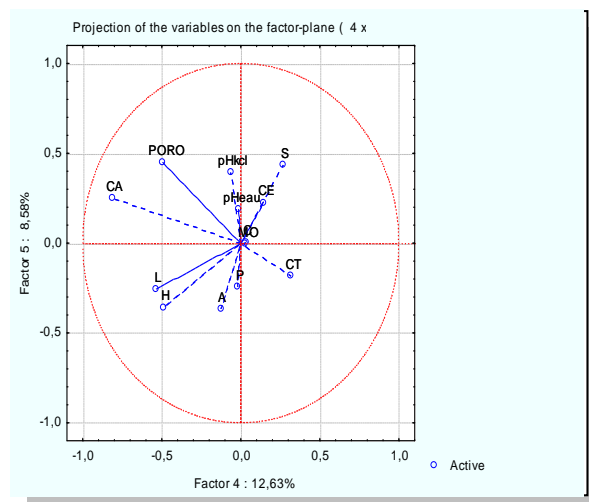
**Figure 288.** Projection des cases des facteurs 3 et 4



**Figure 289.** Analyse en composantes principales



**Figure 290.** Projection des cases des facteurs 4 et 5



**Figure 291.** Analyse en composantes principales

Au tallage, sur le premier axe (25,65%) le pH du milieu est corrélé négativement avec la texture du sol, et sur le deuxième axe de variation (20,73%) les caractéristiques sont corrélés positivement (figure 279) ; la même corrélation est remarquée sur le troisième (13,63%) et quatrième axe (11,45%).

Durant l'épiaison, l'analyse en composantes principales sur l'axe horizontale (25.89%) montre que les paramètres (matière organique, porosité, carbone, limons et argiles) sont corrélés positivement, par ailleurs le phosphore et la conductivité électrique sont corrélés négativement. Un enregistrement identique est souligné sur le deuxième axe (17.92%), même sur le troisième et quatrième sont respectivement avec 16.67% et 12.063% de la variance totale. Le bloc 5 est caractéristique (figures 284, 286, 288 et 290).

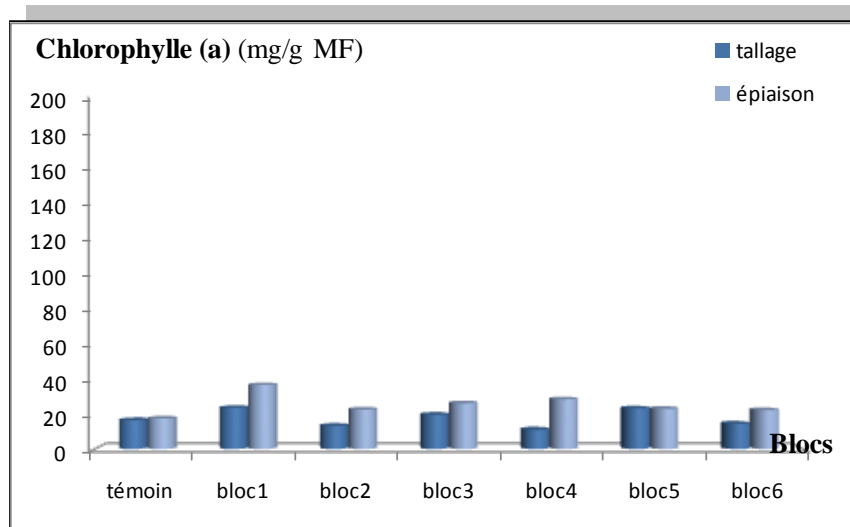
La minéralisation du phosphore était liée positivement à la matière organique contrairement à ce qui est habituellement retrouvé dans la littérature (Stevenson, 1986 ; Saggarr *et al.*, 1998 & Mafongoya, *et al.*, 2000). Le pH était négativement corrélé à la minéralisation du phosphore. Comme le KCl extrait le phosphore facilement disponible, il est probable qu'une partie du phosphore minéralisé ait été retenue avec les cations du sol lorsque le pH était élevé.

## 2.4.2. Caractéristiques physiobiochimiques de la plante

### 2.4.2.1. Chlorophylle (a)

La quantité moyenne de ce pigment est 25.36 mg/g MF. On note une variabilité des résultats entre les blocs, où on peut trouver 23.66 mg/g MF (bloc 1) considérée comme la plus haute valeur et 11.09 mg/g MF (bloc 4). L'étude statistique ne révèle pas une différence entre les traitements dans ce stade.

A l'épiaison, la quantité de chlorophylle augmente par rapport au tallage où on trouve les valeurs fortes 36,88 mg/g MF au niveau du bloc 1 et 22.38 mg/g MF au niveau du bloc 6, la moyenne est de l'ordre de 25,36 mg/g MF (figure 292). Aucune différence significative n'existe entre les doses. Le test des médianes appliqué sur les prélèvements montre une différence significative entre eux (Tableau 85). Une stimulation des taux des pigments chlorophylliens est remarquable par les deux stades par rapport au témoin. Cette augmentation enregistrée est proportionnelle aux doses utilisées. Cette dernière pourrait traduire une stimulation de la photosynthèse d'où la biosynthèse de la chlorophylle et par conséquent une augmentation de la teneur en sucres. Par ailleurs, cette stimulation est aussi marquée chez les variétés : Vitron et Bidi 17 soumises à un traitement fongicide (Wang *et al.*, 2005).



**Figure 292.** Effet du traitement sur la teneur en chlorophylle (a)

**Tableau 85.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Chlorophylle a)

	H	P
<b>Chl (a) 1</b>	8.207792	0.2233
<b>Chl (a) 2</b>	7.87878	0.2471
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
<b>Chl (a) 1</b>		
<b>Chl (a) 2</b>	10.28714	0.0013

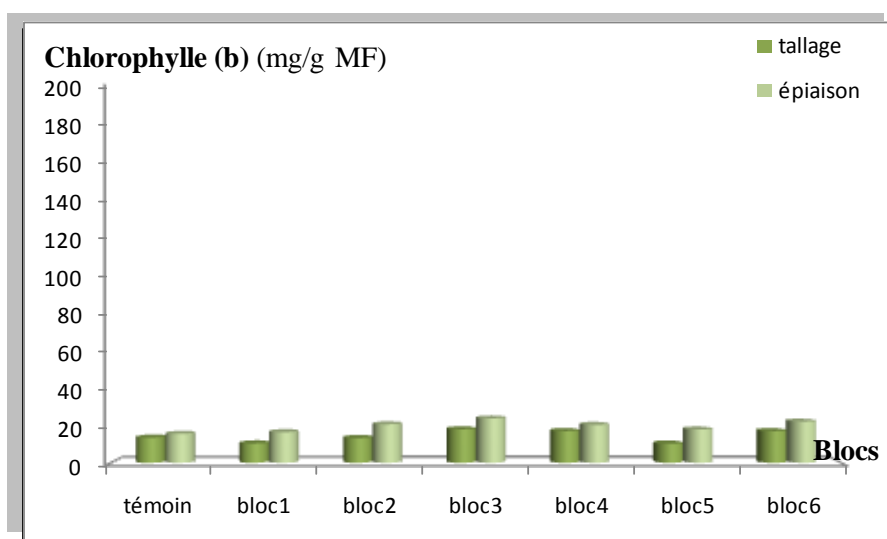
**Chl (a) 1 :** Chlorophylle (a) au tallage

**Chl (a) 2 :** Chlorophylle (a) à l'épiaison

### 2.4.2.2. Chlorophylle (b)

Au tallage, les quantités de chlorophylle (b) oscillent entre 10,21 mg/g MF au bloc 5 et 17,91 au bloc 3, tandis que le bloc témoin contient 13,45 mg/g MF, c'est une quantité assez importante par rapport aux autres blocs. La moyenne des résultats est 14,15 mg/g MF. Cependant, à l'épiaison, on peut remarquer une augmentation des quantités de chlorophylle (b) par rapport au stade précédent, la valeur moyenne est de 19,50 mg/g MF. Les blocs 1,3 et témoin ont des valeurs respectives 16,39 mg/g MF, 23,77 mg/g MF et 15,51 mg/g MF (figure 293).

Le test des médianes informe qu'il n'y a pas de différence significative entre les doses du fertilisant. Par ailleurs, le même test utilisé pour comparaison des stades montre qu'il existe une différence significative (tableau 86).



**Figure 293.** Effet du traitement sur la teneur en chlorophylle (b)

**Tableau 86.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Chlorophylle b)

	H	P
<b>Chl (b) 1</b>	7.17815	0.3047
<b>Chl (b) 2</b>	9.108225	0.1676
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
<b>Chl (b) 1</b>		
<b>Chl (b) 2</b>	8.517179	0.0035

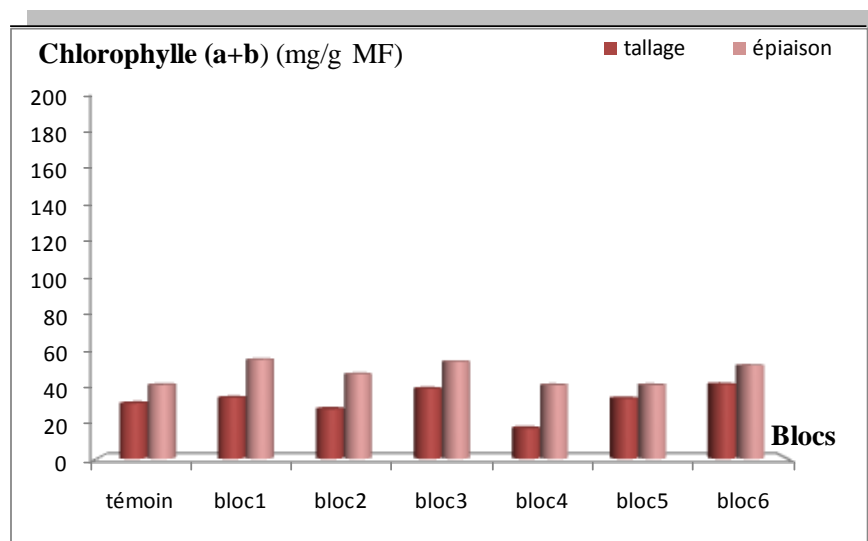
**Chl (b) 1 :** Chlorophylle (b) au tallage

**Chl (b) 2 :** Chlorophylle (b) à l'épiaison

### 2.4.2.3. Chlorophylle (a+b)

Dans l'ensemble, la teneur en chlorophylle (a+b) est homogène pour tous les blocs traités y compris le témoin (figure 294). Cette homogénéité est affirmée par le test statistique des médianes (tableau 87). Dans un but de comparaison entre les deux stades de prélèvements le test de Kruskal-Wallis montre la présence d'une différence très hautement significative ( $p = 0.000$ ).

Des études réalisées sur plusieurs variétés de blé dur telles que Vitron, Waha, Ardente et Hedba 3 ont montré que ces dernières sont tolérantes et capables d'élaborer des pigments photosynthétiques même aux conditions de stress (Lewiki, 1993 & Mekliche *et al.*, 2003).



**Figure 294.** Effet du traitement sur la teneur en chlorophylle (a + b)

**Tableau 87.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Chlorophylle a+b)

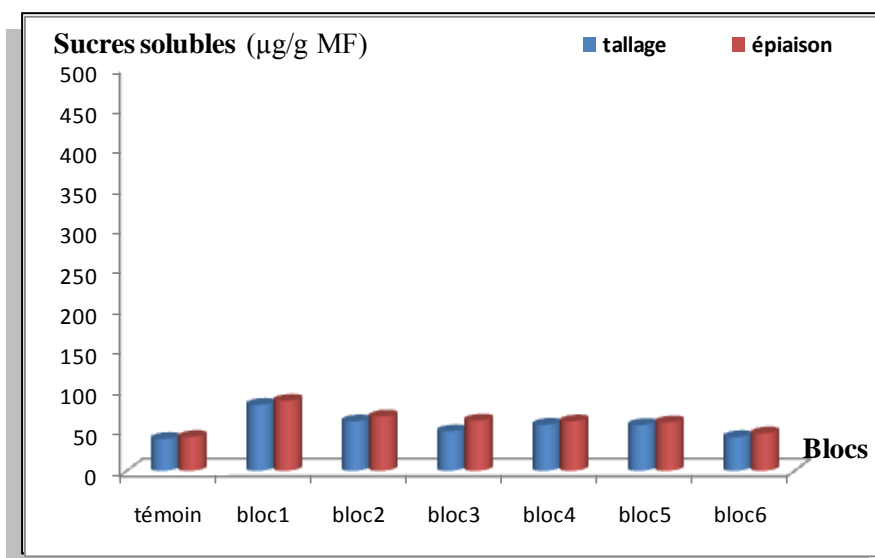
	H	P
<b>Chl (a+b) 1</b>	10.38961	0.1092
<b>Chl (a+b) 2</b>	4.606061	0.5952
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
<b>Chl (a+b) 1</b>		
<b>Chl (a+b) 2</b>	21.30818	0.0000

**Chl (a+b) 1 :** Chl (a+b) au tallage

**Chl (a+b) 2 :** Chl (a+b) à l'épiaison

#### 2.4.2.4. Sucres solubles

Les sucres solubles ont une relation avec la chlorophylle car l'élaboration de la matière organique chez la plante est conditionnée par la photosynthèse où la chlorophylle joue un rôle principale pour capter les photons lumineux.



**Figure 295.** Effet du traitement sur la teneur en sur les sucres solubles

Aux stades tallage et épiaison, les teneurs en sucres solubles sont très faibles, elles s'étalent entre 39.42 µg/g MF à 86.73 µg/g MF (figure 295). Le test de Kruskal-Wallis indique une absence de différence significative entre les doses et entre les stades de prélèvements (tableau 88).

Nos résultats ne sont pas identiques à des tests appliqués sur les variétés Waha et Siméto qui sont caractérisées par une accumulation très importante des sucres solubles pendant l'épiaison (Ali Dib *et al.*, 1992 ; Korichi,1992).

**Tableau 88.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Sucres Solubles)

	H	P
S 1	6.562771	0.3632
S 2	6.112554	0.4107
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
S 1	1.914409	0.1665
S 2		

S 1 : Sucres solubles au tallage

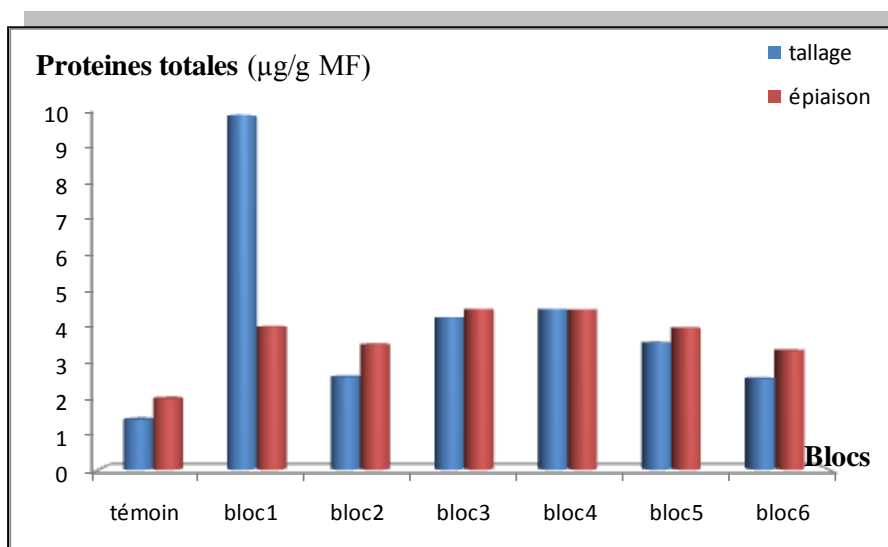
S 2 : Sucres solubles à l'épiaison

### 2.4.2.5. Protéines totales

La quantité de protéines totales élaborées par les plantules, aux deux stades phénotypiques du blé est très faible. Les teneurs oscillent entre 2,00  $\mu\text{g/g}$  MF et 47.73  $\mu\text{g/g}$  MF (figure 296).

L'étude statistique montre une absence de différence significative entre les doses utilisées et entre les stades de prélèvement (tableau 89).

Le processus de concentration des protéines totales dans les tissus végétaux des plantes stressées est reconnu comme une caractéristique d'adaptation (Deraissac, 1992 ; INRA, 2000).



**Figure 296.** Effet du traitement sur la teneur en protéines totales

**Tableau 89.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Protéines Totales)

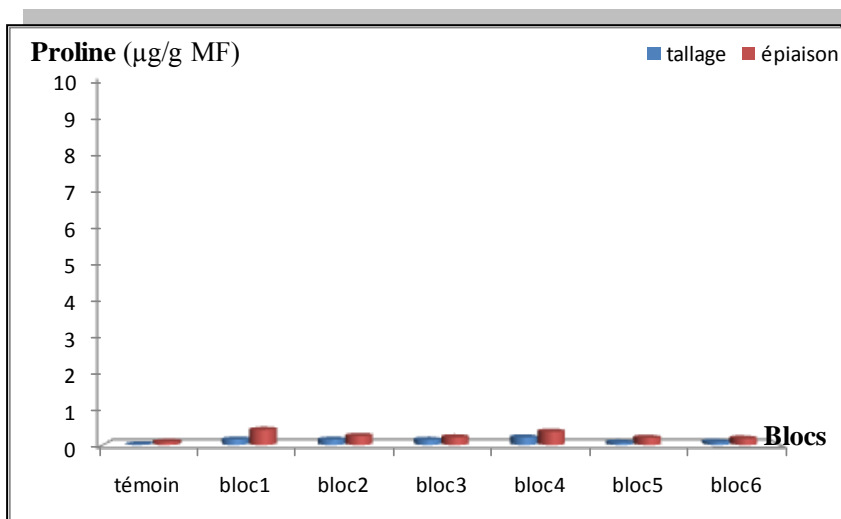
	H	P
PT 1	9.395712	0.1525
PT 2	9.038961	0.1714
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
PT 1		
PT 2	1.281651	0.2576

PT 1 : Protéines au tallage

PT 2 : Protéines à l'épiaison

#### 2.4.2.6. Proline

Un grand nombre des plantes synthétisent dans leurs feuilles un acide aminé (proline) à partir des glutamines, le caractère principal de ce métabolite est son sensibilité au stress. Elle agit aussi comme un soluté compatible qui s'accumule à des fortes concentrations dans le cytoplasme sans interférer avec les activités métaboliques cellulaires.



**Figure 297.** Effet du traitement sur la proline

Les teneurs en proline synthétisées par les plantules au tallage sont très faibles, dont la plus importante valeur est au niveau du bloc 4 (0,21 µg/g MF). A l'épiaison, on note une moyenne de 0,24 µg/g MF avec une quantité importante par rapport aux autres (0,42 µg/g MF) au bloc 1 (figure 297).

Le test de Kruskal-Wallis indique qu'il n'y a pas de différence significative entre les traitements durant la période d'essai. D'autre part, ce test implique une différence hautement significative entre les deux stades (tableau 90).

Selon Kalpana et Rao (1994) l'augmentation des teneurs en proline et en sucres solubles chez les variétés de blé tendre et dur s'inscrirait dans l'ensemble des dégradations biochimiques que subiraient les graines au cours de leurs stockages. De plus d'autres facteurs influent sur l'accumulation de la proline tels que l'inhibition de l'oxydation due à un effet mitochondrial et à la réduction du taux de translocation de l'acide aminé à travers le phloème (Carceller, 1995 & Mekliche *et al.*, 2003).

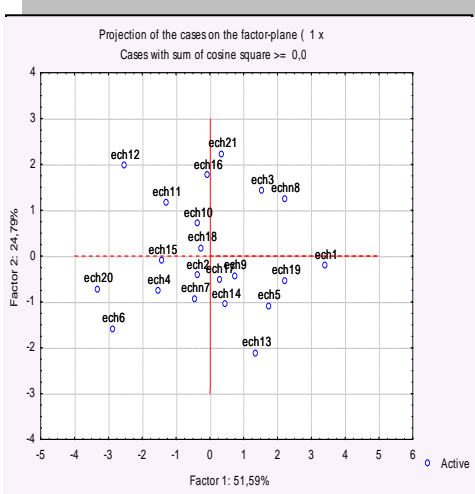


**Tableau 90.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Proline)

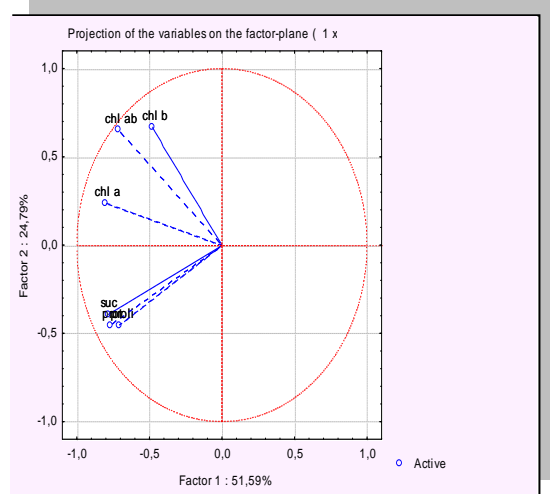
	H	P
<b>PR 1</b>	4.659731	0.5881
<b>PR 2</b>	5.645022	0.4641
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
<b>PR 1</b>		
<b>PR 2</b>	6.980138	0.0082

**PR 1 :** Proline au tallage  
**PR 2 :** Proline à l'épiaison

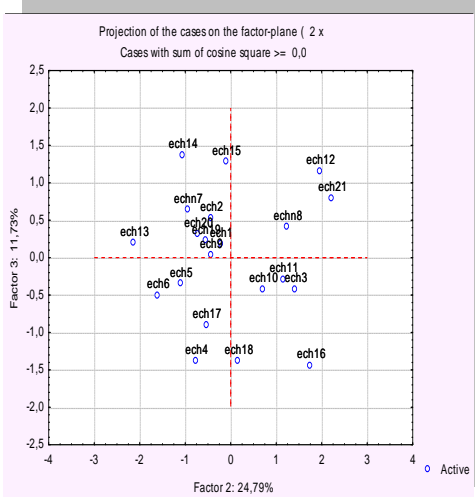
**a)- Analyse en composantes principales (tallage)**



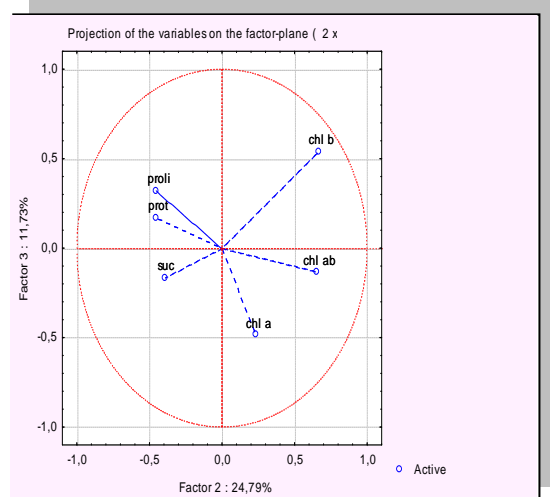
**Figure 298.** Projection des cases des facteurs 1 et 2



**Figure 299.** Analyse en composantes principales

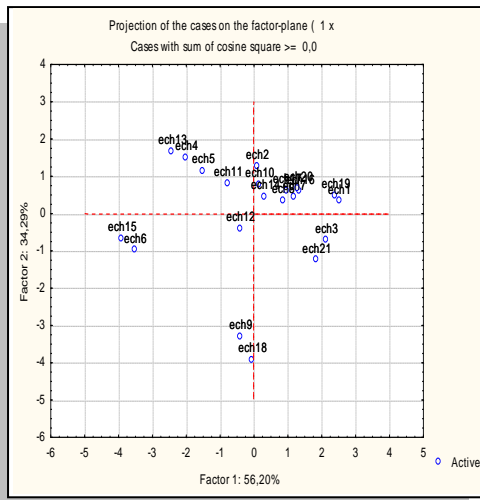


**Figure 300.** Projection des cases des facteurs 2 et 3

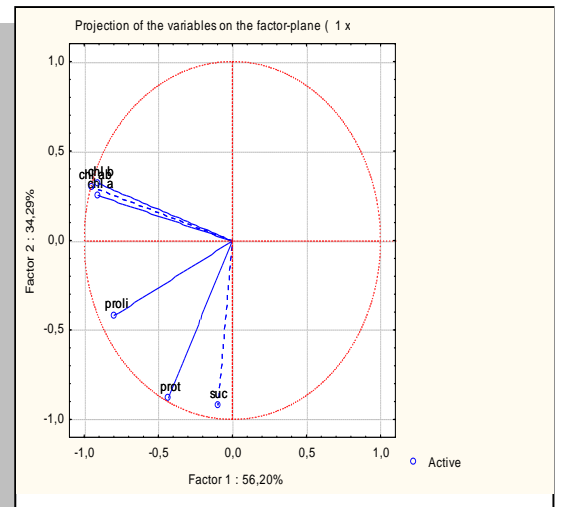


**Figure 301.** Analyse en composantes principales

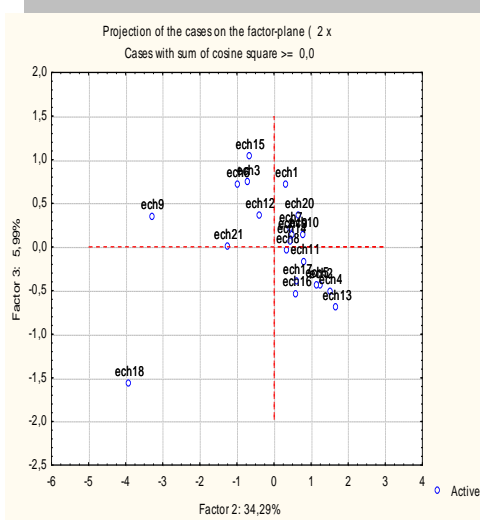
## b)- Analyse en composantes principales (épiaison)



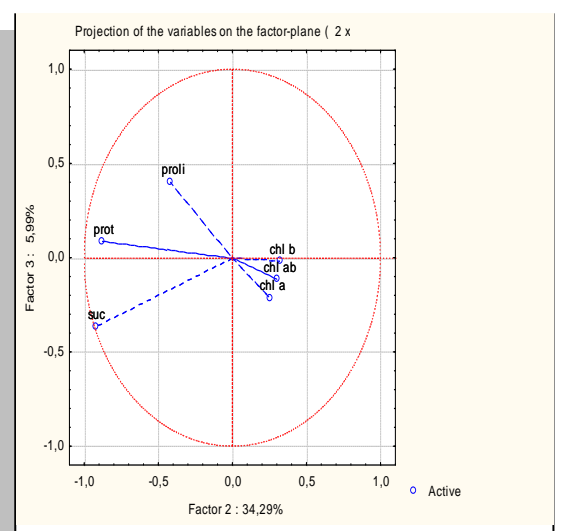
**Figure 302.** Projection des cases des facteurs 1 et 2



**Figure 303.** Analyse en composantes principales



**Figure 304.** Projection des cases des facteurs 2 et 3



**Figure 305.** Analyse en composantes principales

Au tallage, l'ACP sur le premier axe horizontal (51.59%) renseigne que tous les paramètres étudiés sont en corrélation positive ; mais sur l'axe vertical (24.79%) les chlorophylles a, b et (a+b) sont en corrélation négative avec proline, sucres solubles et protéines totales (figures 299 et 301). La projection des parcelles sur les axes des facteurs montre que les blocs 3, 4, et 5 sont les plus caractéristiques.

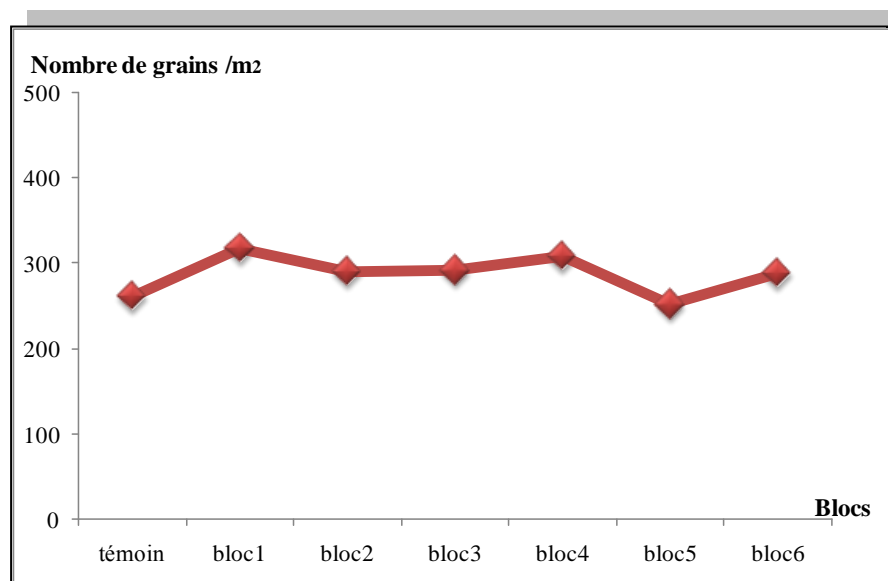
L'analyse en composantes principales à l'épiaison, et sur l'axe vertical qui présente 56,20 % de la variance totale montre une corrélation positive entre les paramètres biochimiques étudiés, alors que sur le deuxième axe qui présente 31,29 % de la variance totale, on observe une corrélation négative entre chlorophylles d'une part et proline, sucres solubles et protéines totales d'autre part (figures 303 et 305). Le bloc 5 est le bloc typique pour ce stade (figure 304).

L'accumulation de ces composés organiques a été mise en évidence chez plusieurs espèces végétales soumises à la contrainte du stress tels que le blé tendre et le blé dur (Ferhad *et al.*, 2011 ; Moaveni *et al.*, 2011 & Xiong *et al.*, 2012 ). La liaison entre l'aptitude d'accumulation de ces solutés et la tolérance des plantes au stress a fait l'objet de nombreuses discussions (Tahri *et al.*, 1998 & Qayyum *et al.*, 2011). Cette accumulation varie dans de larges proportions suivant l'espèce, le stade de développement .Les sucres et les acides aminés libres sont les solutés les plus importantes qui s'accumulent chez les céréales en condition de stress (Bensari *et al.*, 1990 & Zerrad *et al.*, 2008 ). Parmi les acides aminés, pouvant être accumulés, la proline représente l'une des manifestations les plus remarquables des stress et pollution. Son rôle a été rapporté par de nombreux auteurs (Stewart and Lee, 1974; Kauss, 1977 ; Pirzad *et al.*, 2011 & Xiong *et al.*, 2012). D'après les résultats enregistrés, le traitement mixte (pesticides et engrais) a montré en général un rôle important tant sur le plan physiologique par stimulation de l'accumulation des solutés organiques, que par l'amélioration du rendement des plantes (Frossard *et al.*, 2000 & Rahmoune *et al.*, 2004).

### 2.4.3. Paramètres agronomiques

#### 2.4.3.1. Nombre d'épis/m<sup>2</sup>

Dans cette campagne, on note un nombre d'épis moyen de 274,57. Le bloc 1 est caractérisé par le nombre le plus important 317, le bloc 5 donne 251, et le témoin 261 (figure 306). L'étude statistique révèle une différence significative entre les doses 5 et 2, et cette dernière et 3 (tableau 91).



**Figure 306.** Effet du traitement sur le nombre d'épis/m<sup>2</sup>

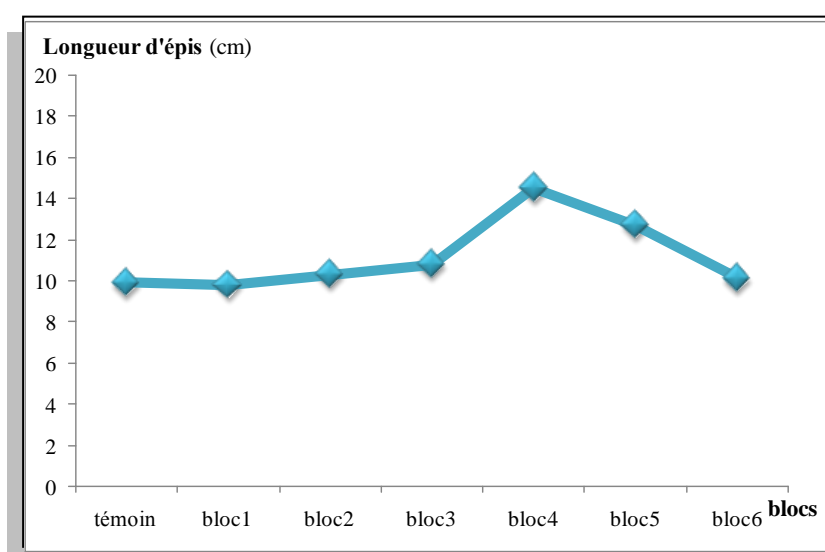
**Tableau 91.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Nombre d'épis/m<sup>2</sup>)

	<b>H</b>	<b>P</b>
<b>Nombre d'épis/m<sup>2</sup></b>	15.654729	0.0157

#### 2.4.3.2. Longueur d'épis

La longueur maximale est de 14,50 cm au niveau du bloc 4 et la minimale est 9,8 cm au niveau des du bloc 1 (figure 307).

A la lumière des résultats du test de Kruskal –Wallis, on peut dire qu'il y a une différence significative entre le bloc 1 et le témoin (tableau 92).



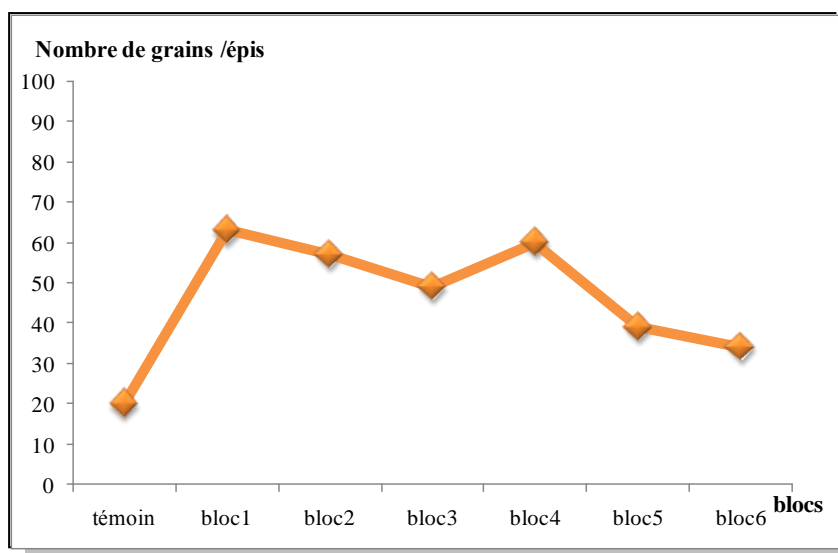
**Figure 307.** Effet du traitement sur la longueur d'épis

**Tableau 92.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Longueur d'épis)

	<b>H</b>	<b>P</b>
<b>Longueur d'épis</b>	16.39180	0.0118

#### 2.4.3.3. Nombre de grains / épis

Le nombre total des grains est de l'ordre de 328 grains/épis, avec une moyenne de 46 grains. Les parcelles du bloc 1 donnent 63 grains /épis tandis que celles du bloc 6 donnent 34 grains /épis (figure 308). L'analyse statistique montre la présence de différence significative entre le bloc 1 et le témoin (tableau 93).



**Figure 308.** Effet du traitement sur le nombre de grains / épis

**Tableau 93.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Nombre de grains / épis)

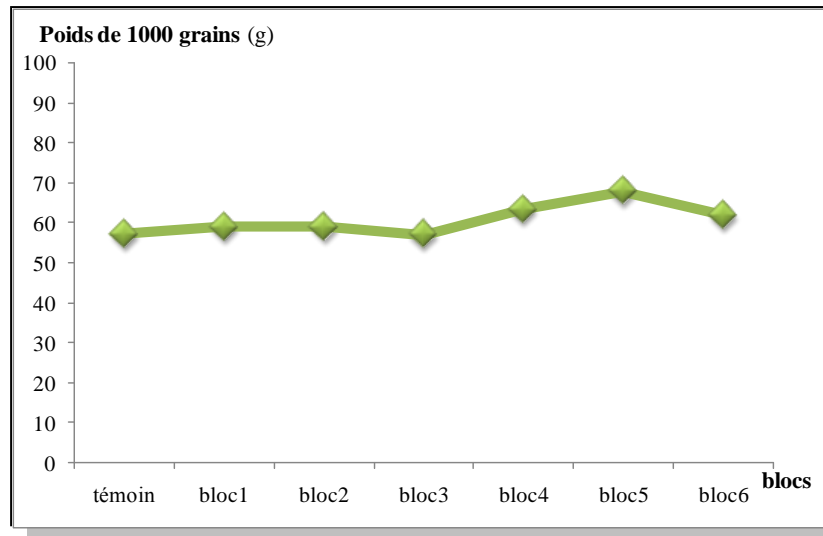
	H	P
Nombre de grains / épis	16.39180	0.0118

#### 2.4.3.4. Poids de 1000 grains

Ce paramètre est très caractéristique d'une culture, nous notons une variabilité des résultats au niveau des blocs où on enregistre 67.9 g (bloc 5) et 57 g (bloc 3). Le bloc témoin nous donne un poids de 57.1 g (figure 309).

Une différence significative est montrée par le test des médianes où  $p = 0.118$  (tableau 94).

Pas mal de recherches montrent la relation entre le poids de 1000 grains, la teneur en protéines et le rendement en blé dur. L'accroissement de la teneur en protéines a eu comme effet d'abaisser le rendement de semoule.



**Figure 309.** Effet du traitement sur le poids de 1000 grains

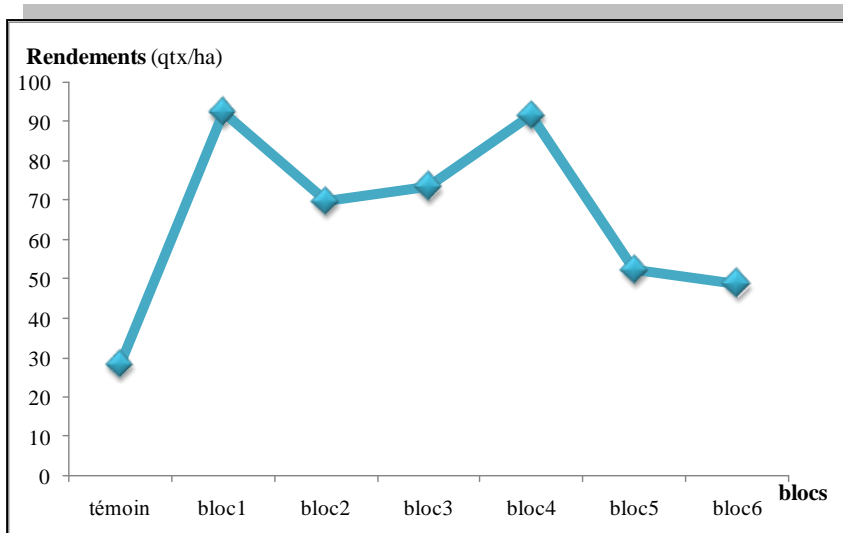
**Tableau 94.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Poids de 1000 grains)

	H	P
<b>Poids de 1000 grains</b>	16.39180	0.0118

#### 2.4.3.5. Rendements

Le rendement total des blocs étudiés est 521.44 qx/ha, alors que le rendement moyen est de l'ordre de 65.18 qx/ha. Le bloc 1 présente la valeur maximale 92.41 qx/ha, alors que 48.71 qx/ha est le rendement minimal représenté par le bloc 6. Le bloc témoin enregistre le rendement le plus faible 28.21 qx/ha (figure 310). Le test statistique renseigne sur l'existence d'une différence significative entre le bloc 1 et le témoin (tableau 95).

Beaucoup de recherches montrent que la relation entre le poids de 1000 grains, la teneur en protéines, en chlorophylle (a), (b) et le rendement en blé dur. L'accroissement de la teneur en protéines a eu comme effet d'abaisser le rendement de semoule. Le rendement maximum a été obtenu à partir d'échantillons possédant un poids de 1000 grains élevés (Matsuo, 1980 ; Blum *et al.*, 1990 ; Debaeke *et al.*, 1996 ; Whan *et al.*, 1996 & Fellah, 2002). Le traitement pesticides (fongicide) joue un rôle important dans la protection des cultures contre les champignons, en évitant des pertes de rendement dues aux maladies d'origine cryptogamique, en l'absence de traitement fongicide (Chevalier-Gérard, 1994).

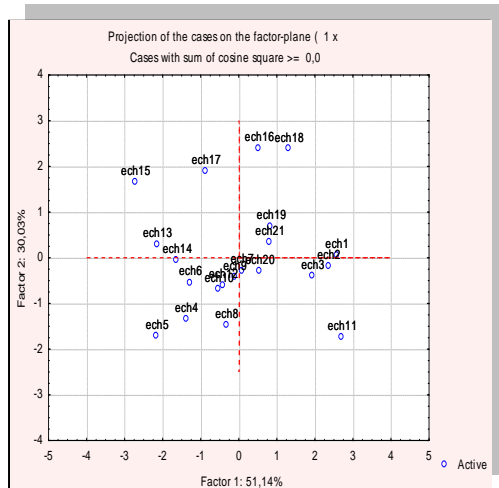


**Figure 310.** Effet du traitement sur le rendement

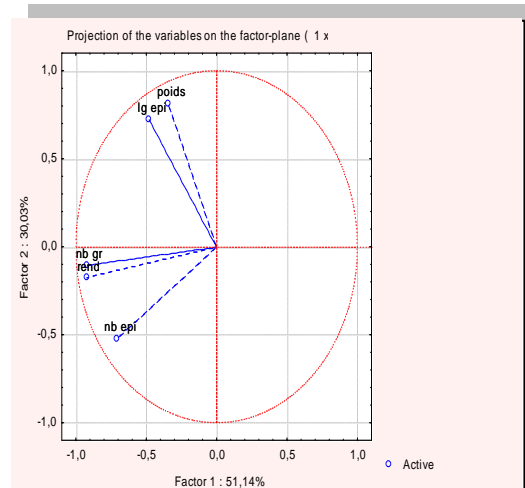
**Tableau 95.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Rendements)

	H	P
<b>Rendements</b>	16.39180	0.0118

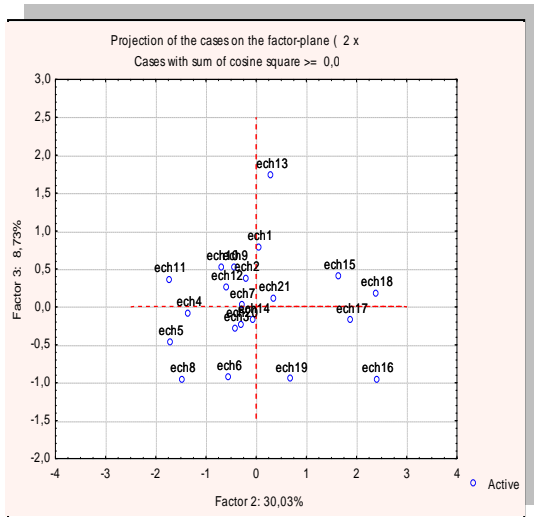
**a)- Analyse en composantes principales**



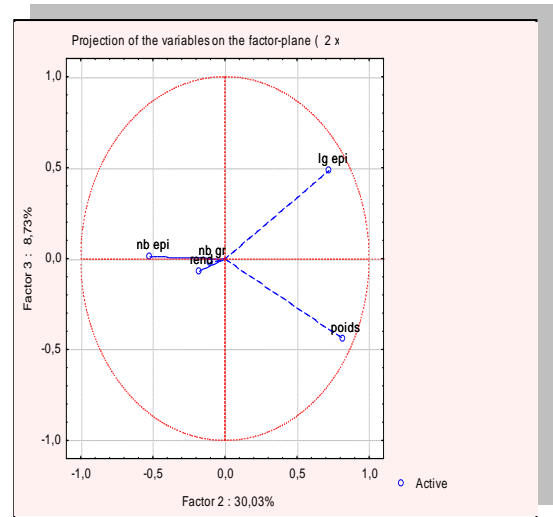
**Figure 311.** Projection des cases des facteurs 1et 2



**Figure 312.** Analyse en composantes principales



**Figure 313.** Projection des cases des facteurs 2 et 3



**Figure 314.** Analyse en composantes principales

Sur le premier axe horizontal qui explique 51.14% de la variance totale, les cinq paramètres sont en corrélation positive (figure 312). Cependant, sur le second axe (30.03%), la longueur d'épis et le poids de 1000 grains sont en corrélation négative avec le rendement, le nombre d'épis /m<sup>2</sup> et nombre de grains / épis (figure 314).

Les parcelles les plus représentées par les figures 311 et 313 sont celles des blocs 4 et 5.

La corrélation positive des paramètres du rendement est peut être liée à un bon travail du sol (labour), ce qui conduit à l'augmentation du rendement d'une campagne à une autre. Le labour est un facteur physique important pour aérer et humidifier le milieu, ce qui favorise la progression des racines pour exploiter l'eau et les sels minéraux dans couches profondes du sol (Lopez *et al.*,1996 ; Bonfil *et al.*,1999 ; Schillinger ,2001 ; Hemmat et Eskandari, 2006 & Angar *et al.*, 2011).

#### 2.4.4. Dosage des pesticides

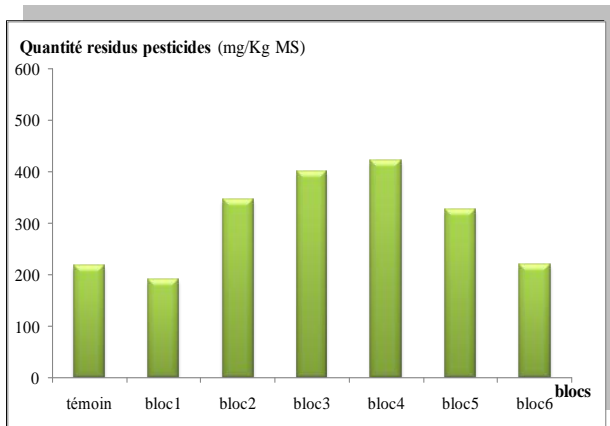
Dans le tallage, les résultats obtenus donnent une moyenne de 275,85 mg/kg MS. La plus grande quantité 420 mg/kg MS est enregistrée par le bloc 4 et la plus faible 190 mg/kg MS est notable au niveau du bloc 1 (figure 315). A l'épiaison, les quantités des résidus de pesticides utilisés ont diminué où on peut remarquer le bloc 6 avec 123 mg/kg MS (figure 316).

Le test de Kruskal-Wallis montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les doses du fertilisant, ainsi qu'entre le tallage et l'épiaison (tableau 96).

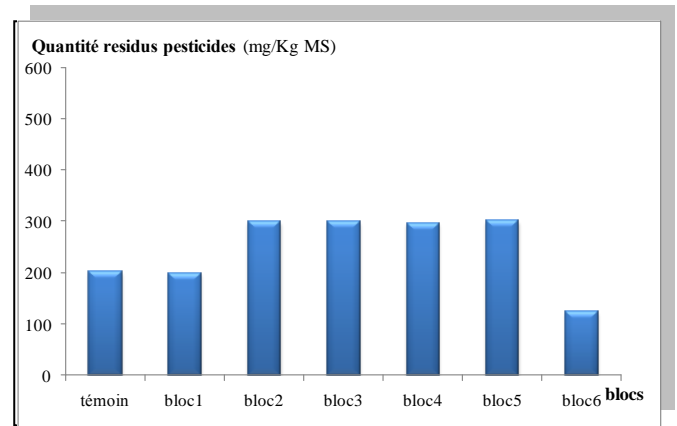
Le pH naturel des sols et la composante organique influencent significativement l'adsorption des matières actives des molécules de pesticides (Boivin, 2003), donc le changement du pH de la solution



du sol pendant l'épiaison joue un rôle dans le phénomène de dégradation. La sorption et la désorption sont des processus dynamiques qui interagissent avec la dégradation du composé. Dans les sols, les résidus présents à un temps donné peuvent être sous une forme extractible ou non. La diffusion des molécules pesticides, liée à leur solubilité, entraîne leur piégeage dans la matrice organo-minérale des sols. Au champ, l'hydrodynamique des sols gouverne le devenir des pesticides appliqués. Le suivi des quantités exportées par les eaux de drainage et ruissellement met en évidence des variations intra- et inter-saisons liées aux propriétés physico-chimiques des sols et des molécules (Perrin-Ganier *et al.*, 2006).



**Figure 315.** Effet du traitement sur la quantité des résidus de pesticides pendant le tallage



**Figure 316.** Effet du traitement sur la quantité des résidus de pesticides pendant l'épiaison

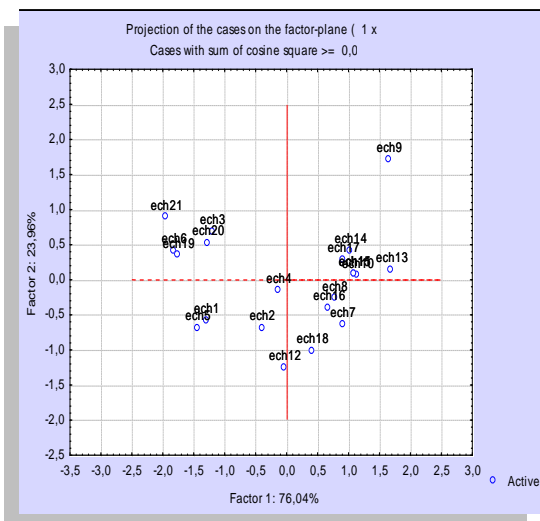
**Tableau 96.** Test des médianes de Kruskal-Wallis (Résidus pesticides)

	H	P
<b>Résidus 1</b>	12.56660	0.0505
<b>Résidus 2</b>	14.44806	0.0250
<b>Comparaison entre les prélèvements</b>		
<b>Résidus 1</b>		
<b>Résidus 2</b>	2.634147	0.1046

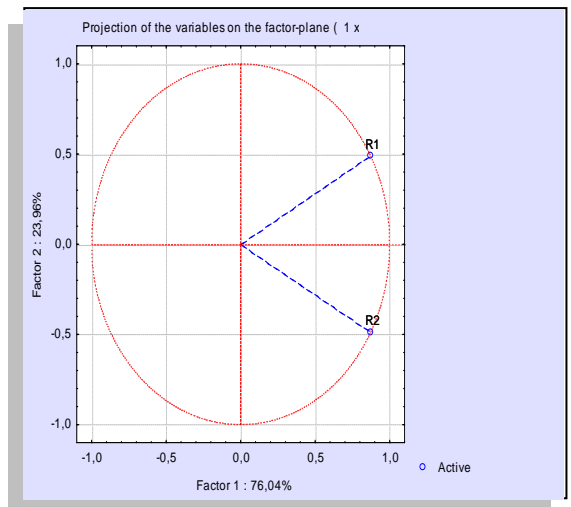
**Résidus 1 :** Résidus pesticides au tallage

**Résidus 2 :** Résidus pesticides à l'épiaison

### a)- Analyse en composantes principales



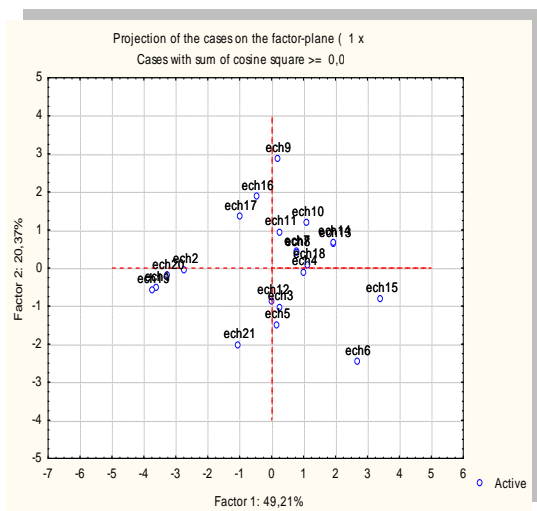
**Figure 317.** Projection des cases des facteurs 1et 2



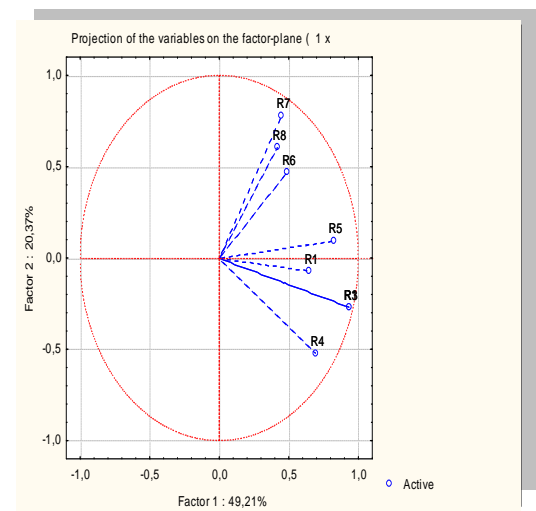
**Figure 318.** Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales montre sur l'axe 1 qui explique 76.04% de la variance, les quantités des résidus obtenus durant les deux prélèvements sont en corrélation positive. Une corrélation négative sur la seconde composante (23.96%). Le bloc 2 est le plus important (figure 317). Les produits de dégradation des molécules de pesticides utilisés peuvent s'accumuler dans les sols et entraîner un impact sur la pédofaune. De plus, l'utilisation pendant 4 ans pourrait conduire à des phénomènes de résistance des mauvaises herbes et des champignons, déjà observés pour certaines espèces) dont l'élimination deviendra problématique (Messéan, 2000 ; Shaner, 2000 & Darmency, 2010) et qui pourrait entraîner une augmentation des doses d'application des pesticides (Mamy *et al.*, 2011).

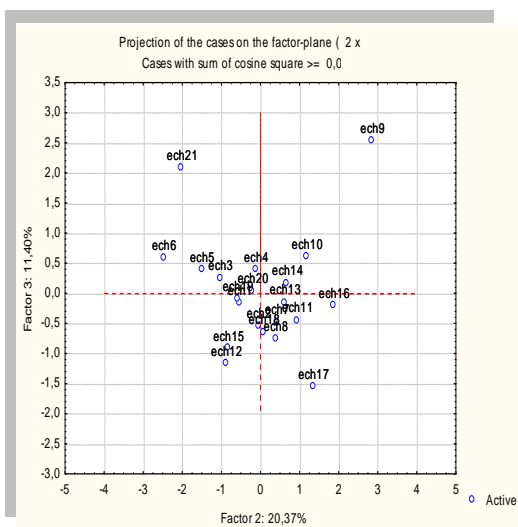
### b)- Analyses en composantes principales (résidus des 4 campagnes)



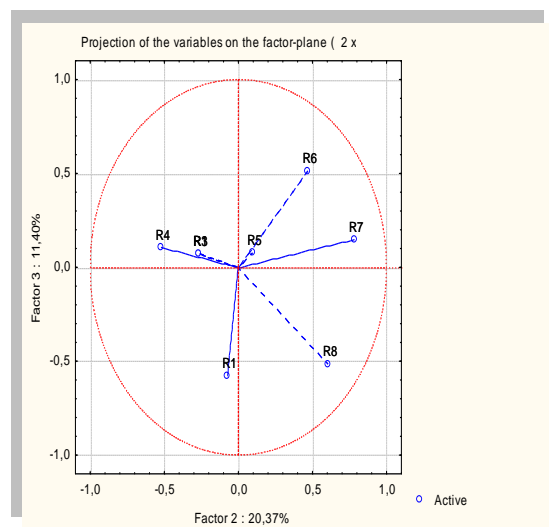
**Figure 319.** Projection des cases des facteurs 1et 2



**Figure 320.** Analyse en composantes principales



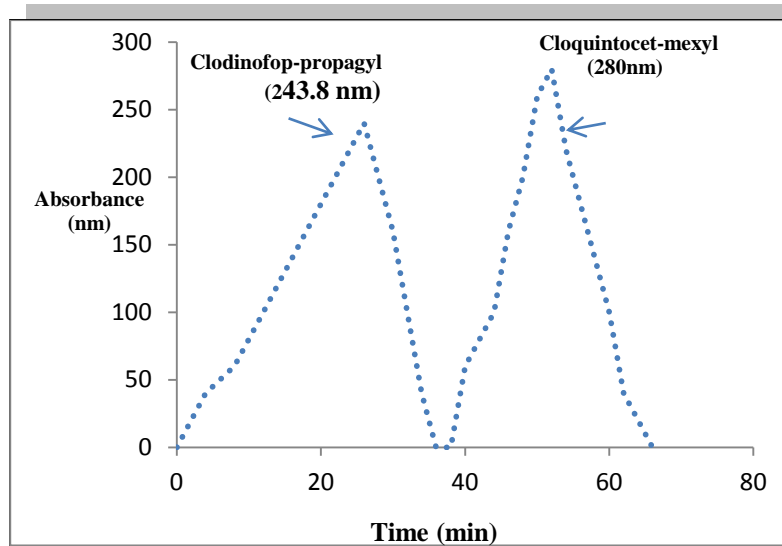
**Figure 321.** Projection des cases des facteurs 2 et 3



**Figure 322.** Analyse en composantes principales

D'après l'analyse en composantes principales des résidus des 4 campagnes, on peut dire que sur l'axe horizontal qui explique 49.21% de la variance, tous les résultats obtenus durant la période d'essai sont en corrélation positive. Par ailleurs, les résidus de la campagne 2009-2010 sont en corrélation négatives avec ceux obtenus durant la campagne 2011-2012. A la lumière de la projection des sous parcelles sur les composantes principales, on trouve que les blocs caractéristiques sont 2, 5, et 6.

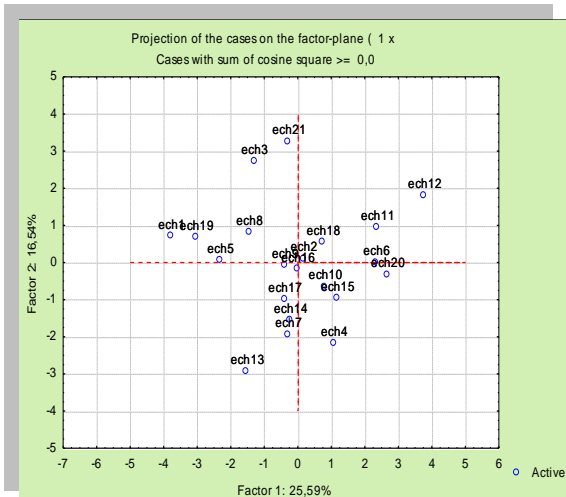
On peut expliquer la corrélation négative entre les quantités de résidus des pesticides obtenus durant les campagnes 2009-2010 et 2011-2012, par la dégradation biotique et abiotique des molécules d'où il intervient le rôle des acides humiques, fulviques et l'argile dans la transformation des pesticides (Armstrong, 1968 ; Chester, 1989 ; Muir, 1991 & Mietinnen *et al.*, 1993). Pour les argiles, l'intervention ou non de la catalyse dans la dégradation d'une molécule dépend de leur nature minéralogique, tandis que la nature des produits formés peut varier, pour une argile donnée, en fonction du cation ou du métal de transition impliqué dans l'adsorption (Grébil, 2001 & baba soro *et al.*, 2012).



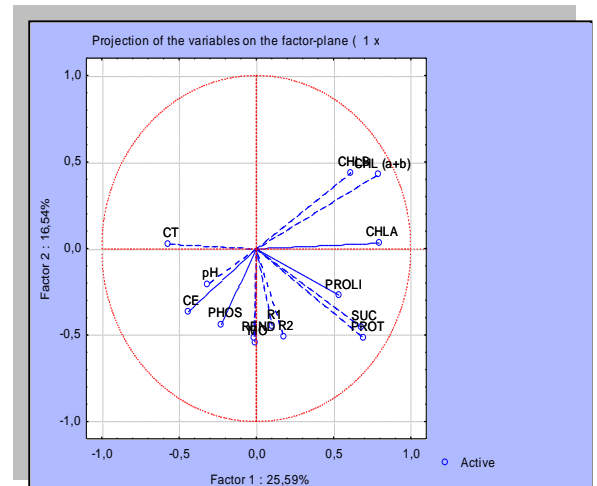
**Figure 323.** Spectre d'absorbance de Clodinofof-propagyl et Cloquintocet-mexyl en fonction du temps

Le sol contient les traces de deux matières actives de topik ; dont le clodinofof-propagyl est absorbé à une longueur d'onde 243,8 nm et celle de cloquintocet –mexyl à 280 nm (figure 323).

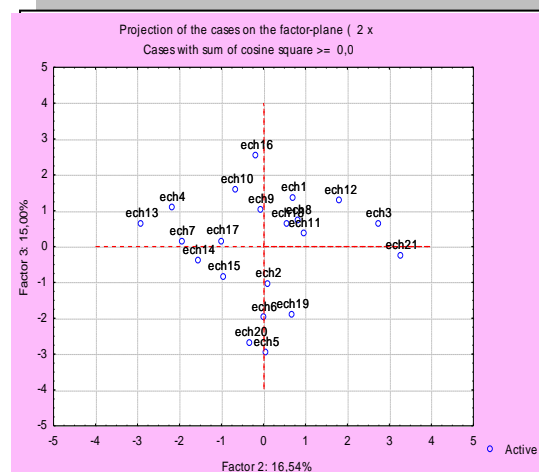
**C) - Analyse en composantes principales (paramètres confondus tallage)**



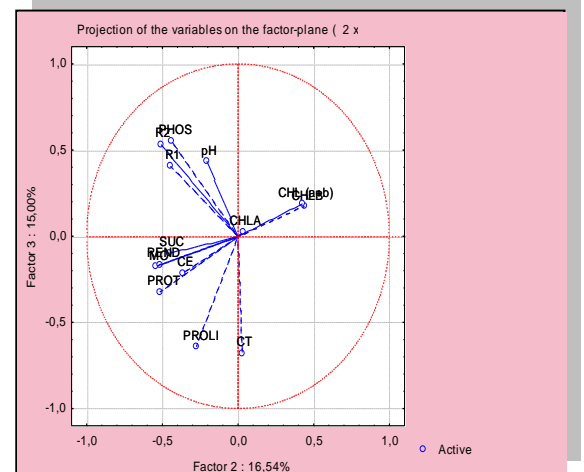
**Figure 324.** Projection des cases des facteurs 1 et 2



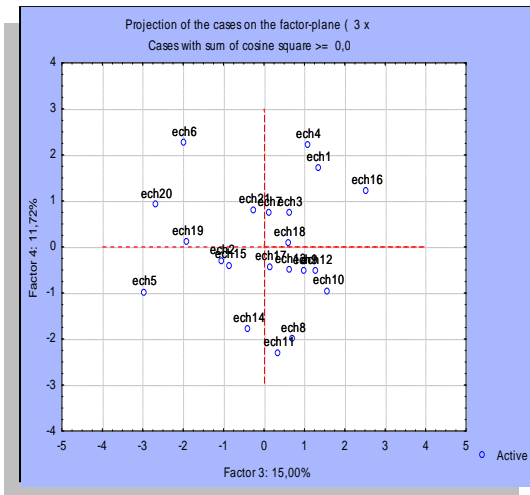
**Figure 325.** Analyse en composantes principales



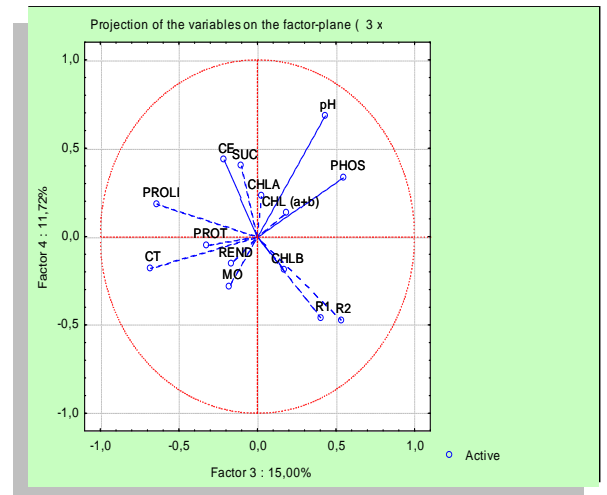
**Figure 326.** Projection des cases des facteurs 2 et 3



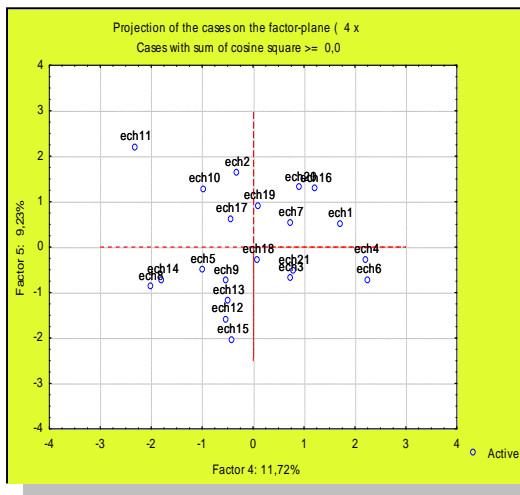
**Figure 327.** Analyse en composantes principales



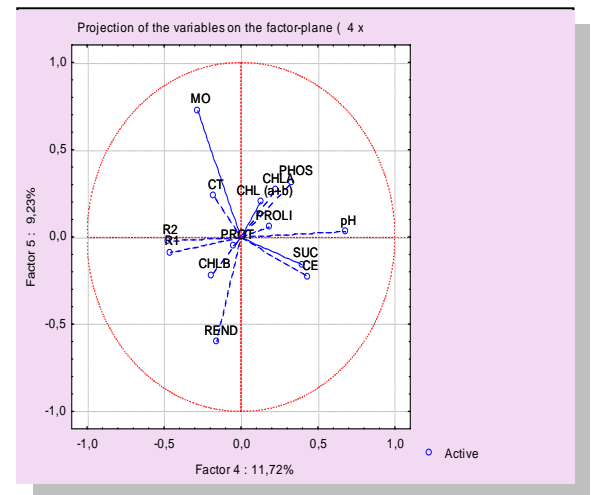
**Figure 328.** Projection des cases des facteurs 3 et 4



**Figure 329.** Analyse en composantes principales

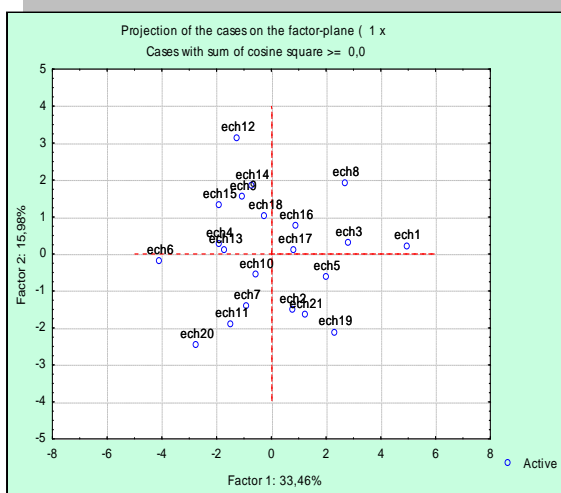


**Figure 330.** Projection des cases des facteurs 4 et 5

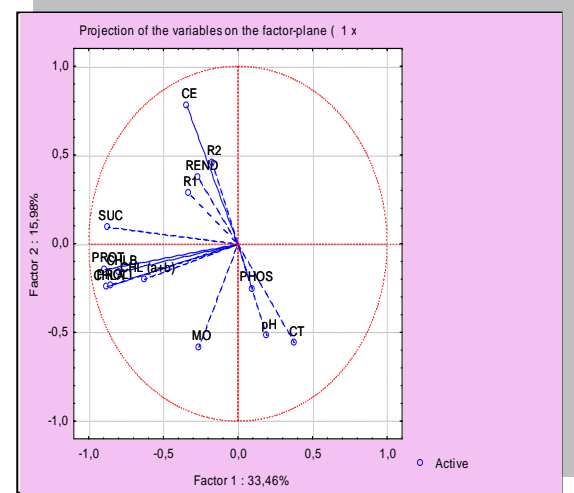


**Figure 331.** Analyse en composantes principales

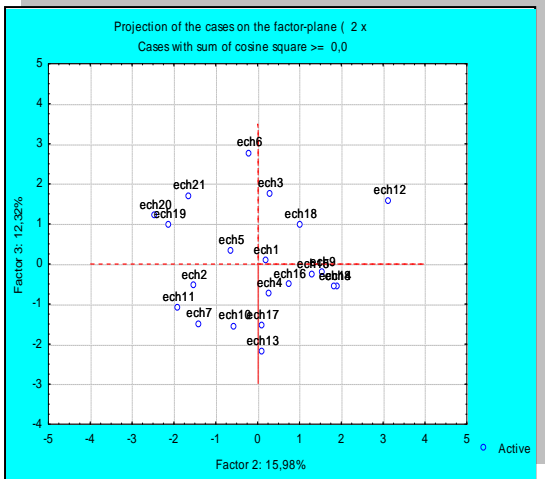
**d) - Analyse en composantes principales (paramètres confondus à l'épiaisson)**



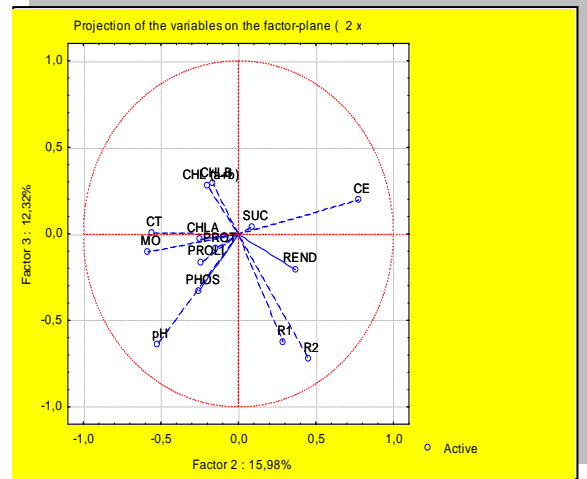
**Figure 332.** Projection des cases des facteurs 1 et 2



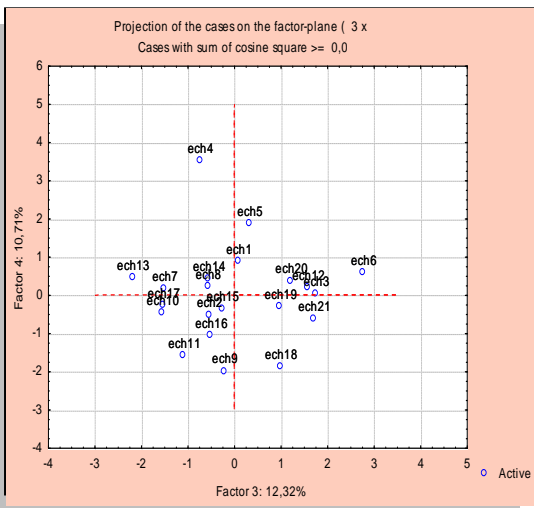
**Figure 333.** Analyse en composantes principales



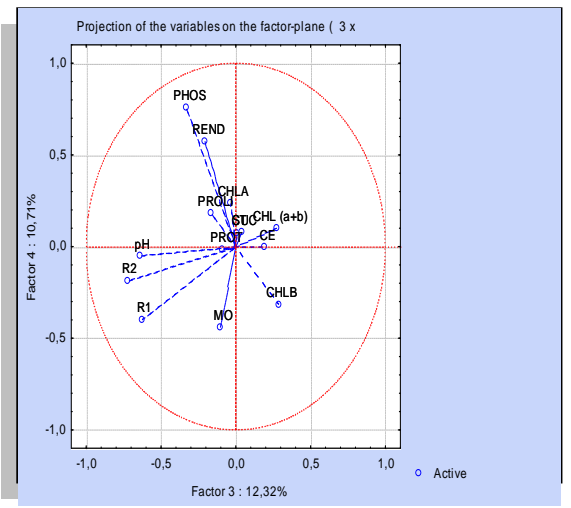
**Figure 334.** Projection des cases des facteurs 2 et 3



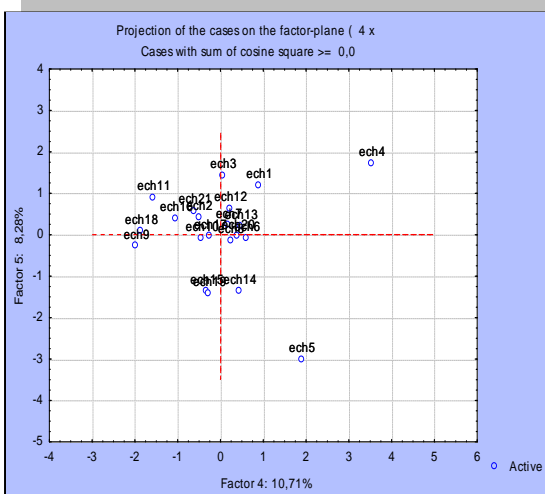
**Figure 335.** Analyse en composantes principales



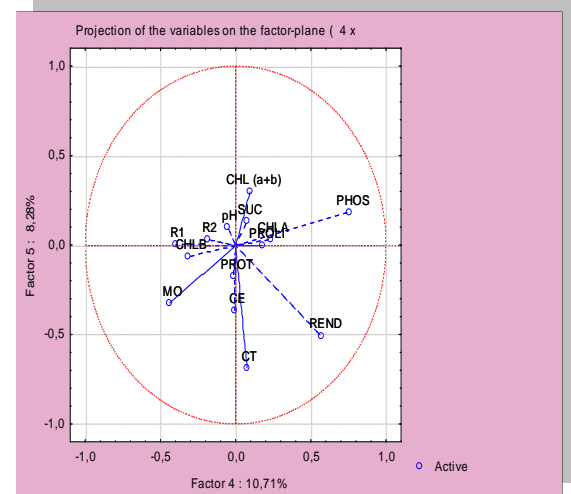
**Figure 336.** Projection des cases des facteurs 3 et 4



**Figure 337.** Analyse en composantes principales



**Figure 338.** Projection des cases des facteurs 4 et 5



**Figure 339.** Analyse en composantes principales

Au tallage, sur l'axe vertical (25,59 %), nous remarquons que la chlorophylle est en corrélation négative avec les propriétés du sol, alors qu'elle est positivement corrélée avec le rendement et les résidus de

pesticides (figure 325). La même remarque au niveau du deuxième axe (16,54 %) où l'acidité du milieu, le phosphore et les résidus forment un groupe corrélé positivement (figure 327).

A l'épiaison, les caractéristiques physicochimiques du sol sont en corrélation négative avec la conductivité électrique, les résidus de pesticides et le rendement. Les paramètres physiobiochimiques du végétal sont en corrélation positive avec les résidus et les caractéristiques physicochimiques du sol (figure 333). Sur le deuxième axe (15,98 %) le pH, la conductivité électrique ainsi que les résidus de pesticides sont les paramètres caractéristiques. Le troisième axe (12,32 %) la chlorophylle est négativement corrélée avec les autres paramètres étudiés (figure 337).

La chlorophylle, principal pigment foliaire, c'est un indicateur pour évaluer le rendement potentiel d'une culture, pour détecter des carences nutritionnelles ou encore divers types de pollutions. C'est aussi une variable clé des modèles du cycle du carbone, et plus généralement des modèles climatiques (Féret, 2009). La croissance de la plante est influencée directement par la stimulation des processus biochimiques et métaboliques telle que la chlorophylle ou indirectement par l'amélioration de la nutrition minérale à partir de la solution du sol (Labanowski *et al.*, 2011 ; Tahiri *et al.*, 2014 & Ketif *et al.*, 2016) . Il existe une relation entre croissance des plantes et rendement, quelle que soit le traitement appliqué sur la culture ; et tient compte de la mobilisation des sucres accumulés dans les tiges durant la période préfloraison pour le remplissage des grains. La fertilisation et le traitement pesticide qui contrôle les pathogènes par l'inhibition de la respiration mitochondriale ont montré des effets de prolongation de la durée de la surface verte de la dernière feuille et d'augmentation du poids moyen en grain. En effet, le poids maximum en grains peut être substantiellement augmenté en prolongeant la durée de remplissage des grains par une augmentation de la durée de la surface verte de la dernière feuille émergée (Gooding *et al.* 2000 ; Mackels, 2014 & Serra, 2015).

## **Conclusion**

Les sols de la campagne 2012-2013 caractérisés par des pH acides qui favorisent l'accumulation des quantités importantes de la matière organique et par la suite l'élévation des teneurs en phosphore assimilable. Le blé montre une biosynthèse des matières organiques et énergétiques influencée par la stimulation de la chlorophylle, ce qui induit à une augmentation des rendements de cette campagne par rapport aux campagnes précédentes. Les doses 92 unités, 60 unités et 25 unités de phosphore donnent des rendements meilleurs. L'accumulation de très faibles quantités de proline durant cette campagne par rapport aux campagnes 2009-2010, 2010-2011 et 2011-2012, cela pourrait s'expliquer par le fait que la plante cherche à protéger son intégrité morphophysologique en réponse aux dommages et les effets défavorables ; d'autre part le *Triticum durum* est une espèce tolérante et résistante et pourra donner plus

de rendement malgré la situation d'un stress. Nous pouvons expliquer l'accumulation des résidus de Topik dans le sol, par la demi-vie de ce dernier (4,5 jusqu'à 5 ans) et la structure chimique qui lui rend difficilement dégradable.

### **3. DISCUSSION GENERALE**

Les différentes études ont permis de répondre à nos objectifs, qui sont l'impact de la fertilisation phosphatée et les pesticides sur quelques paramètres physio biochimiques de la culture de *Triticum durum*, les caractéristiques agronomiques du blé ainsi que certaines propriétés physicochimiques du sol.

L'étude a été effectuée sur un sol argileux, de texture fine argileuse correspondant à des sols plastiques, difficiles à travailler, fortement adhérents et présentant un optimum de rétention d'eau utile (Bonnaud et Souchier, 1979 ; Mouroux, 1988 ; Morel, 1989 ; Bouharas et Oumerzouk, 1993 ; Calvet, 2003 ; CEQ, 2003 ; Chakib Edelahi, 2004 ; AQC, 2004 ; Deniz, 2004 ; CEBTP, 2005 ; MEA, 2005 ; Calvet *et al.*, 2006 ; Girard *et al.*, 2011 ; Mélanie, 2015 ; Ketif *et al.*, 2015 & Ketif *et al.*, 2016).

Durant les campagnes d'essai en automne et avant le semis, les valeurs du pH étaient de 6.81 à 7.5. Ce pH était au voisinage de la neutralité qui convient bien à la culture du blé (Morel, 1989 & Ketif, 2008).

Durant le stade tallage de la culture, on a enregistré une augmentation du pH de 7.7 à 8.5 ce qui se rapproche de l'alcalinité, ces valeurs élevées sont fréquemment corrélatives des difficultés d'assimilation par les plantes de certains éléments qui leur sont indispensables, tels que les processus d'insolubilisation qui limitent l'approvisionnement de la phase liquide. Ces phosphates calciques apportés au sol évoluent vers les formes moins solubles qui sont les phosphates octacalciques, il en résulte pour les sols calcaires la nécessité de majorer les apports phosphatés (Morel, 1989). Cependant, cette variation peut être due aussi, en hiver, à l'augmentation permanente du volume relatif de la phase liquide en diminuant la concentration en électrolytes, et par là même, l'intensité des processus d'échange, la teneur en ions  $H^+$  diminue et le pH augmente.

Au printemps et en été, le phénomène inverse se produit, le pH diminue (Morel, 1989). A l'épiaison et fin cycle de la culture, on a enregistré des valeurs de pH acide. Des études ont montré que l'acidification est liée à la libération de  $H^+$  et peut induire des augmentations du phosphore assimilable et son prélèvement par les plantes. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'acidification entraîne la dissolution des minéraux phosphatés (Hinsinger, 2001 ; Neumann et Romheld, 2002 & Achat, 2009).



Les engrais aussi interviennent dans l'abaissement du pH du sol, comme les superphosphates, les phosphates naturels et les sels de potassium (Morel, 1989), c'est pourquoi dans notre étude les doses du phosphore ont fait une différence significative entre les médianes du pH pendant les stades de prélèvements.

En ce qui concerne le  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  (acidité de réserve) nous marquons aussi une légère diminution dans les valeurs de pH (Shoemaker, 1962).

La conductivité électrique donne une idée sur la concentration en électrolytes dans la solution du sol (Mousselon *et al.*, 2015) d'une part, et du degré de la salinité des sols d'autre part (Wallach, 2008 ; Lemay *et al.*, 2012 ; Prémont, 2015 & Calvet, 2015) ; les valeurs varient de 0.1 à 0.24 mS/cm après l'épandage des engrais phosphatés et azotés. Ces valeurs indiquent que notre sol est non salin selon l'échelle de conductivité électrique des sols (USSS, 1954). Au tallage et épiaison de la campagne 2012-2013, nous marquons des valeurs importantes de la conductivité électrique. Cette salinité peut être due à l'accumulation de sels solubles à la surface du sol à cause d'une sécheresse suivie d'une évaporation, ce phénomène empêche fortement la germination des semences et endommage les plantes établies.

La porosité du sol est variable selon les saisons et les stades de développement de *Triticum durum*, elle est faible pour certaines parcelles et excellente pour d'autres, ceci peut être expliqué par l'élongation des racines dans les profondeurs du sol et l'activité biologique (pédofaune).

La matière organique améliore la structure du sol (Mathieu *et al.*, 2009 ; Clavet *et al.*, 2011 ; Pellerin *et al.*, 2013 ; Gregorich *et al.*, 2014 & Gasser *et al.*, 2015), contribue à son aération et augmente sa résistance à la compaction. Nous notons que les valeurs de la matière organique sont liées au carbone (Bissonnais, 2001 ; Girard, 2005 ; Duprarque *et al.*, 2011 ; Salducci, 2011 & Balaguer, 2015). La teneur de la matière organique du sol de notre étude, connaît une variation temporaire importante. Avant l'installation de la culture, on a remarqué des teneurs entre 2.25 et 5.76 %, puis au tallage, elles sont passées jusqu'à 8.29 % ; cette augmentation est peut être due à la dégradation primaire des résidus de la culture précédente, puis durant l'épiaison nous avons enregistré une chute de la teneur jusqu'à des valeurs entre 0.9 et 1.2 %, cette diminution est due certainement au phénomène de minéralisation (Morel, 1989 ; Achat, 2009 & Messiga, 2010). La minéralisation de la matière organique contribue au réapprovisionnement du sol en phosphore assimilable, il peut atteindre 1.7  $\mu\text{g/g/jour}$  (Achat, 2009). Après la récolte de la culture, nous observons une autre augmentation de la teneur en matière organique du sol due au phénomène de restitution par les résidus de la culture (Paille, racine..).

Le calcaire est un minérale qui ne se dissous pas facilement, c'est pour cela que les quantités du calcaire total sont restés presque les mêmes durant l'étude, nous pouvons classer nos sols dans le type des sols qui sont modérément calcaires selon les normes internationales (Soltner, 1981).

Le calcaire actif est une fraction fine du  $\text{CaCO}_3$  total, c'est une fraction transitoire entre le calcaire total ( $\text{CaCO}_3$ ) et le calcium échangeable ( $\text{Ca}^{2+}$ ). Les résultats obtenus montrent des faibles teneurs en calcaire actif (< à 8 ‰), donc pas de phénomène de chlorose.

L'étude sur le phosphore assimilable du sol au cours des 4 campagnes, montre qu'après l'épandage des différentes doses d'engrais phosphaté, la teneur du sol en phosphore assimilable dosé par la méthode Joret-Hebert varie avant l'installation de la culture du *Triticum durum* de 1.1 à 10.11 mg/kg sol. Des études contextes révèlent que la teneur du sol en phosphore varie selon le type du sol, et aussi selon la méthode de dosage utilisée (Morel *et al.*, 1992 et 2000 ; Johnston *et al.*, 2001 & Frossard *et al.*, 2004).

Au tallage de la culture du blé, nous remarquons des chutes des teneurs du sol en phosphore assimilable, qui varie entre 0.1 à 1.77 mg P kg<sup>-1</sup> sol, cela est dû aux phénomènes de précipitation et d'adsorption du phosphore dans le sol ; les principales surfaces des sols capables de sorber le phosphore sont celles des oxydes de Fe et d'Al, des complexes organiques d'Al et de Fe, du Ca et des argiles minéralogiques (Gervy, 1970 ; Barrow, 1987 ; Hinsinger, 2001 ; Achat, 2009 & Frossard *et al.*, 2011 ). Le phosphore en solution du sol représente 1 % du phosphore adsorbé (Achat, 2009 & Messiga, 2010), pour des sols contenant de 0.12 et 2.3 mg P kg<sup>-1</sup> sol, et après le dosage du phosphore par la méthode de dilution isotopique nous trouvons des teneurs entre 2.0 et 42.8 mg P kg<sup>-1</sup> sol (Messiga, 2010 & INRA, 2015).

Durant le stade épiaison, nous rencontrons une augmentation la teneur du sol en phosphore assimilable par rapport au tallage, ceci est due aux phénomènes de désorption et de dissolution du phosphore adsorbé et précipité du sol (Gervy, 1970 ; Achat, 2009 & Messiga, 2010 ), à ce stade, nous remarquons aussi une chute du taux de la matière organique du sol, et par sa minéralisation elle contribue au réapprovisionnement de la solution du sol en phosphore assimilable de 1.7 µg/g/jour (Achat, 2009). Il y a une faible corrélation négative entre phosphore assimilable du sol et le pH du milieu. La quantité de phosphore diffusible, c'est-à-dire d'ions phosphore susceptibles d'être transférés depuis la phase solide du sol vers la solution, du fait d'un gradient de concentration (Jungk et Claassen, 1997), sont extrêmement variables dans un horizon donné. Par exemple, les quantités de phosphore diffusible en 10000 minutes (1 semaine) varient entre 1 et 39 µg/g dans la couche 0-15 cm (Achat, 2009).

Dans notre étude, nous remarquons que la concentration du phosphore assimilable influence beaucoup les caractéristiques physio-biochimiques de la plante, parce que le phosphore est un élément vitale dans l'élaboration de la photosynthèse, des sucres et des protéines, ADN, ARN, ATP (Gervy, 1970 ; Havaux, 1988 ; Marschner, 1995 ; Aubert, 2007 & Achat, 2009). Cependant d'autres auteurs tels que Berova (2002) et Youbi, (2005) affirment le contraire.

Nos résultats ne semblent pas concorder avec ceux de Puritch et Barker (1967), qui mettent en évidence un effet toxique des xénobiotiques sur la synthèse des chlorophylles, de même qu'une perturbation de l'aspect morphologique externe et interne des chloroplastes des feuilles des plantes (Hedegus *et al.*, 2001 ; Pal *et al.*, 2002 ; Wang et Zhoo, 2005 ; Ketif, 2008 ; Kapotis *et al.*, 2009 & Bhatt *et al.*, 2010) enregistrent une diminution des teneurs en pigments chlorophylliens suite à un stress de la variété Waha. Les résultats obtenus dans notre travail concordent beaucoup plus avec certains auteurs (Harrieche, 2004 ; Gheraibia *et al.*, 2014 ; Terfaya *et al.*, 2015 & Terfaya, 2015) qui rapportent un effet stimulateur des xénobiotiques sur les teneurs en chlorophylles.

Les plantules traitées renferment des quantités importantes des sucres solubles par rapport au témoin. Nous remarquons aussi qu'il y a une relation entre les sucres solubles et la synthèse des pigments chlorophylliens. En effet, les sucres solubles proviennent de la photosynthèse et l'énergie lumineuse réduit le CO<sub>2</sub> en molécules organiques qui sont une source d'énergie pour les plantes telles que les glucides (Bonjean *et al.*, 1990 ; Bojovic *et al.*, 2005 ; Meksem-Amara 2007 ; Ketif, 2008 ; Bordjiba et Ketif, 2009 & Khodadi *et al.*, 2014 ).

En effet, la plante cherche à protéger son intégrité morpho-physiologique en réponse aux dommages, stress et effets défavorables. L'élaboration des enzymes et des protéines totales explique l'augmentation observée des quantités des protéines totales des plantules traitées par rapport aux témoins (Shewry *et al.*, 1987 & Dec *et al.*, 1997). Les concentrations modérées des xénobiotiques absorbés par les plantes n'influent pas beaucoup sur les teneurs en protéines Kloskowski *et al.*, 1992 ; Deguine *et al.*, 2004 & Ketif, 2008).

Les résultats illustrés par la quantité de la proline montrent qu'il y a une augmentation de cette dernière au niveau des plantules des blocs traités par rapport au témoin durant les campagnes 2009-2010 et 2010-2011. Cette élévation est en relation avec l'existence des molécules toxiques issues de la dégradation des matières actives des molécules de pesticides dans le sol. Les résultats ne sont pas en concordance avec ceux de Ketif (2008) et Slama *et al.* (2005) qui ont enregistré une augmentation de la

proline au niveau des plantules traitées lors du stress dû aux xénobiotiques pour *Triticum durum* Desf (variété Waha).

D'une manière générale, l'accumulation de proline est une des réponses adaptatives déclenchées par la plante face aux contraintes de l'environnement. L'acidité du milieu inhibe l'activité microbienne qui favorise l'accumulation des deux matières actives de Topik (Chu *et al.*, 1978 ; Deraissac, 1992 ; Delauney, 1993 ; Hare *et al.*, 1993 ; May et Leaver, 1993 ; Holopainen, 1994 ; Belkherdja et Benkabilia, 2000 ; Kapotus *et al.*, 2002 ; Ketif, 2008 ; Belkherchouche *et al.*, 2009 & Laala *et al.*, 2013 ).

Par ailleurs, une diminution de proline durant les deux campagnes 2011-2012 et 2012-2013 est en relation avec les teneurs en Clodinafop-propargyl et Cloquintocet-mexyl existantes dans le sol.

L'analyse en composantes principales, sur le premier axe fait sortir que la plus part des paramètres physicochimiques du sol sont positivement corrélés entre eux. Sur le second axe, on trouve des corrélations positives entre le phosphore assimilable et l'argile. Les campagnes montrent une corrélation négative entre le phosphore assimilable et l'ensemble du pH et la conductivité électrique.

Concernant les troisième, quatrième et cinquième axes, la conductivité électrique est en corrélation négative avec la porosité, calcaire total, matière organique et phosphore (Lovato, 2006).

Les paramètres physio biochimiques de la plantes sont corrélés négativement avec les chlorophylles, alors que le facteur de stress, durant les quatre ans d'étude, montre une corrélation négative avec les autres (Ait-Kaki, 1993 ; Marschner, 1995 ; Moujahid *et al.*, 2004 ; Aubert, 2007 & Charfia ,2010).

Le contrôle simultané de la qualité et du rendement de plusieurs plantes est un grand défi pour les agriculteurs (Bertin *et al.*, 2000 ; Tahi, 2008 & Ben Mbarek *et al.*, 2013) , notre expérience montre que les deux doses 92 unités et 60 unités du phosphore donnent les rendements meilleurs. La campagne 2012-2013 est la meilleure de point de vue rendements et teneurs en Clodinafop-propargyl et Cloquintocet-mexyl.

On ce qui concerne le dosage des résidus de pesticides dans le sol et d'après les normes ISO 10382 en 2002 qui est applicable dans tous les types de sols, les limites de détection d'une pollution causé par les pesticides est de l'ordre de 0,1 µg/Kg à 0,4 g/Kg (Punia *et al.*, 2006 & Kumar *et al.*, 2014).

Les sols ont reçu les mêmes doses de pesticides pour toutes les campagnes (50l/ha). Les quantités retenues des pesticides sont variables d'un stade à un autre (El-Khanagry, 2005 ; Barrier-Guillot *et al.*, 2006 & Gourdin *et al.*, 2015), donc l'application des phénomènes de dégradation ( Mathiassen *et al.* ,

2000 ; Kirka, 2005 ; Raffel *et al.*, 2010 ; Bellink *et al.*, 2015 & INERIS , 2015) et de transport des résidus à la profondeur, par le lessivage, l'infiltration, ruissellement impliquent une menace des couches profondes (Medd *et al.*, 2001 ; Sugata *et al.*, 2007 ; Rapparini, 2012 ; Carluer *et al.*, 2014 ; Bernard *et al.*, 2015 & Rashmi *et al.*, 2015 ).

Toute pratique agricole durant les 4 campagnes modifiant les facteurs intervenant directement ou indirectement dans la dégradation de Zoom, Topik et Ortiva aura une incidence dans la formation des résidus. Il peut s'agir des modifications de l'activité biologique impliquée dans la transformation, ou des modifications de la matière organique des sols.

Nos résultats ce concorde avec ceux de Saini *et al.*, (2001) et Kankou,(2004) qui ont trouvé des traces de résidus de pesticides dans des sols, les valeurs varient entre 8µg/Kg jusqu'au 38µg/Kg de matière sèche. Nous pouvons dire qu'il existe des liaisons mises en œuvre entre les matières actives et les constituants du sol, des liaisons physiques, cette force d'attraction peut être due au concours de la matière organique et la fraction argileuse du sol.

On peut distinguer aussi, l'influence des demi-vies des pesticides étudié, le Cloquintocet-mexyl a une durée de vie de l'ordre de 5 ans à pH acide, concernant le Triasulfuron 31,3 jours à pH 5 et > 1000 jours à pH 9, mais le dicamba est de 30 jours à pH 5 à 9 (FEPA ; 1995 ; Schimazu *et al.*, 2001 ; Dodd, 2005 ; Taylor, 2012 ; Zhigang Shen *et al.*, 2012 ; Guo *et al.*, 2014 ; PPDB, 2014 ; Phyteurop, 2015 & Nieto – Garcia *et al.*, 2015).

L'accumulation des résidus de Topik dans le sol est considérée comme une bombe à retardement en raison du stockage. Cela est à mettre en relation avec la réversibilité de ce stockage. Une fraction de ces produits de dégradation provoque des modifications de l'organisation des constituants des sols lors des cycles d'humectation - dessiccation, ou à l'intervention de l'activité biologique dégradant une partie de la matière organique et libérant les matières actives qui lui étaient associés. Cette réversibilité du stockage de Clodinafop-propargyl et Cloquintocet-mexyl peut avoir des répercussions environnementales, les faibles proportions libérées peuvent contribuer à l'alimentation progressive à très faibles concentrations donc la contamination des milieux. nous serons face à des phénomènes de contamination ultra-diffuse, différée dans le temps (Fuhremann et Lichtenstein, 1978 ; Khan et Ivarson, 1982 ; Yee *et al.*, 1985 ; Dec et Bollag, 1988; Dec *et al.*, 1990 ; Gevao *et al.*, 2001 ; Barriuso *et al.*, 2004 & Ketif *et al.*, 2016).

## Conclusion générale

Le phosphore est un élément nutritif essentiel pour les végétaux, il se trouve à l'état naturel dans le sol ou combiné avec d'autres molécules (apports artificiels). Dans cette étude, nous avons essayé de mettre en évidence l'influence d'une application des différentes doses d'un engrais phosphaté (Super phosphate) sur le sol et le végétal (*Triticum durum*) en plus l'effet des pesticides sur le sol et le blé dur.

Les pesticides sont des produits phytosanitaires de nature chimique, ils sont utilisés pour la protection des cultures à grande échelle.

Dans ce cadre nous avons suivi certains paramètres physiques, physicochimiques, biochimiques et agronomiques pour évaluer l'impact de l'interaction de ces deux molécules sur les propriétés de notre sol, et leur influence sur les caractéristiques biochimiques et agronomiques sur notre culture.

Les résultats obtenus d'après les analyses physiologiques et morphologiques affirment la bonne qualité des grains de cette variété, qualifiée de semences aptes aux cultures.

Les analyses granulométriques montrent que le sol est caractérisé par une teneur de 50.9 % d'argile, 41.24 % de sable et 7.04 % de limon, c'est une tendance de texture argileuse, dont les valeurs de l'humidité hygroscopique ne dépassent pas les 10 %. L'étude du pH a montré que ce dernier est un facteur très important pour équilibrer la vie du végétal, il est variable suivant les saisons, il est au voisinage de la neutralité au début de la culture (7.22), et presque acide après la récolte de la culture (5.78). Cette variation du pH est due au phénomène de dilution. Pour la conductivité électrique, qui présente le degré de la salinité des sols, nous enregistrons des valeurs allant de 0.13 mS/cm au début de la saison, puis diminuent très significativement jusqu'à 0.06 mS/cm, ceci est due à la diminution de la concentration en électrolytes dans la solution du sol, en générale notre sol n'est pas salin. La teneur de la matière organique du sol connaît une variation saisonnière et annuelle importante. Des valeurs élevées sont observées dans un stade par rapport à l'autre à cause de la minéralisation. Le phosphore assimilable du sol montre qu'après l'épandage des différentes doses d'engrais phosphatés, la teneur du sol en phosphore assimilable dosée par la méthode Joret-Hebert varie très remarquablement avec les saisons, la teneur la plus élevée est enregistrée au début de l'installation de la culture durant l'année 2011-2012, où nous observons une concentration (10.12 mg/kg MS), tandis que la plus faible est enregistrée pendant le stade tallage (0.14 mg/kg MS); cette variation est due aux phénomènes d'adsorption et de précipitation avec les cations Fe, Al, Ca et argile qui sont très connues dans le dynamique du phosphore dans les sols. Au stade suivant, nous remarquons une augmentation de la teneur du sol en phosphore assimilable par apport au stade tallage, à cause des mêmes phénomènes.

La concentration adéquate du phosphore assimilable dans le sol influence beaucoup sur les caractéristiques biochimiques de la plante du *Triticum durum*, et sur la synthèse des métabolites aux deux stades (tallage et épiaison). Les doses 92 unités et 60 unités de phosphore donnent les rendements supérieurs par rapport aux autres doses appliquées.

À la lumière des résultats des campagnes 2009-2010, 2010-2011, 2011-2012 et 2012-2013, les résidus des molécules de pesticides trouvés sont les deux matières actives : Clodinofof-propagyl et Cloquintocet-mexyl ; le pesticide que contient le sol est le Topik,

Nous pouvons conseiller de ne pas utiliser le Topik, c'est un herbicide qui s'accumule dans les couches du sol et difficilement dégradable à cause de sa structure chimique complexe provoquant la toxicité en diminuant la fertilité des terres agricoles.

Pour mieux comprendre l'impact du phosphore sur la culture de *Triticum durum* et le dynamique des pesticides dans notre environnement, nous recommandons pour mieux définir le problème, de faire étudier toutes les formes de phosphore dans le sol, que ce soit, assimilable, adsorbé sur les particules du sol, précipité par les hydroxydes métalliques et par le calcium. Nous recommandons également:

- Faire une étude profonde sur la teneur du sol en Al, Fer et Ca responsable du phénomène de précipitation.
- Faire une étude sur l'immobilisation du phosphore et suivre le taux de minéralisation du phosphore organique.
- Utiliser des méthodes d'analyses plus profondes, comme la dilution isotopique du phosphore, et de membrane à résine synthétique qui donnent une idée claire sur le phosphore adsorbé et immobilisé.
- Mieux connaître l'influence de la matière organique sur la dynamique du phosphore dans le sol, en faisant une étude sur l'effet de l'amendement organique sur la biodisponibilité du phosphore dans le sol agricole.

Comme les pesticides sont des produits dangereux pour l'environnement et la santé public, nous recommandons de :

- Faire des études sur les résidus de pesticides et leur dégradation et biodégradation dans les espèces végétales cultivées, même dans les animaux et dans l'eau.
- Rechercher les meilleurs agents de dépollution à large spectre.

- Identifier et déterminer les métabolites secondaires issus de la biotransformation.



# *Annexes*

## 1. Annexe méthodes d'analyses physico-chimiques du sol

### 1.2. Acide phosphorique assimilable (Méthode Joret-Hebert)

#### *Principe*

L'acide phosphorique est extrait du sol par une solution d'oxalate d'ammonium. Il est ensuite dosé par colorimétrie en présence de molybdate et d'un réducteur.

#### *Protocole*

1- Extraction. Agiter 4 g de sol au contact de 100 ml d'oxalate d'ammonium 2 N, pendant 2 heures. Filtrer et doser  $P_2O_5$  sur le filtrat.

2- Dosage dans la solution d'extraction : Il s'agit de comparer l'intensité de la coloration bleue que donne l'acide phosphorique en présence de molybdate et d'un réducteur, avec celle fournie par des solutions étalons de  $P_2O_5$ .

3- Préparation des réactifs utilisés :

- Sulfomolybdate d'ammonium

a) Molybdate d'ammonium cristallisé 18.75 g

Eau bouillante 50 ml

b) Eau distillée 100 ml

$H_2SO_4$  (36 N) 150 ml

Après refroidissement verser a) dans b), en agitant. Compléter à 500 ml.

- Solution d'acide ascorbique (réducteur) à 1 g par litre.

- Solution étalon de  $P_2O_5$  à 10  $\mu\text{g/ml}$

#### *Dosage*

- Dans un tube à essai jaugé à 10 ml, placer

- 1.5 ml prise d'essai du filtrat
- 2 ml sulfomolybdate d'ammonium
- 5 ml acide ascorbique
- Compléter à 10 ml avec  $H_2O$

Porter les tubes 10 minutes au bain marie bouillant pour obtenir la coloration bleue. Refroidir les tubes. Mesurer par photo colorimétrie.

### ***Courbe d'étalonnage***

- Dans 5 tubes à essai jaugés à 10 ml. Placer 0, 1, 2, 3, 4, 5 ml de solution étalon  $P_2O_5$  soit 0, 1, 2, 3, 4, 5  $\mu g$  de  $P_2O_5$

Et compléter chaque tube à 10 ml avec

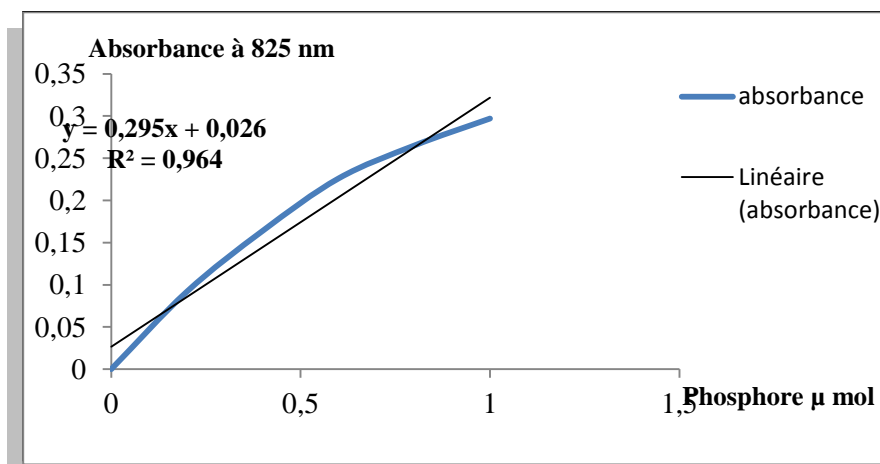
- 2 ml sulfomolybdate d'ammonium
  - 5 ml acide ascorbique
  - Eau distillée
- Le tube n° 1 ne contenant pas de  $P_2O_5$  constituera le tube témoin.
- Mesure à l'aide d'un spectrophotomètre le maximum d'absorption du composé bleu formé se situe vers 825  $\mu$ .

En déduire l'acide phosphorique en g/1000 de la courbe  $Y = 0.295 X + 0.026$

Y = absorbance

X = phosphore assimilable en g/kg de sol

### **Réalisation de la courbe d'étalonnage**



**Figure.1.** Courbe d'étalonnage du phosphore assimilable

## **2. Méthode de dosage des résidus des pesticides**

### **- Chromatographie Liquide Haute Performance (HPLC)**

Elle permet le dosage des composés thermolabiles et ioniques. La colonne la plus utilisée est celle qui contient une phase stationnaire greffée en C18. Le détecteur UV est très sollicité dans les dosages de routine, cependant le détecteur à barrette diode (DAD) offre de grandes possibilités d'identification des composés grâce à sa banque de spectres de référence.

La Chromatographie Liquide Haute Performance permet de séparer et de doser différents composés d'une solution qui absorbe dans l'UV. Pour des conditions opératoires précises, chaque composé présente un pic avec un temps de rétention bien défini. La hauteur des pics ou l'intégration de la surface de ces pics permet d'obtenir la concentration des produits.

### **- Protocole expérimental**

*Extraction des échantillons* : La méthode mise en œuvre l'extraction à reflux (Soxhlet). Un volume de 200 ml de Toluène est mélangé avec 10 g de sol, l'appareil en verre permet de faire bouillir le solvant organique et de le condenser pour qu'il traverse l'échantillon sol. Ensuite le solvant qui contient les molécules de pesticides est mis en traitement par la technique d'HPLC de partage.

## 1. Caractéristiques du sol avant installation de la culture

Tableau 1. Avant installation de la culture

Ech	pH <sub>eau</sub>	pH <sub>KCl</sub>	CE mS/cm	Cal total %	Cal actif ‰	Poro %	Phos ass mg/g	MO %	C %	HG %
1	6,96	5,4	0,46	24,82	3,75	40,3	1,320	6,39	3,72	10,5
2	6,28	5,1	0,17	24,80	5	40	2,233	5,65	3,29	9,75
3	6,95	5,8	0,26	24,82	2,5	51	2,114	6,39	3,72	7,75
4	7,02	6	0,22	24,75	3,75	35,8	1,294	5,59	3,25	8
5	7,09	6,4	0,27	24,80	3,78	42,9	2,253	5,81	3,38	8
6	7,1	6,8	0,23	24,70	5	42,03	1,218	4,48	2,61	8,1

## 2. Campagne 2009-2010

1-2-3 (bloc témoin), 4-5-6 (bloc1), 7-8-9 (bloc2) ,10-11-12 (bloc3) ,13-14-15 (bloc4) ,16-17-18 (bloc5),  
19-20-21 (bloc6)

Tableau 2. Stade tallage (Février 2010)

Ech	pH <sub>eau</sub>	pH <sub>KCl</sub>	CE mS/cm	Granulométrie			Cal total %	Cal actif ‰	Poro %	Phos Assim mg/l	MO %	C %	HG %
				S%	L%	A%							
1	6.72	6.66	0.20	55	8.8	36.2	24.64	3.2	63	1.267	2.27	1.32	7.12
2	6.2	5.45	0.28	34.9	11.1	54	24.67	4.7	66	2.213	1.89	1.1	7.11
3	6.32	6.21	0.17	53	4.32	42.68	24.77	2.1	68	1.289	2.42	1.41	7.15
4	7.1	7.00	0.15	34.69	7.31	58	24.79	3.62	40	1.296	1.94	1.13	3.24
5	6.95	6.89	0.11	40.1	7.6	52.3	24.62	3.67	71	2.217	1.53	0.89	7.11
6	6.91	6.78	0.21	38.8	6.2	55	24.8	4.82	60	1.116	4.90	2.85	8
7	7.02	7.00	0.24	44.53	4	51.47	23.8	5	67	1.108	3.16	1.84	8.3
8	7.00	6.96	0.14	37.18	5.82	57	24.1	3.6	70	2.212	1.59	0.93	8
9	7.02	7.01	0.16	33.85	6.15	60	23.3	3.65	40	1.298	1.92	1.12	4
10	6.4	6.1	0.27	33.2	8.7	58.1	24.51	4.82	65	2.215	2.04	1.19	7
11	6.9	6.8	0.22	37.7	6.5	55.8	24.23	4.85	60	1.115	4.98	2.9	8.3
12	7.00	6.89	0.25	43.97	5.03	51	24.19	4.98	70	1.114	3.37	1.96	8.39
13	6.74	6.69	0.22	51.1	10.5	38.4	23.3	3.21	63	1.212	2.32	1.35	7.1
14	6.77	6.71	0.15	46.09	9	44.91	23.51	2.3	68	1.281	2.49	1.45	7.2
15	6.78	6.65	0.22	43.21	4.7	52.09	24.70	5	71	1.210	3.09	1.8	8.4
16	7.03	7.00	0.22	39.98	5.82	54.2	24.9	4.9	60	1.112	4.95	2.88	8.56
17	6.8	6.4	0.14	40	7	53	23.83	3.7	72	2.218	1.72	1	7.45
18	6.98	6.78	0.20	34.13	6.88	58.99	23.12	3.59	41	1.291	2.02	1.18	7.05
19	6.75	6.71	0.18	52.5	4.5	43	24.52	2.35	68	1.290	2.39	1.39	7.9
20	6.45	6.4	0.19	56	8	36	24.49	3.3	62	1.232	2.28	1.33	3.85
21	6.69	6.5	0.30	32.58	10.72	56.7	24.31	4.85	66	2.210	1.94	1.13	7.27

**Tableau 3. Stade épiaison (Avril 2010)**

Ech	pH <sub>eau</sub>	pH <sub>KCl</sub>	CE mS/cm	Granulométrie			Cal total %	Cal actif ‰	Poro %	Phos Assim mg/l	MO %	C %	HG %
				S%	L%	A%							
1	6.66	6.1	0.19	55	8.8	36.2	23.02	2.6	64	1.02	1.8	1.04	6.4
2	5.8	5.5	0.23	34.9	11.1	54	21.17	2.4	66	2.01	2.1	1.22	7.5
3	5.9	5.7	0.18	53	4.32	42.68	21.12	3.5	54	2.3	1.5	0.87	7.6
4	6.7	6.4	0.18	34.69	7.31	58	23.6	3.4	40	1.1	2.6	1.15	6.9
5	6.5	6.4	0.15	40.1	7.6	52.3	24.5	2.1	51.5	1	0.9	0.52	6.7
6	6.4	6.3	0.20	38.8	6.2	55	24.1	3.1	56.2	2	3	1.74	6.2
7	6.8	5.9	0.26	44.53	4	51.47	19.3	3.5	61.4	0.9	2	1.16	7.8
8	6.9	6.6	0.14	37.18	5.82	57	23.6	2.1	52.6	0.8	1.1	0.63	6.6
9	6.3	6.01	0.15	33.85	6.15	60	24.5	5.1	41.6	0.9	1.2	0.69	7
10	6.00	5.8	0.22	33.2	8.7	58.1	22.5	3.3	64.3	1.1	2	1.16	7.6
11	6.5	6.3	0.24	37.7	6.5	55.8	24.2	2.1	55.7	1	3.1	1.80	6.2
12	6.4	6.1	0.23	43.97	5.03	51	19.6	3.2	62.1	1.2	1.9	1.10	6.9
13	6.5	6.2	0.18	51.1	10.5	38.4	22.2	2.5	64.2	2	2.3	1.33	6.2
14	6.8	6.5	0.17	46.09	9	44.91	22.9	2.3	41.3	2.01	2	1.16	6
15	6.6	6.4	0.25	43.21	4.7	52.09	20.4	4.4	60	1.03	2.2	1.27	7.5
16	6.00	5.4	0.19	39.98	5.82	54.2	23.9	3.1	55.1	2	3	1.74	6.1
17	6.5	5.8	0.13	40	7	53	23.9	2.5	52.3	1.	1.4	0.81	6
18	5.9	5.8	0.21	34.13	6.88	58.99	24.4	2.2	54.3	0.8	2.3	1.33	7.4
19	6.9	6.4	0.23	52.5	4.5	43	23.5	2	57	0.7	1.1	0.63	7.8
20	6.2	6.00	0.18	56	8	36	23.98	2	65.6	0.9	1	0.58	6.2
21	6.4	6.3	0.16	32.58	10.72	56.7	20.7	2.3	64.2	1	2.2	1.27	7.2

**Tableau 4. Stade après récolte (Juin 2010)**

Ech	pH <sub>eau</sub>	pH <sub>KCl</sub>	CE mS/cm	Granulométrie			Cal total %	Cal actif ‰	Poro %	Phos Assim mg/l	MO %	C %	HG %
				S%	L%	A%							
1	5,91	5,72	0,03	55	8.8	36.2	21,5	5,04	29	1,31	3,10	1,80	6,80
2	6,5	6,04	0,04	34,9	11,1	54	22,3	5,16	31	4,18	3,91	2,27	6,00
3	6,8	6,7	0,14	53	4,32	42,68	21,4	5,14	31	4,17	2,61	1,51	5,00
4	6,07	5,8	0,15	34,69	7,31	58	21,8	4,98	25	2,50	2,45	1,42	6,60
5	5,2	5,1	0,14	40,1	7,6	52,3	22,4	6,16	19	3,17	5,51	3,20	6,10
6	5,1	4,91	0,14	38,8	6,2	55	22,5	6,24	27	2,80	5,26	3,05	6,2
7	4,9	4,8	0,08	44,53	4	51,47	24,5	7,04	25	3,91	4,31	2,50	6,4
8	5,02	5,00	0,10	37,18	5,82	57	20,11	7,13	32	2,1	4,30	2,50	5,3
9	6,1	5,89	0,02	33,85	6,15	60	19,23	6,48	34	1,35	4,00	2,32	5,7
10	6,00	5,73	0,04	33,2	8,7	58,1	18,15	6,87	30	1,51	4,13	2,40	7
11	5,72	5,52	0,05	37,7	6,5	55,8	19,24	7,13	41	1,93	3,81	2,21	6
12	4,92	4,77	0,03	43,97	5,03	51	19,04	7,32	11	2,43	3,75	2,18	6,2
13	5,73	5,4	0,05	51,1	10,5	38,4	18,15	7,84	18	5,1	3,91	2,27	6,5
14	5,2	5,13	0,06	46,09	9	44,91	21,14	7,14	21	2,10	4,2	2,44	8
15	6,2	6,09	0,02	43,21	4,7	52,09	20,33	6,45	32	3,7	5,7	3,31	7,2
16	6,10	6,07	0,11	39,98	5,82	54,2	20,16	6,48	34	3,5	7,1	4,12	6,1
17	6,12	5,93	0,12	40	7	53	18,6	6,91	15	2,4	3,81	2,21	6,3
18	5,91	5,88	0,10	34,13	6,88	58,99	19,25	5,58	17	1,2	4,2	2,44	6,9
19	6,00	5,73	0,07	52,5	4,5	43	19,24	5,41	11	2,55	5,1	2,96	5,9
20	5,81	5,52	0,05	56	8	36	18,50	5,81	12	1,7	5,2	3,05	6
21	5,80	5,78	0,09	32,58	10,72	56,7	18,05	6,78	20	1,42	4,2	2,44	6,2

### 3. Campagne 2010-2011

**Tableau 5.** Stade avant semis (Septembre 2010)

Ech	pH <sub>eau</sub>	pH <sub>KCl</sub>	CE mS/cm	Granulométrie			Cal total %	Cal actif %	Poro %	Phos Assim mg/l	MO %	C %	HG %
				S%	L%	A%							
1	7.48	5.97	0.15	55	8.8	36.2	24.3	2.1	41	2,14	5,34	3,10	4,2
2	7.10	5.72	0.11	34.9	11.1	54	25.1	0.9	60	85,45	5,50	3,19	4
3	7.14	5.10	0.09	53	4.32	42.68	19.4	0.89	42	8,38	2,27	1,32	4
4	6.94	5.53	0.13	34.69	7.31	58	18.8	2.1	52	15,67	6,18	3,59	4,2
5	7.40	5.82	0.17	40.1	7.6	52.3	23.6	3.4	30	39,22	6,34	3,69	4
6	6.92	6.01	0.10	38.8	6.2	55	23.4	2.5	31	6,51	3,49	2,02	4,4
7	7.74	6.13	0.15	44.53	4	51.47	22.9	3	38	5,12	3,27	1,90	4,4
8	7.72	5.71	0.14	37.18	5.82	57	25.2	0.81	41	45,61	4,65	2,70	7,2
9	7.50	5.86	0.12	33.85	6.15	60	17.8	1.15	45	17,32	5,23	3,04	7
10	7.29	5.47	0.13	33.2	8.7	58.1	19.6	1.16	26	95,72	4,65	2,70	7
11	6.98	5.47	0.08	37.7	6.5	55.8	20.1	2.01	35	6,75	3,64	2,12	7,6
12	7	5.50	0.10	43.97	5.03	51	21.3	3.01	30	5,33	5,81	3,38	7,2
13	7.02	5.48	0.10	51.1	10.5	38.4	13.6	2	20	2,22	5,39	3,13	7,2
14	6.89	5.40	0.17	46.09	9	44.91	15.7	2.4	41	7,98	5,76	3,35	7,2
15	6.93	5.43	0.10	43.21	4.7	52.09	18.6	3	36	4,97	4,86	2,82	7,6
16	6.99	5.33	0.13	39.98	5.82	54.2	15.9	3.5	40	5,96	3,70	2,15	7
17	6.56	5.19	0.15	40	7	53	22.01	2.7	36	43,21	4,76	2,76	7,4
18	7.41	5.82	0.16	34.13	6.88	58.99	20.4	1.8	32	19,51	3,06	1,78	7
19	7.61	6.09	0.14	52.5	4.5	43	19.2	1.9	41	8,21	5,92	3,44	6,8
20	7.45	6.12	0.12	56	8	36	23.1	0.8	45	2,31	2,48	1,44	7
21	7.61	5.71	0.19	32.58	10.72	56.7	24	0.77	52	77,32	2,16	1,26	6,8

**Tableau 6.** Stade tallage (Février 2011)

Ech	pH <sub>eau</sub>	pH <sub>KCl</sub>	CE mS/cm	Granulométrie			Cal total %	Cal actif %	Poro %	Phos Assim mg/l	MO %	C %	HG %
				S%	L%	A%							
1	7,91	7,59	0,11	55	8.8	36.2	19.2	0.7	50	0,67	8,77	5.0	6.8
2	7,93	7,56	0,08	34.9	11.1	54	18.4	0.6	52	1,69	6,17	3.5	6.8
3	7,98	7,64	0,08	53	4.32	42.68	17.2	1.2	48	1,47	5,18	3.0	4.5
4	8,07	7,53	0,09	34.69	7.31	58	18.3	1.9	40	1,5	5,86	3.4	8.6
5	8,08	7,55	0,05	40.1	7.6	52.3	20.2	2.4	68,5	1,75	6,81	3.9	7.9
6	8,15	7,58	0,06	38.8	6.2	55	23	2	60	1,46	7,34	4.2	9.9
7	7,94	7,49	0,05	44.53	4	51.47	21.2	2.1	53,5	1,17	6,91	4.0	8.2
8	7,90	7,43	0,09	37.18	5.82	57	24.03	2.01	70	1,77	6,65	3.8	4.5
9	7,71	7,22	0,05	33.85	6.15	60	20.2	0.9	39	1,53	7,49	4.3	6.5
10	7,79	7,34	0,08	33.2	8.7	58.1	17.2	2.3	50	1,64	6,86	3.9	5.2
11	7,91	7,50	0,08	37.7	6.5	55.8	19	3.1	63	1,4	6,60	3.8	5.5
12	7,72	7,29	0,06	43.97	5.03	51	3	2.6	53	1,13	5,48	3.1	4.8
13	7,81	7,39	0,08	51.1	10.5	38.4	18.5	4.1	51	0,93	7,49	4.3	7.2
14	7,91	7,54	0,12	46.09	9	44.91	17.4	2.2	49	1,58	7,92	4.5	6.9
15	7,93	7,53	0,10	43.21	4.7	52.09	14.6	1	56	1,15	6,12	3.5	6.8
16	7,80	7,38	0,07	39.98	5.82	54.2	16.5	3.4	58,5	1,39	7,24	4.2	5.5
17	7,71	7,36	0,06	40	7	53	21.5	3.3	66	1,79	7,01	4.0	4.8
18	7,85	7,46	0,09	34.13	6.88	58.99	22.6	1.6	42	1,56	5,48	3.1	4.7
19	7,92	7,48	0,07	52.5	4.5	43	20.2	1.5	42	1,57	6,39	3.7	9.2
20	7,82	7,44	0,06	56	8	36	23.3	0.9	49	0,82	8,29	4.8	5.2
21	7,75	7,39	0,05	32.58	10.72	56.7	24.1	0.8	47	1,68	6,91	4.0	6

**Tableau 7. Stade épiaison (Avril 2011)**

Ech	pH <sub>eau</sub>	pH <sub>KCl</sub>	CE mS/cm	Granulométrie			Cal total %	Cal actif %	Poro %	Phos Assim mg/l	MO %	C %	HG %
				S%	L%	A%							
1	6,2	6	0,16	55	8.8	36.2	22.2	4.2	30	2,68	1,25	0,72	8.78
2	6,3	6,1	0,1	34.9	11.1	54	23.5	5.3	29	9,11	0,63	0,36	7.9
3	6,1	5,8	0,09	53	4.32	42.68	20.1	6	10	3,44	1,38	0,80	8.9
4	6,7	6,1	0,07	34.69	7.31	58	19.9	2.9	19	3,87	3,59	2,08	9.6
5	7,02	6,3	0,13	40.1	7.6	52.3	18.5	7.1	18	6,21	1,34	0,77	5.5
6	5,9	5,5	0,07	38.8	6.2	55	17.9	5.2	27	2,91	0,86	0,5	5.6
7	6,3	6,1	0,06	44.53	4	51.47	26.4	3.5	10	1,76	1,5	0,87	8.4
8	5,9	5,3	0,05	37.18	5.82	57	12.7	4.1	13	6,71	1,56	0,90	7
9	6,4	5,8	0,06	33.85	6.15	60	14.6	4	43	3,41	0,94	0,54	5.5
10	6,4	5,7	0,06	33.2	8.7	58.1	18.9	1.3	22	10,11	1,16	0,67	8.2
11	5,8	5,6	0,06	37.7	6.5	55.8	17.5	2.6	13	2,92	1,68	0,97	8
12	6,2	6	0,06	43.97	5.03	51	22.4	5.2	25	1,91	1,04	0,60	7.4
13	6,8	6,3	0,05	51.1	10.5	38.4	21.4	6.2	19	2,75	1,53	0,88	7.6
14	6,5	6,3	0,06	46.09	9	44.91	23.6	3.4	11	3,45	1,27	0,73	9.10
15	6,5	6,4	0,1	43.21	4.7	52.09	25.3	5.2	13	2,10	0,43	0,25	5.45
16	6,7	6,1	0,06	39.98	5.82	54.2	24.1	3.2	14	2,94	1,27	0,73	8.65
17	7	6,2	0,06	40	7	53	19.3	2	24	7,10	0,91	0,52	9.2
18	6,8	5,9	0,06	34.13	6.88	58.99	18.4	4.6	41	3,61	0,97	0,56	4.9
19	6,9	6,8	0,16	52.5	4.5	43	17.3	4	59	3,51	0,99	0,57	7.6
20	6,7	6,4	0,09	56	8	36	13.2	7.1	12	2,62	0,91	0,52	7.8
21	6,5	6,1	0,07	32.58	10.72	56.7	20.8	5	19	9	0,94	0,54	6.9

**Tableau 8. Stade après récolte (Juin 2011)**

Ech	pH <sub>eau</sub>	pH <sub>KCl</sub>	CE mS/cm	Granulométrie			Cal total %	Cal actif %	Poro %	Phos Assim mg/l	MO %	C %	HG %
				S%	L%	A%							
1	5.52	5.96	5.52	5.96	8.8	36.2	17.2	1.2	20	1,29	3,38	1,96	7,6
2	5.53	6.03	5.53	6.03	11.1	54	14.3	2.4	19	4,48	4,01	2,33	7
3	5.47	6.05	5.47	6.05	4.32	42.68	12.9	1	14	2,6	2,75	1,59	7
4	5.53	6.04	5.53	6.04	7.31	58	18.9	2.3	17	2,9	2,43	1,41	6,6
5	5.53	6.05	5.53	6.05	7.6	52.3	14.1	4.2	12	3,72	5,65	3,29	6,2
6	5.50	6.06	5.50	6.06	6.2	55	20.3	3.1	26	2,1	5,23	3,04	6
7	5.56	5.80	5.56	5.80	4	51.47	11.3	3.3	28	1,92	4,33	2,52	6,6
8	5.23	5.73	5.23	5.73	5.82	57	21.1	1.6	25	3,85	4,28	2,49	5,4
9	5.21	5.54	5.21	5.54	6.15	60	24.3	1.9	23	2,85	4,01	2,33	4,4
10	5.11	5.73	5.11	5.73	8.7	58.1	15.6	2.4	25	5,61	4,12	2,39	6,8
11	5.40	6.00	5.40	6.00	6.5	55.8	14.5	2.5	19	2,17	5,23	3,04	6,6
12	5.20	5.58	5.20	5.58	5.03	51	17	4	16	1,85	4,81	2,79	6,4
13	5.23	5.28	5.23	5.28	10.5	38.4	18.2	3.1	24	1,47	5,18	3,01	7
14	5.10	5.47	5.10	5.47	9	44.91	19.1	2.6	30	2,4	5,76	3,35	6,2
15	5.18	5.60	5.18	5.60	4.7	52.09	16.3	2.8	25	1,88	7,56	4,39	6,8
16	5.32	5.82	5.32	5.82	5.82	54.2	12.03	3.1	27	2,25	4,07	2,36	6,6
17	5.35	5.73	5.35	5.73	7	53	12	4	26	3,9	5,55	3,22	6,4
18	5.16	5.77	5.16	5.77	6.88	58.99	15.1	1.3	22	2,79	5,60	3,25	6,8
19	5.13	5.68	5.13	5.68	4.5	43	14.7	1	20	2,55	6,39	3,72	6
20	5.35	5.73	5.35	5.73	8	36	16.4	1.2	21	1,44	6,92	4,02	6,2
21	5.39	5.89	5.39	5.89	10.72	56.7	15	2.5	18	5,1	6,13	3,56	7



#### 4. Campagne 2011-2012

Tableau 9. Stade avant semis (Septembre 2011)

Ech	pH <sub>eau</sub>	pH <sub>KCl</sub>	CE mS/cm	Granulométrie			Cal total %	Cal actif %	Poro %	Phos Assim mg/l	MO %	C %	HG %
				S%	L%	A%							
1	6,15	6,01	0,18	5,96	8,8	36,2	19,5	5,93	30	3,16	3,64	2,12	5,1
2	7,3	7,03	0,10	6,03	11,1	54	18,1	5,98	18	13,14	3,73	2,17	5,00
3	7,2	6,94	0,11	6,05	4,32	42,68	19,23	5,14	15	11,21	5,22	3,04	5,3
4	7,11	6,99	0,13	6,04	7,31	58	18,15	6,11	14	5,12	5,41	3,15	4,8
5	6,93	6,42	0,16	6,05	7,6	52,3	21,04	6,24	25	7,34	3,83	2,23	4,1
6	6,81	5,93	0,15	6,06	6,2	55	20,31	6,11	33	6,23	4,23	2,46	4,4
7	6,45	5,81	0,09	5,80	4	51,47	15,21	6,44	18,5	7,06	4,86	2,83	6,3
8	6,98	6,52	0,08	5,73	5,82	57	23,04	6,18	29,1	2,24	5,41	3,15	6,1
9	6,97	6,04	0,11	5,54	6,15	60	22,15	7,13	33	2,73	5,34	3,11	7,3
10	6,81	5,19	0,15	5,73	8,7	58,1	23,24	7,11	18	4,38	1,94	1,13	7,8
11	7,41	6,13	0,18	6,00	6,5	55,8	24,08	6,98	28	4,35	2,13	1,24	6,3
12	7,40	6,43	0,23	5,58	5,03	51	24,15	6,15	35	3,04	3,68	2,14	6,8
13	7,53	7,11	0,12	5,28	10,5	38,4	21,53	6,21	31	9,15	3,49	2,03	7
14	7,15	7,02	0,14	5,47	9	44,91	20,93	5,73	21	2,21	5,45	3,17	7,1
15	7,42	6,82	0,09	5,60	4,7	52,09	20,85	5,16	19,5	7,24	5,93	3,45	6,9
16	6,81	6,14	0,10	5,82	5,82	54,2	19,45	5,14	24	3,20	2,88	1,68	8,4
17	6,6	5,13	0,16	5,73	7	53	24,04	6,19	30,5	6,24	2,52	1,47	6,4
18	7,63	5,98	0,17	5,77	6,88	58,99	19,82	6,25	20,6	9,23	2,28	1,33	7,5
19	7,45	7,04	0,16	5,68	4,5	43	19,35	6,28	28	1,50	3,14	1,83	6,9
20	7,07	6,93	0,11	5,73	8	36	18,11	7,15	31,5	9,14	3,81	2,22	4
21	6,92	5,81	0,10	5,89	10,72	56,7	18,24	7,24	32	10,11	4,02	2,34	4,9

Tableau 10. Stade tallage (Février 2012)

Ech	pH <sub>eau</sub>	pH <sub>KCl</sub>	CE mS/cm	Granulométrie			Cal total %	Cal actif %	Poro %	Phos Assim mg/l	MO %	C %	HG %
				S%	L%	A%							
1	8,39	8,12	0,11	5,96	8,8	36,2	21,57	3,75	16	0,117	0,79	0,46	4,99
2	8,37	8,34	0,33	6,03	11,1	54	22,18	5	51	0,162	2,06	1,20	4,74
3	8,26	8,16	0,40	6,05	4,32	42,68	22,2	5	2	0,139	0,74	0,43	4,66
4	8,31	8,26	0,23	6,04	7,31	58	20,97	3,75	9	0,147	1,27	0,73	3,94
5	8,56	8,45	0,25	6,05	7,6	52,3	22,5	5	34	0,152	1,32	0,76	9,22
6	8,5	8,45	0,24	6,06	6,2	55	21,8	2,5	15	0,132	1,85	0,73	4,84
7	8,49	8,46	0,31	5,80	4	51,47	21,5	5	43	0,153	1,26	1,04	5,65
8	8,44	8,3	0,31	5,73	5,82	57	20,80	3,75	6	0,148	1,80	0,73	5,65
9	8,28	8,22	0,30	5,54	6,15	60	21,82	5	5	0,142	2,01	1,16	6,33
10	8,43	8,27	0,40	5,73	8,7	58,1	20,12	3,75	10	0,170	2,27	1,32	4,94
11	8,31	8,00	0,30	6,00	6,5	55,8	20,7	3,75	15	0,132	2,00	1,16	5,27
12	8,31	8,05	0,24	5,58	5,03	51	21,97	3,75	46	0,157	1,74	1,01	5,42
13	8,43	8,06	0,23	5,28	10,5	38,4	21,12	5	22	0,152	2,06	1,20	5,89
14	8,54	8,11	0,21	5,47	9	44,91	12,12	5	46	0,138	1,80	1,04	5,17
15	9,09	9,00	0,13	5,60	4,7	52,09	21,85	6,25	29	1,00	1,84	0,64	6,85
16	9,10	8,94	0,19	5,82	5,82	54,2	24,40	1,00	35	1,29	1,89	1,10	7,52
17	9,06	8,98	0,8	5,73	7	53	21,42	2,50	31	1,10	1,53	0,89	6,86
18	8,74	8,64	0,20	5,77	6,88	58,99	22,25	7,50	34	1,36	1,58	0,92	7,29
19	8,82	8,66	0,21	5,68	4,5	43	20,25	5,00	29	1,54	1,99	1,16	8,00
20	8,76	8,65	0,14	5,73	8	36	20,60	3,75	28	1,41	1,10	1,07	6,83
21	8,93	9,18	0,17	5,89	10,72	56,7	20,62	6,75	37	0,87	2,37	1,38	7,29

**Tableau 11. Stade épiaison (Avril 2012)**

Ech	pH <sub>eau</sub>	pH <sub>KCl</sub>	CE mS/cm	Granulométrie			Cal total %	Cal actif ‰	Poro %	Phos Assim mg/l	MO %	C %	HG %
				S%	L%	A%							
1	4,51	4,21	0,4	5,96	8,8	36,2	21,65	2,5	14	0,60	0,60	0,35	9
2	4,5	3,9	0,3	6,03	11,1	54	22,83	3,87	22	0,61	0,61	0,36	8,43
3	4,88	4,26	0,4	6,05	4,32	42,68	22,1	2,25	3	0,63	0,63	0,37	8,15
4	5,02	4,3	0,2	6,04	7,31	58	22,23	3,25	8	0,61	0,61	0,36	8,54
5	5	4,36	0,3	6,05	7,6	52,3	23,1	3	29	0,56	0,56	0,33	7,58
6	5,03	4,46	0,1	6,06	6,2	55	23,05	2,75	10	0,58	0,58	0,34	8,01
7	5,11	4,51	0,3	5,80	4	51,47	22,88	2,25	40	0,61	0,61	0,36	10,2
8	5,06	4,41	0,3	5,73	5,82	57	22,65	3	5	0,91	0,91	0,53	8,15
9	5,09	4,29	0,4	5,54	6,15	60	22,75	3,75	4	0,55	0,55	0,32	7,94
10	4,69	4,14	0,3	5,73	8,7	58,1	22,78	3,62	10	0,67	0,67	0,39	8,58
11	4,44	4,11	0,2	6,00	6,5	55,8	22,63	2	10	0,75	0,75	0,44	8,36
12	4,65	3,84	0,1	5,58	5,03	51	21,75	3,12	10	0,84	0,84	0,49	8,18
13	4,63	3,86	0,2	5,28	10,5	38,4	21,93	2,5	4	0,60	0,60	0,35	9,01
14	4,61	3,9	0,3	5,47	9	44,91	22,3	3	20	0,61	0,61	0,36	7,76
15	4,23	4,13	0,24	5,60	4,7	52,09	22,25	21,25	26	0,54	0,25	0,15	5,45
16	4,46	4,05	0,23	5,82	5,82	54,2	21,90	18,75	19	0,34	0,79	0,64	6,98
17	4,50	4,09	0,12	5,73	7	53	21,62	16,25	21	0,23	0,51	0,30	6,29
18	4,67	4,22	0,23	5,77	6,88	58,99	21,17	15,00	10	0,27	0,94	0,55	4,57
19	4,44	4,15	0,24	5,68	4,5	43	21,20	13,75	27	0,34	1,30	0,76	4,58
20	4,72	4,33	0,21	5,73	8	36	21,90	20,00	23	0,33	0,25	0,15	4,40
21	4,45	4,26	0,19	5,89	10,72	56,7	21,40	17,50	20	0,32	1,42	0,83	4,11

**Tableau 12. Stade après récolte (Juin 2012)**

Ech	pH <sub>ca</sub> u	pH <sub>KCl</sub>	CE mS/cm	Granulométrie			Cal total %	Cal actif ‰	Poro %	Phos Assim mg/l	MO %	C %	HG %
				S%	L%	A%							
1	7,2	7,00	0,14	5,96	8,8	36,2	20,1	4,30	11,26	1,71	0,87	0,51	7,20
2	7,4	7,11	0,12	6,03	11,1	54	19,2	4,14	14,11	1,32	0,60	0,35	8,15
3	7,1	7,01	0,23	6,05	4,32	42,68	19,50	5,13	19,72	2,41	1,78	1,04	8,24
4	6,8	6,51	0,11	6,04	7,31	58	18,04	5,11	20,25	0,94	1,78	1,04	8,43
5	6,9	6,43	0,19	6,05	7,6	52,3	21,04	6,24	19,31	0,98	1,96	1,14	8,51
6	6,5	6,15	0,17	6,06	6,2	55	21,11	6,26	11,19	2,13	1,59	0,93	9,11
7	7,3	7,10	0,10	5,80	4	51,47	20,13	5,93	14,13	2,15	1,68	0,98	7,24
8	6,1	7,01	0,15	5,73	5,82	57	19,35	5,84	20,14	1,73	2,32	1,35	7,33
9	7	6,9	0,12	5,54	6,15	60	18,04	6,11	20,17	1,04	2,09	1,22	8,24
10	6,8	6,8	0,33	5,73	8,7	58,1	20,3	5,41	12,15	1,09	2,20	1,28	9,15
11	6,3	6,5	0,22	6,00	6,5	55,8	21,3	6,18	16,34	2,13	3,16	1,84	9,24
12	6,9	6,1	0,31	5,58	5,03	51	20,42	6,24	17,08	1,42	3,31	1,93	8,33
13	7,51	6,4	0,14	5,28	10,5	38,4	18,15	6,14	23,4	1,45	1,04	0,61	8,17
14	7,34	7,11	0,19	5,47	9	44,91	19,21	5,41	24,5	2,53	1,23	0,72	8,24
15	7,32	7,05	0,29	5,60	4,7	52,09	19,05	6,19	11,93	0,98	1,25	0,73	7,53
16	7,51	7,01	0,27	5,82	5,82	54,2	20,14	6,21	12,14	2,14	1,35	0,79	5,16
17	6,9	6,10	0,11	5,73	7	53	17,51	6,00	26,2	1,24	1,63	0,95	8,14
18	6,4	6,14	0,31	5,77	6,88	58,99	18,33	5,72	24,9	1,35	0,24	0,14	8,24
19	7,1	6,23	0,14	5,68	4,5	43	19,14	4,14	25,7	1,43	0,58	0,34	9,24
20	6,7	7,05	0,24	5,73	8	36	20,16	4,82	30,17	1,28	1,16	0,68	9,11
21	7,4	7,12	0,23	5,89	10,72	56,7	24,01	4,93	28,19	2,24	0,92	0,54	8,03

## Campagne 2012-2013

Tableau 13. Stade avant semis (Septembre 2012)

Ech	pH <sub>eau</sub>	pH <sub>KCl</sub>	CE mS/cm	Granulométrie			Cal total %	Cal actif ‰	Poro %	Phos Assi mg/l	MO %	C %	HG %
				S%	L%	A%							
1	7,12	7,05	0,27	5,96	8,8	36,2	19,5	7,1	24,04	1,6	2,13	1,24	8,22
2	7,14	6,91	0,19	6,03	11,1	54	18,1	7,3	24,00	1,7	4,35	2,53	9,45
3	7,25	7,11	0,22	6,05	4,32	42,68	20,3	4,8	10,55	2,2	3,71	2,16	9,34
4	6,98	6,48	0,23	6,04	7,31	58	17,3	5,6	11,91	2,4	3,40	1,98	8,04
5	6,73	6,14	0,18	6,05	7,6	52,3	11,5	5,4	25,07	1,8	3,68	2,14	8,15
6	7,11	6,81	0,21	6,06	6,2	55	12,4	6,14	25,14	1,6	2,32	1,35	8,93
7	7,04	7,00	0,24	5,80	4	51,47	15,8	6,18	24,03	2,3	1,96	1,14	9,11
8	7,17	7,15	0,25	5,73	5,82	57	14,3	7,3	23,15	3,1	3,97	2,31	10,51
9	8,03	7,14	0,31	5,54	6,15	60	22,50	5,7	24,00	0,9	5,22	3,04	7,24
10	8,12	7,24	0,33	5,73	8,7	58,1	24,3	5,3	26,04	0,8	5,88	3,42	7,33
11	8,14	8,04	0,28	6,00	6,5	55,8	25,5	6,4	11,24	1,3	1,87	1,09	10,54
12	8,23	8,09	0,14	5,58	5,03	51	26,1	6,3	11,15	1,7	2,25	1,31	8,94
13	7,18	7,05	0,15	5,28	10,5	38,4	30,2	6,01	16,73	9,15	4,14	2,41	9,19
14	7,23	7,11	0,11	5,47	9	44,91	13,1	7,3	19,53	2,5	4,33	2,52	9,41
15	6,71	6,41	0,19	5,60	4,7	52,09	18,6	5,3	18,14	2,7	4,17	2,43	8,14
16	6,53	6,23	0,20	5,82	5,82	54,2	18,7	5,7	13,10	1,7	3,31	1,93	8,33
17	7,24	7,11	0,24	5,73	7	53	20,55	6,1	14,28	1,8	3,16	1,84	9,14
18	6,84	6,19	0,23	5,77	6,88	58,99	21,16	6,2	19,34	2,00	3,11	1,81	10,11
19	6,15	6,04	0,24	5,68	4,5	43	20,14	6	17,12	1,8	1,68	0,98	9,42
20	6,01	5,93	0,19	5,73	8	36	23,4	6,9	12,53	1,7	3,56	2,04	8,45
21	7,20	5,81	0,25	5,89	10,72	56,7	21,5	5,7	15,89	1,11	2,42	1,34	9,78

Tableau 14. Stade tallage (Février 2013)

Ech	pH <sub>eau</sub>	pH <sub>KCl</sub>	CE mS/cm	Granulométrie			Cal total %	Cal actif ‰	Poro %	Phos Assi mg/l	MO %	C %	HG %
				S%	L%	A%							
1	7,87	6,39	1,7	5,96	8,8	36,2	20,25	7,5	21,56	3,17	2,74	1,59	3,75
2	7,98	6,49	0,9	6,03	11,1	54	19,55	6,87	39,52	2,95	3,70	2,15	7,78
3	7,93	6,23	0,4	6,05	4,32	42,68	20,75	7	29,61	2,61	4,33	2,52	8,96
4	7,78	6,18	0,8	6,04	7,31	58	20,37	6,13	37,44	2,76	4,47	2,02	8,86
5	7,82	6,25	0,9	6,05	7,6	52,3	20,25	6,62	18,88	2,34	3,80	2,21	8,05
6	7,84	6,23	1,4	6,06	6,2	55	20,05	7,25	31,4	3,23	3,90	2,27	10,37
7	7,75	6,12	1,3	5,80	4	51,47	21,86	7,62	37,92	1,9	4,33	2,52	7,95
8	7,45	5,72	0,7	5,73	5,82	57	20,40	7,35	15,79	2,54	4,02	2,34	8,00
9	7,54	5,73	1,2	5,54	6,15	60	20,36	6,16	21,74	1,9	3,18	1,85	7,2
10	7,53	5,76	1	5,73	8,7	58,1	22,00	7,24	31,33	1,62	3,59	2,09	4,61
11	7,67	5,87	1,3	6,00	6,5	55,8	20,63	7,13	31,67	2,24	2,11	1,23	6,85
12	7,59	5,86	0,5	5,58	5,03	51	20,65	6,2	36,84	1,75	4,90	2,58	7,11
13	7,51	5,79	0,8	5,28	10,5	38,4	20,7	6,79	32,04	2,46	4,23	2,46	7,00
14	7,55	5,72	0,6	5,47	9	44,91	20,2	5,21	39,84	1,96	4,97	2,89	6,4
15	7,75	6,61	0,7	5,60	4,7	52,09	20,5	5,8	38,66	1,63	2,00	1,16	7,45
16	7,66	6,55	0,6	5,82	5,82	54,2	19,82	5,77	38,95	1,57	2,96	1,72	11,35
17	7,61	6,44	0,1	5,73	7	53	20,35	6,14	21,09	1,70	2,53	1,47	8,52
18	7,74	6,6	0,6	5,77	6,88	58,99	19,35	6,71	52,23	1,97	1,69	0,98	9,31
19	7,76	6,65	1,2	5,68	4,5	43	20,2	6,3	35,09	1,84	2,43	1,41	11,06
20	7,77	6,59	1,4	5,73	8	36	20,47	6,49	20,30	1,89	1,37	0,79	11,87
21	7,7	6,5	0,7	5,89	10,7	56,7	20,17	7,21	34,33	1,87	2,11	1,23	9,53

**Tableau 15. Stade épiaison (Avril 2013)**

Ech	pH <sub>eau</sub>	pH <sub>KCl</sub>	CE mS/cm	Granulométrie			Cal total %	Cal actif ‰	Poro %	Phos Assi mg/l	MO %	C %	HG %
				S%	L%	A%							
1	6,28	5,58	0,8	5,96	8,8	36,2	21,13	6,5	19,26	2,29	1,32	0,77	2,9
2	6,25	5,59	0,9	6,03	11,1	54	21,05	6,87	21,73	2,70	0,74	0,43	7,54
3	6,51	5,60	1,0	6,05	4,32	42,68	20,50	6,25	23,31	1,87	2,37	1,38	8,12
4	6,48	5,59	0,8	6,04	7,31	58	21,2	6,12	26,34	1,65	1,99	1,16	7,37
5	6,51	5,49	0,8	6,05	7,6	52,3	20,57	6,00	15,18	1,46	1,05	0,61	6,05
6	6,33	5,50	1,4	6,06	6,2	55	21,35	6,75	27,31	1,19	1,96	1,14	7,98
7	6,41	5,39	0,1	5,80	4	51,47	21	6,62	16,82	1,39	2,11	1,23	7,13
8	6,15	5,13	0,1	5,73	5,82	57	21,35	6,89	18,61	1,65	1,58	0,92	6,98
9	6,28	5,15	0,5	5,54	6,15	60	21,12	7,1	20,42	1,38	0,73	0,43	3,75
10	6,25	5,14	0,8	5,73	8,7	58,1	21,87	6,62	30,26	1,89	2,09	1,22	5,95
11	6,40	5,34	1	6,00	6,5	55,8	21,63	5,12	26,34	1,37	1,22	0,71	6,36
12	6,14	5,34	0,8	5,58	5,03	51	20	6,9	32,18	1,72	2,95	1,72	6,61
13	6,42	5,24	0,6	5,28	10,5	38,4	20,62	6,54	26,08	1,42	1,8	1,05	5,12
14	6,37	5,23	0,9	5,47	9	44,91	20,75	6,69	32,33	1,65	3,06	1,78	5,35
15	6,33	5,3	0,5	5,60	4,7	52,09	20,3	6,72	23,64	1,61	1,69	0,98	8,20
16	6,11	5,1	0,5	5,82	5,82	54,2	20,52	7,21	11,67	0,95	2,38	1,83	8,57
17	6,18	5,16	0,6	5,73	7	53	20,57	6,12	19,37	1,10	1,79	1,04	8,43
18	6,08	5,08	0,3	5,77	6,88	58,99	20,37	3,15	20,72	1,20	0,63	0,36	9,07
19	6,2	5,23	1,4	5,68	4,5	43	21,6	5,41	11,47	1,60	2,11	1,23	8,04
20	6,24	5,2	1,2	5,73	8	36	21,15	7,32	19,21	1,21	0,31	0,18	8,51
21	6,18	5,06	1,2	5,89	10,7	56,7	20,55	6,14	13,10	1,20	1,37	0,79	8,98

**5. Paramètres végétaux (campagne 2009-2010)**

**Tableau 16. Stade tallage et épiaison**

Ec h	Chl a (mg/g MF)		Chl b (mg/g MF)		Chl (a+b) (mg/g MF)		Sucres solubles (µg/100g. MF)		Protéines totales (µg/100g. MF)		Proline (µg/100g. MF)	
	Tallag	Epiaiso	Tallage	Epiaiso	Tallag	Epiaiso	Tallage	Epiaiso	Tallag	Epiaiso	Tallage	Epiaiso
1	14.19	14.28	9.89	10.14	24.08	24.42	522.17	569.5	182.53	193.79	79.15	193.79
2	40.19	39.08	3198.1	28.92	78.33	68	1600.1	1788.5	416.17	587.98	1400.8	587.98
3	27.14	28.50	26.19	24.74	53.33	53.24	1642.1	1787.5	319.11	385.29	714.12	385.29
4	32.16	34.63	27.17	25.09	59.33	59.72	1542.1	1540.5	412.53	442.98	715.03	442.98
5	31.01	31.22	29.25	30.04	60.26	61.26	1044.2	1028.5	493.17	504.15	1108.7	504.15
6	23.17	25.90	21.81	22.82	44.98	48.72	730.14	711.5	217.00	233.57	622.17	233.57
7	25.23	25.81	20.13	22.74	45.36	48.55	665.73	692.5	219.14	235.83	201.53	235.83
8	27.15	31.19	26.17	31.10	53.32	62.29	1053.1	1030.94	495.9	502.20	1119.5	502.20
9	30.19	34.51	25.43	30.2	55.62	64.71	1431.0	1542.4	439.15	441.85	813.17	441.85
10	39.85	40.11	37.17	38.01	77.02	78.12	1718.9	1788.93	560.13	584.30	1378.1	584.30
11	25.19	25.82	20.15	24.10	45.34	49.92	702.12	713.4	219.53	233.72	619.83	233.72
12	24.78	25.93	21.23	22.63	46.01	48.55	615.19	694.82	223.8	237.20	200.13	237.20
13	13.73	14.19	12.12	9.99	25.85	24.18	501.01	570.14	173.11	187.50	73.42	187.50
14	26.53	28.15	26.10	24.27	52.63	52.42	1732.1	1782.41	402.25	384.91	719.11	384.91
15	25.03	25.73	23.73	21.98	48.76	47.71	514.15	691.94	228.09	237.14	200	237.14
16	24.01	25.52	21.00	24.17	45.01	49.69	710.18	711.9	227.5	232.82	642.1	232.82
17	29.07	31.33	25.13	30.16	54.20	61.49	1019.2	1024.81	495.19	501.59	1102.5	501.59
18	34.19	34.48	33.10	25.83	67.29	60.31	1509.3	1530.84	315.14	389.91	793.15	389.91
19	26.45	28.43	23.11	24.62	49.56	53.05	1780.9	1787.9	304.2	194.51	682.75	194.51
20	13.11	14.22	9.62	10.08	22.73	24.3	520.15	568.71	200.51	578.81	80.53	578.81
21	40.15	39.82	37.83	38.17	77.98	77.99	1719.8	1795.82	504.13	571.36	1343.1	571.36

## 6. Paramètres végétaux (campagne 2010- 2011)

**Tableau 17. Stade tallage et épiaison**

Ech	Chl a (mg/g MF)		Chl b (mg/g MF)		Chl (a+b) (mg/g MF)		Sucres solubles (µg/100g. MF)		Protéines totales (µg/100g. MF)		Proline (µg/100g. MF)	
	Tallage	Epiaison	Tallage	Epiaison	Tallage	Epiaison	Tallage	Epiaison	Tallage	Epiaison	Tallage	Epiaison
1	28.96	30.9	17.41	23.05	46.37	53.9	126.3	307.27	17.04	20.42	366	367.84
2	40.71	67.5	20.68	52.2	61.39	119.5	272.72	1856.45	34.32	60.18	697.78	865.13
3	18.17	32.63	14.42	28.4	32.59	60	154.09	997.27	24.70	39.7	442.42	587.7
4	22.95	40.2	20.35	37.2	43.30	77.3	166.36	681.81	29.21	43.2	504.9	643.2
5	25.80	48.5	16.41	40.1	42.22	88.6	233.18	1730.90	31.82	52.7	629.57	797.5
6	17.27	29.1	14.25	25.6	31.52	54.3	131.81	520.18	29.78	32.3	386.35	471.41
7	18.57	26.2	15.10	24.4	33.68	50.3	117.51	453.77	19.48	29.9	321.25	360.70
8	24.93	49	16.23	39.1	41.16	88.1	231.72	1734.2	31.73	50.1	625.28	797
9	21.91	40.5	19.92	35.5	41.83	76	160.12	685.2	29.30	42.1	502.91	640.5
10	39.25	69.2	20.44	55.4	59.69	124.6	269.53	1800.7	35.01	62.2	690.23	858
11	17.10	28.2	14.10	27.2	31.20	55.4	130.14	500.31	29.33	30.9	385.81	450
12	18.32	25.5	15.21	20.2	33.55	45.7	115.32	423.5	19.68	29.5	322.31	359
13	28.73	30.2	16.91	22.1	45.64	52.1	125.32	300	17.0	19.4	350	360.5
14	18.85	34.4	14.10	27.6	32.95	62	155.20	990.5	24.51	39	440.51	580.5
15	18.41	27.2	14.83	22.9	33.25	50.1	118.28	400	20.01	30	321.01	361.7
16	16.99	27.1	13.98	24.1	30.98	51.2	132.45	505.9	28.94	31.7	380.17	460.5
17	25.12	47.4	15.99	40.9	41.13	88.3	235.12	1717.5	32.02	53.7	630.21	742
18	22.25	44.7	19.93	30.00	42.18	74.7	169.51	683.7	28.19	40	500.29	645
19	17.99	35	14.33	28	32.32	63	154.61	992	23.98	37.4	441.29	585.4
20	27.91	29	17.21	21.5	45.12	50.5	122.31	310.5	16.29	20.2	355	352.4
21	41.20	70.2	19.35	51.6	60.56	121.8	270.12	1853.04	34.09	63	699.28	860.5

## 7. Paramètres végétaux 2011- 2012

**Tableau 18. Stade tallage et épiaison**

Ech	Chl a (mg/g MF)		Chl b (mg/g MF)		Chl (a+b) (mg/g MF)		Sucres solubles (µg/100g. MF)		Protéines totales (µg/100g. MF)		Proline (µg/100g. MF)	
	Tallage	Epiaison	Tallage	Epiaison	Tallage	Epiaison	Tallage	Epiaison	Tallage	Epiaison	Tallage	Epiaison
1	8.865	10,267	3.656	6,126	12.521	16,126	2.56	10,71	0.043	1,316	1.24	0,076
2	24.574	44,101	18.089	28,177	42.663	73,177	27.24	45,4	1.47	1,962	3.10	0,168
3	15.066	30,729	5.687	19,105	20.753	49,124	35.77	47,36	1.15	1,558	1.94	0,029
4	17.921	34,100	9.520	21,104	27.445	55,332	22.20	47,52	1.06	1,692	2.64	0,035
5	23.751	41,291	22.572	29,151	46.323	70,524	44.28	32,88	1.21	1,888	2.90	0,041
6	15.910	28,191	6.055	17,104	21.965	46,125	63.36	5,64	1.03	1,543	0.19	0,0212
7	10.911	25,010	3.822	15,273	14.733	45,214	16.44	40,77	0.69	1,423	0.08	0,0688
8	18.227	42,717	7.743	26,172	25.970	67,451	55.93	42,75	1.60	1,889	2.81	0,039
9	17.251	36,715	5.331	22,275	22.582	68,236	67.77	55,72	0.74	1,631	2.27	0,031
10	23.409	45,101	15.255	28,212	38.664	74,684	51.96	87,68	1.54	1,975	3.20	0,184
11	14.235	27,959	10.161	17,271	24.396	45,239	71.30	37,66	1.53	1,523	0.57	0,0776
12	10.833	25,125	10.485	14,678	21.318	40,214	21.52	27,48	0.63	1,411	1.40	0,084
13	20.451	10,107	9.591	6,276	30.047	16,982	5.76	5,9	0.29	1,307	1.20	0,0153
14	20.648	30,815	12.678	19,754	33.326	50,850	58.88	35,28	1.53	1,694	1.81	0,112
15	10.312	10,312	3.822	3,822	14,134	14,134	198,66	198,66	07,86	07,86	2,01	2,01
16	15,819	15,819	6,214	6,214	22,033	22,033	526,33	526,33	26,31	26,31	2,81	2,81
17	23,235	23,235	22,562	22,562	45,797	45,797	073,33	073,33	22,34	22,34	7,85	7,85
18	18,123	18,123	9,273	9,273	27,396	27,396	104,66	104,66	08,55	08,55	4,35	4,35
19	15,432	15,432	5,217	5,217	20,649	20,649	351,33	351,33	11,29	11,29	6,44	6,44
20	8,735	8,735	3,672	3,672	12,407	12,407	073,33	073,33	08,03	08,03	1,98	1,98
21	24,612	24,612	18,021	18,021	42,633	42,633	149,33	149,33	18,03	18,03	8,28	8,28

## 8. Paramètres végétaux (campagne 2012- 2013)

**Tableau 19. Stade tallage et épiaison**

Ech	Chl a (mg/g MF)		Chl b (mg/g MF)		Chl (a+b) (mg/g MF)		Sucres solubles (µg/100g. MF)		Protéines totales (µg/100g. MF)		Proline (µg/100g. MF)	
	Tallage	Epiaison	Tallage	Epiaison	Tallage	Epiaison	Tallage	Epiaison	Tallage	Epiaison	Tallage	Epiaison
1	6,864	9,082	8,907	4,258	15,765	33,328	32,278	33,105	1,409	2,003	0,009	0,038
2	23,611	38,802	10,316	16,396	33,918	55,183	81,699	86,733	4,739	4,033	0,106	0,423
3	14,066	22,969	13,235	20,915	29,292	57,865	62,394	67,214	3,661	3,874	0,325	0,380
4	19,686	26,317	14,321	24,414	38,995	50,715	48,880	57,714	3,913	4,530	0,085	0,214
5	8,099	33,941	6,875	20,334	14,969	54,260	62,201	69,820	4,530	4,908	0,074	0,342
6	24,434	23,142	15,621	17,828	40,044	40,958	58,533	59,964	1,409	2,928	0,036	0,198
7	9,407	20,611	9,701	19,618	19,102	46,214	41,737	43,889	2,365	2,987	0,084	0,116
8	11,093	23,336	5,793	17,625	16,882	40,949	56,988	61,238	4,035	4,509	0,211	0,371
9	11,889	15,485	15,775	11,604	27,655	47,072	26,293	29,293	1,817	2,430	0,011	0,098
10	13,090	23,489	6,065	14,151	19,150	37,630	44,247	47,246	2,678	3,259	0,150	0,167
11	19,161	23,123	8,692	13,235	27,845	36,347	55,444	64,883	3,583	3,998	0,104	0,296
12	24,483	36,409	16,962	22,075	41,433	58,468	77,452	83,421	5,078	5,647	0,480	0,498
13	17,410	25,151	13,455	15,927	30,857	41,066	43,861	55,247	4,009	4,301	0,307	0,357
14	24,335	30,317	17,915	23,773	42,237	54,074	46,950	62,222	4,287	4,652	0,141	0,369
15	14,830	22,383	21,800	22,457	43,615	51,823	33,243	46,321	2,565	3,365	0,085	0,179
16	23,343	24,808	10,217	23,196	33,552	47,989	56,602	58,745	3,487	4,029	0,068	0,119
17	19,585	28,623	9,214	21,329	28,792	49,938	55,251	59,778	4,748	5,212	0,305	0,412
18	19,024	22,459	30,125	22,123	49,132	54,564	77,066	81,432	4,174	4,236	0,094	0,211
19	13,184	23,569	12,406	20,607	25,582	44,162	61,236	88,842	2,617	3,534	0,148	0,249
20	16,523	17,464	15,009	15,515	31,523	57,957	39,421	41,855	1,296	1,520	0,017	0,085
21	24,245	36,889	11,331	31,538	35,567	68,407	88,842	89,111	4,757	5,624	0,440	0,479

## 9. Résidus de pesticides

**Tableau 20. Résidus pesticides pendant les 4 campagnes (mg/Kg MS)**

Blocs	Campagnes 2009 - 2010		Campagnes 2010 - 2011		Campagnes 2011 - 2012		Campagnes 2012- 2013	
	Tallage	Epiaison	Tallage	Epiaison	Tallage	Epiaison	Tallage	Epiaison
Témoin	284	234	279	253	295	202	210	197
1	462	414	421	392	400	345	201	185
2	365	297	371	345	398	362	315	287
3	389	326	354	349	374	313	333	302
4	487	429	452	421	454	304	328	298
5	312	276	292	217	362	365	327	298
6	312	196	265	221	243	223	217	115

## 11. Paramètres agronomiques

**Tableau 21.** Paramètres agronomiques (campagne 2010-2011)

Ech	Nombre épi / m <sup>2</sup>	Longueur d'épi	Nombre de grain /épi	Poids de 1000 grains	Rendement qx/ha
01	210	8.52	20	47,16	30,58
02	300	7.93	38	61,51	85,93
03	245	10	39	55,12	45,33
04	221	11.02	45	58,1	71,5
05	301	12	58	60,1	85,6
06	200	11.03	37	67,1	45,32
07	232	9.83	32	60,12	49,5
08	298	11.5	62	65,5	81,33
09	198	9.23	42	58,5	42,5
10	245	8.11	35	60,33	88,16
11	241	10.87	40	64,5	50,1
12	179	10.5	39	58,5	51,33
13	301	9.1	16	48,82	29,5
14	235	10.12	52	52,2	73,33
15	210	10.63	37	60,96	49,53
16	162	11.85	46	65,86	53,29
17	343	12.17	60	58,12	80,84
18	294	10.63	50	57,28	73,9
19	379	9.45	39	49,34	50,2
20	224	10.16	21	52,25	16,4
21	349	10.21	32	59,93	88,5

**Tableau 22.** Paramètres agronomiques (campagne 2011-2012)

Ech	Nombre épi / m <sup>2</sup>	Longueur d'épi	Nombre de grain /épi	Poids de 1000 grains	Rendement qx/ha
01	241	9	18.3	53.16	23,45
02	294	8	55.4	54	87,95
03	261	8	46.9	54.08	66,20
04	272	8.16	48.5	53.70	70,84
05	280	12	58	54.5	88,51
06	223	9.4	33.2	63.24	46,82
07	243	8.4	31.6	57.19	43,92
08	282	10.6	54.7	54	83,30
09	265	8	54.8	53.7	77,98
10	291	9	61.4	55.17	98,57
11	247	10	34	63.12	53,01
12	250	8.7	30	54.13	40,60
13	241	8	17.2	54.83	22,73
14	263	7.4	13	50.16	17,15
15	247	9	31	54.04	41,38
16	215	10.3	32.7	59.3	41,69
17	263	12.2	54.8	57.6	83,02
18	260	9.3	46.6	53.7	65,06
19	255	8	57.3	52.3	76,42
20	232	7.4	21.4	53.89	26,76
21	274	7.5	59.9	55.19	90,58

**Tableau 23. Paramètres agronomiques (campagne 2011-2012)**

Ech	Nombre épi / m <sup>2</sup>	Longueur d'épi	Nombre de grain /épi	Poids de 1000 grains	Rendement qx/ha
01	241	09,7	19,1	54,07	25,19
02	300	09	59	56	90,31
03	275	09,3	49	54	68,19
04	281	09,15	51	56,10	73,17
05	290	13,00	64	56,2	90,55
06	235	10,3	38	67,23	48,37
07	256	9,7	32	59,19	49,19
08	298	11,5	58	58,9	86,88
09	272	08	57	55,9	78,98
10	302	9,9	69	60,1	100,93
11	263	12,1	37	64,01	55,70
12	283	09,7	35	58,9	45,12
13	257	9	18	57,2	25,12
14	279	8,3	14	52,3	20,9
15	278	11,2	30	58,7	43,80
16	223	12,4	33	63,8	43,52
17	279	14,7	55	66,2	86,47
18	285	10,5	48	56,3	69,03
19	278	10,2	60	55,1	81,53
20	244	8,3	25	54,82	28,07
21	293	8,04	64	59,2	98,95

**Tableau 24. Paramètres agronomiques (campagne 2012-2013)**

Ech	Nombre moyen épi / m <sup>2</sup>	Longueur moyenne d'épi	Nombre moyen de grain /épi	Poids moyen de 1000 grains	Rendement qx/ha
01	255	10,5	20,3	56	26
02	311	10	62,7	58,19	92,41
03	272	10,3	53,5	59	69,7
04	287	10,9	59	57	75,8
05	297	14,5	70	58	94,5
06	251	11,8	39	70,8	52,2
07	271	09,9	34	65,4	54,5
08	308	11,5	60	63,21	89,03
09	290	08	57	58,85	84,51
10	320	9,5	72	68,7	108,52
11	268	12,9	66,50	67,9	59,81
12	299	10,1	37	61,2	48,71
13	267	9,9	20	57,1	28,21
14	291	8,2	15	52,7	22,8
15	288	11,1	32	61,8	44,3
16	230	12,7	33	65,6	46,7
17	325	15,00	56	69,2	91,52
18	298	10,8	49	58,8	73,51
19	293	11,00	62	58,2	46,12
20	261	8,9	27	58,2	46,12
21	317	9,8	65	64,2	70,53

## 12. Paramètres physiologiques et morphologiques

**Tableau 25. Paramètres physiologiques et morphologiques Moyenne ± S**

Tests	Heures	48h	72h	96h	120h
Test de germination		17,6 ± 1,497	18,6 ± 1,356	19,2 ± 0,748	19,4 ± 0,490
NMR ± s		2,320 ± 0,563	3,080 ± 0,221	40,80 ± 0,189	4,560 ± 0,654
LMR ± s		8,880 ± 1,282	17,84 ± 0,956	26,08 ± 6,130	30,76 ± 4,869