

## Sommaire

<b>Introduction.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I. Présentation de la région d'étude.....</b>	<b>3</b>
I.1. Situation géographique .....	3
I.1.2 Aspects sociaux économiques .....	5
I.2.1. Les précipitations .....	5
I.2.1.1. Répartition annuelle des précipitations .....	5
I.2.1.2. Répartition des précipitations mensuelles .....	7
I.2.1.3. Variabilité des précipitations mensuelles .....	8
I.2.2. Les températures .....	9
I.2.2.1 Les températures moyennes mensuelles .....	9
I.2.2.2. Variation des températures moyennes annuelles. ....	10
I.2.2.3 Les extrêmes mensuels moyens .....	11
I.2.3 Diagramme pluviothermique .....	11
I.2.4 L'enseulement et l'humidité relative de l'air .....	12
I.2.5. Les vents .....	12
I.2.5.1 Fréquences annuelles du vent .....	13
I.3. Le bilan hydrique .....	13
I.3.1 Calcul de l'évapotranspiration réelle .....	13
I.3.1.1 Calcul de l'évapotranspiration réelle par la méthode de C.W.Thorthwaite .....	13
I.3.1.2 Calcul de l'évapotranspiration réelle par la formule de Turc .....	16
I.4.Contexte géologique et structural .....	16
I.4.1. Orographie et géomorphologie .....	16
I.4.1.1 Répartition des pentes et des altitudes dans la nappe alluviale de la moyenne Seybouse. ....	18
I.4.2. Géologie et stratigraphie .....	19
I.4.2.1. Le primaire .....	19
I.4.2.2. Le trias .....	19
I.4.2.3. Le Néritique .....	19
I.4.2.4. Le jurassique .....	19
I.4.2.5. Le Crétacé .....	19
I.4.2.6. L'unité tellienne .....	19
I.4.2.7. L'unité ultra – tellienne .....	20
I.4.2.8. Le Numidien .....	20
I.4.2.9. Le post – nappe .....	20
I.4.2.10. Le Quaternaire .....	20
I.5. Tectonique .....	23
I.6 Conclusion .....	26
<b>Chapitre II. Etude hydrogéologique.....</b>	<b>28</b>
II.1 Géométrie et hydrodynamique de la nappe alluviale de Guelma (la moyenne Seybouse) .....	28
II.1.1 Structure et géométrie de la nappe alluviale de Guelma .....	28
II.1.1.1 Les unités aquifères .....	28
II.1.1.2 Carte du substratum de la nappe aquifère de Guelma .....	34
II.2 Propriétés hydrodynamiques .....	36
II.2.1 La carte de transmissivité de la nappe aquifère de Guelma .....	36
II.3 La piézométrie .....	37
II.3.1 La carte piézométrique de la nappe aquifère de Guelma .....	37
II.3.2 Les conditions aux limites .....	39
II.4 Conclusion .....	39

## **Chapitre III. Etude hydrochimique des eaux de surface.....41**

III.1. Qualité des eaux de l'oued Seybouse et de ses affluents .....	41
III.1.1 Matériels et méthodes .....	41
III.1.1.1 Les propriétés géochimiques et degré de pollution organique .....	41
III.2. Faciès chimique .....	44
III.3. Acquisition de la charge saline des eaux de surface.....	47
III.3.1. Evolution spatiale des éléments chimiques des eaux de l'oued Seybouse .....	49
III.3.1.1 Les cations .....	49
III.3.1.2. Les anions.....	50
III.4.1 Le risque de salinité .....	51
III.4.1.1 Evolution temporelle et spatiale de la salinité .....	51
III.4.2. Le risque de sodicité .....	52
III.4.2.1 Diagramme de Richards .....	53
III.4.2.2 Diagramme de Wilcox .....	55
III.4.3. Les éléments métalliques en traces .....	56
III.4.4. Substances nutritives .....	58
III.4.4.1. Les nitrates .....	59
III.4.4.2. Le potassium.....	59
III.4.4. Degré de restriction à l'usage des eaux d'irrigation de l'oued Seybouse .....	59
III.5. Etude Statistique multivariable (Aout 2005) .....	60
III.5.1 Analyse en composantes principales (ACP) .....	61
III.5.1.1 ACP après rotation orthogonale Varimax (Aout 2005) .....	66
III.5.2. Classification ascendante hiérarchique .....	67
III.6.1. Le couple $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ .....	70
III.6.2. Les couples $\text{Ca}^{+2} / \text{SO}_4^{2-}$ et $\text{Ca}^{+2}/\text{HCO}_3^-$ .....	71
III.6.4 Relation entre les ions échangeables .....	75
III.6.5 Etude statistique (Juin 2016) .....	76
III.7. Degré de pollution des eaux de surface .....	78
III.7.1 Analyse statistique multivariable .....	80
III.7.2 Classification ascendante hiérarchique (CAH) .....	81
III.7.3. Evolution dans l'espace des polluants .....	82
III.7.3.1 L'évolution de la conductivité électrique .....	83
III.7.3.2 L'évolution du phénol .....	83
III.7.3.3 Evolution des Phosphates .....	83
III.7.3.4 Evolution de la DCO et La DBO5 .....	86
III.7.3.5 Evolution de l'oxygène dissous et du potentiel redox .....	86
III.7.3.6 L'évolution de l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) .....	86
III.7.3.7 Evolution des nitrites .....	87
III.7.3.8 Evolution du chrome ( $\text{Cr}^{6-}$ ) .....	88
III.8 Pollution microbiologique .....	89
III.8.2. Evolution de la charge bactérienne .....	91
III.8.3. Degré de la pollution bactériologique et aptitude à l'irrigation.....	95
III.8.3.1. Indice de qualité microbiologique .....	96
III.9 Propriété isotopique des eaux de surface du bassin de la moyenne Seybouse .....	98
III.9.1. Oxygène-18 et deutérium ( $2\text{H}$ ) .....	99
III.10. Conclusion .....	100

## **Chapitre IV. Hydrochimie des eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma.....103**

IV. Les eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma .....	103
IV.1. Faciès chimique des eaux de la nappe .....	103
IV.2. Statistique descriptive des concentrations des éléments majeurs et qualité des eaux.....	104
IV.3 Répartition spatiale des teneurs .....	105
IV.3.1 Carte de la salinité .....	105
IV.3.2 Carte des chlorures .....	105

IV.3.3 Carte du calcium .....	106
IV.3.4 Carte du magnésium .....	107
IV.3.5 Carte des sulfates .....	108
IV. 3.6 Carte des bicarbonates .....	109
IV.4.1 Origine de la Salinité .....	110
IV.4.1.1 Relation de la salinité avec les carbonates et les évaporites .....	110
IV.5.1 Le rapport $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ .....	112
IV.5.2 Les rapports $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$ , $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ et $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}+\text{HCO}_3^-$ .....	113
IV.5.3 Les rapports $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ en fonction de $\text{Mg}^{2+}/\text{K}^+$ .....	115
IV.5.4 Equilibre thermodynamique .....	115
IV.5.4.1 L'Indice de Saturation .....	115
IV.6 L'échange ionique .....	118
IV.7 Analyse en Composantes Principales (ACP) .....	118
IV.8.1 La classification ascendante hiérarchique des observations .....	121
IV.8.2 La classification ascendante hiérarchique des variables .....	121
IV.9 Conclusion.....	124
<b>Chapitre V. Modélisation des aquifères.....</b>	<b>126</b>
Introduction .....	126
V.1 Etablissement du modèle.....	126
V.1.1 Les conditions aux limites .....	126
V.1.2 Schéma du modèle .....	126
V.1.3 Piézométrie .....	127
V.1.4 Les paramètres hydrogéologiques .....	127
V.1.5 Les conditions aux limites .....	129
V.2 Exploitation du modèle .....	130
Conclusion .....	132
<b>Conclusions générales.....</b>	<b>134</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>139</b>

## Liste des figures

<b>Figure 1.</b> Situation géographique de la nappe alluviale de Guelma dans le bassin versant de l'oued Seybouse avec les tranches d'altitude.....	<b>03</b>
<b>Figure 2.</b> Modèle numérique de terrain (MNT) du bassin versant de Seybouse et de la nappe alluviale de Guelma en 2D et en 3D. ....	<b>04</b>
<b>Figure 3.</b> Le coefficient pluviométrique à la station de Guelma (1995/2008).....	<b>07</b>
<b>Figure 4.</b> Variabilité annuelle des précipitations à la station de Guelma.....	<b>07</b>
<b>Figure 5.</b> Variabilité des précipitations moyennes mensuelles à la station de Guelma...	<b>08</b>
<b>Figure 6.</b> Le coefficient de variation à la station de Guelma (1995/2008).....	<b>09</b>
<b>Figure 7 :</b> Températures moyennes mensuelles à la station de Guelma.....	<b>10</b>
<b>Figure 8 :</b> Variation des températures moyennes annuelles à la station de Guelma.....	<b>11</b>
<b>Figure 9 :</b> Diagramme pluviothermique à la station de Guelma.....	<b>12</b>
<b>Figure 10 :</b> Représentation graphique du bilan de Thornthwaite.....	<b>15</b>
<b>Figure 11.</b> Carte des pentes de la nappe alluviale de la moyenne Seybouse.....	<b>18</b>
<b>Figure 12.</b> Carte des tranches d'altitude de la nappe alluviale de la moyenne Seybouse....	<b>18</b>
<b>Figure 13:</b> Carte géologique de la région de Guelma (Extraite de la carte de géologie de Guelma (J.M.Vila)).....	<b>22</b>
<b>Figure 14.</b> Carte d'inventaire des forages et des piézomètres dans la plaine de Guelma de l'année 2012.....	<b>29</b>
<b>Figure 15 :</b> Coupe1 montrant la liaison entre la vallée actuelle et la vallée ancienne.....	<b>32</b>
<b>Figure 16.</b> Coupe hydrogéologique transversale n°2.....	<b>33</b>
<b>Figure 17.</b> Coupe n° 3 montrant la présence d'un seuil de marne à gypse isolant la basse terrasse de la haute terrasse et la relation entre les alluvions et les travertins.....	<b>34</b>
<b>Figure 18.</b> Carte de la profondeur du substratum de la nappe aquifère de Guelma.....	<b>35</b>
<b>Figure 19.</b> Carte de transmissivité de la nappe alluviale de Guelma. ....	<b>36</b>
<b>Figure 20.</b> Carte piézométrique de la nappe alluviale de Guelma.....	<b>37</b>
<b>Figure 21.</b> Localisation des points de prélèvement des eaux (Mai et Aout, 2005).....	<b>43</b>
<b>Figure 22.</b> Faciès chimique des eaux de surface de la plaine de Guelma .....	<b>46</b>
<b>Figure 23.</b> Correlation entre les différents ions et la minéralisation totale.....	<b>48</b>
<b>Figure 24.</b> Evolution spatiale et temporelle des cations dans les eaux de surface de la plaine de Guelma (mai et Aout 2005).....	<b>49</b>
<b>Figure 25.</b> Variation spatiale et temporelle des anions des eaux de surface de la plaine de Guelma (2005)	<b>50</b>
<b>Figure 26.</b> Evolution spatio- temporelle de la conductivité des eaux d'irrigation.....	<b>52</b>

## Liste des figures

<b>Figure 27.</b> Classification des eaux de surface d'après le diagramme de Richards (Riverside) .....	<b>54</b>
<b>Figure 28.</b> Classification des eaux d'irrigation d'après le diagramme de Wilcox en .....	<b>55</b>
<b>Figure 29.</b> Teneur en ETM dans les eaux de surface (aout, 2005).....	<b>58</b>
<b>Figure 30.</b> Teneur en éléments en traces aux stations d'irrigation, Juin 2016.....	<b>58</b>
<b>Figure 31.</b> ACP des eaux de surface de la plaine de Guelma pour le mois d'Aout 2005.	<b>65</b>
<b>Figure 32.</b> ACP après rotation orthogonale Varimax (Aout 2005).....	<b>66</b>
<b>Figure 33.</b> Dendrogramme des paramètres physico-chimiques (Aout 2005).....	<b>67</b>
<b>Figure 34.</b> Classification ascendante hiérarchique des eaux de surface de la plaine de Guelma pour le mois de Juillet 2004.....	<b>68</b>
<b>Figure 35.</b> Carte des classes des eaux de surface de la plaine de Guelma pour le mois d'Aout 2005.....	<b>68</b>
<b>Figure 36.</b> Relation entre $\text{Na}^+$ et $\text{Cl}^-$ dans les eaux de surface de la plaine de Guelma (Aout 2005).....	<b>70</b>
<b>Figure 37.</b> Distribution des échantillons d'eaux de surface par rapport à la droite de mise en solution du gypse (a), de la calcite (b) et de dolomie (c).....	<b>72</b>
<b>Figure 38.</b> Corrélations des indices de saturation des eaux vis-à-vis du gypse, de la calcite de la dolomite et de la halite en fonction de $\text{Ca}+\text{SO}_4$ (a), $\text{Ca}+\text{HCO}_3$ (b), $\text{Ca}+\text{Mg}+\text{HCO}_3$ (c) et $\text{Cl}^- + \text{Na}^+$ (d) respectivement, dans les eaux de surface pour le mois d'Aout 2005. ( $R^2$ coefficient de détermination).	<b>73</b>
<b>Figure 39.</b> Relation entre Ca et $\text{HCO}_3+\text{SO}_4$ pour l'ensemble des échantillons prélevés en Aout 2005.	<b>74</b>
<b>Figure 38.</b> Relation entre $\text{Ca} / (\text{HCO}_3+\text{SO}_4)$ et $\text{Mg}/\text{Ca}$ pour le mois de Aout 2005.....	<b>74</b>
<b>Figure 39.</b> Relation entre $\text{Ca}/(\text{HCO}_3+\text{SO}_4)$ et $\text{Mg}/\text{Ca}$ , aout 2005.....	<b>74</b>
<b>Figure 41.</b> Relation entre les ions échangeables dans les eaux de surface de la plaine de Guelma en Aout 2005	<b>76</b>
<b>Figure 42.</b> ACP des eaux d'irrigation (Juin, 2016).....	<b>77</b>
<b>Figure 43.</b> Stations de prélèvement des eaux de surface de la plaine de Guelma en Juillet 2004	<b>78</b>
<b>Figure 44.</b> ACP des eaux de surface pour le mois de Juillet 2004.....	<b>80</b>
<b>Figure 45.</b> Classification ascendante hiérarchique des eaux de surface de la plaine de Guelma pour le mois de Juillet 2004.....	<b>81</b>
<b>Figure 46.</b> Carte des classes des eaux de surface pour le mois de Juillet 2004 .....	<b>82</b>
<b>Figure 47.</b> Evolution de la conductivité électrique dans les eaux de surface en juillet 2004.....	<b>83</b>
<b>Figure 48.</b> Evolution spatiale des éléments chimiques au niveau de l'oued Seybouse(Juillet, 2004)	<b>85</b>

## Liste des figures

<b>Figure 49.</b> Evolution de l'azote ammoniacal, des nitrites et de l'oxygène dissous dans les eaux de surface de la plaine de Guelma en Juillet 2004.....	<b>87</b>
<b>Figure 50.</b> Evolution du chrome et du pH en fonction du potentiel redox dans les eaux de surface de la plaine de Guelma en Juillet 2004.....	<b>89</b>
<b>Figure 51.</b> La charge bactérienne des stations d'irrigation, 2005.....	<b>92</b>
<b>Figure 52.</b> La charge bactérienne dans les affluents de l'oued Seybouse, 2005.....	<b>93</b>
<b>Figure 53.</b> La charge bactérienne aux stations d'irrigation, Aout 2016.....	<b>94</b>
<b>Figure 54.</b> La charge Bactérienne dans les affluents de l'oued seybouse et après le point de rejet de la STEP, Aout 2016.....	<b>94</b>
<b>Figure 55.</b> Degré de la contamination fécale, Juillet 2005.....	<b>96</b>
<b>Figure 56.</b> Degré de la contamination fécale, Aout 2005.....	<b>97</b>
<b>Figure 57.</b> Degré de la contamination fécale, Aout 2016.....	<b>97</b>
<b>Figure 58.</b> Relation 18Ovs deutérium des eaux de surface du bassin de la moyenne Seybouse	<b>99</b>
<b>Figure 59.</b> Relation entre les teneurs en chlorures et en 18o dans les eaux de surface du bassin de la moyenne Seybouse.....	<b>99</b>
<b>Figure 60.</b> Répartition des points d'eau prélevés de la nappe en Juin 2005.....	<b>102</b>
<b>Figure 61.</b> Faciès chimique des eaux de la nappe alluviale de Guelma (basses eaux, 2005).....	<b>103</b>
<b>Figure 62.</b> Carte de la conductivité électrique des eaux souterraines de la nappe aquifère de Guelma (Basses eaux, 2005).....	<b>104</b>
<b>Figure 63.</b> Carte de chlorures des eaux souterraines de la nappe aquifère de Guelma (Basses eaux, 2005).....	<b>105</b>
<b>Figure 64.</b> Carte des teneurs du calcium des eaux souterraines de la nappe aquifère de Guelma (Basses eaux, 2005).....	<b>106</b>
<b>Figure 65.</b> Carte du magnésium des eaux souterraines de la nappe aquifère de Guelma (Basses eaux, 2005).....	<b>107</b>
<b>Figure 66.</b> Carte des sulfates des eaux souterraines de la nappe aquifère de Guelma (Basses eaux, 2005).....	<b>108</b>
<b>Figure 67.</b> Carte des bicarbonates des eaux souterraines de la nappe aquifère de Guelma (Basses eaux, 2005).....	<b>109</b>
<b>Figure 68.</b> Evolution de la conductivité électrique (CE) en fonction des bicarbonates, du rapport Carbonates/Evaporites et du rapport $Cl^-/SO_4^{2-}$ (Basses eaux, 2005).....	<b>110</b>

## Liste des figures

<b>Figure 69.</b> Faciès chimique des eaux par les rapports $Cl^-/SO_4^{2-}$ et $Ca^{2+}/Mg^{2+}$ .....	<b>111</b>
<b>Figure 70.</b> Relation entre $Na^+$ et $Cl^-$ pour l'ensemble des échantillons prélevés, B.E 2005	<b>111</b>
<b>Figure 71.</b> Relation entre $Ca^{2+}$ et $HCO_3^-$ , $Ca^{2+}$ et $SO_4^{2-}$ , $Ca^{2+}$ et $Mg+HCO_3^-$ pour l'ensemble des échantillons prélevés durant la période de basses eaux 2005.....	<b>111</b>
<b>Figure 72.</b> Les rapports $Ca^{2+}/Na^+$ en fonction de $Mg^{2+}/K^+$ .....	<b>113</b>
<b>Figure 73.</b> Corrélation des indices de saturation des eaux vis-à-vis, de la calcite, de la dolomite et du gypse en fonction de $Ca+HCO_3$ (a), $Ca+Mg+HCO_3$ (b) et $Ca+SO_4$ (c), et respectivement, dans la période des basses eaux, 2005.....	<b>114</b>
<b>Figure 74.</b> ACP des eaux souterraines de la nappe aquifère de Guelma (Basses eaux, 2005).....	<b>116</b>
<b>Figure 75.</b> Classification ascendante hiérarchique des observations des eaux de la nappe alluviale de Guelma (Basses eaux, 2005).....	<b>119</b>
<b>Figure76:</b> Carte des classes des points de prélèvement des eaux souterraines de la nappe de Guelma (Basses eaux, 2005).....	<b>120</b>
<b>Figure 77.</b> Classification ascendante hiérarchique des variables dans les eaux de la nappe alluviale de Guelma (Basses eaux, 2005).....	<b>121</b>
<b>Figure 78.</b> Schéma du modèle.....	<b>126</b>
<b>Figure 79.</b> Piézométrie de la nappe intégrée dans les modèles hautes eaux 2009.....	<b>127</b>
<b>Figure 80 :</b> Piézométrie observée et calculée en régime permanent (période de hautes eaux Avril 2009).....	<b>128</b>
<b>Figure 81.</b> Carte des valeurs du coefficient de perméabilité.....	<b>129</b>
<b>Figure 82.</b> Conditions aux limites de la nappe alluviale.....	<b>130</b>
<b>Figure83.</b> Résultat de la situation hydrodynamique de la nappe aquifère, simulée selon le schéma d'exploitation actuel.....	<b>131</b>
<b>Figure 84.</b> Schéma d'une exploitation avec des forages fictifs.....	<b>131</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.</b> Caractéristiques géographiques et topographies de la station de Guelma.....	<b>05</b>
<b>Tableau 2:</b> Précipitations annuelles à la station de Guelma de 1995 à 2008.....	<b>06</b>
<b>Tableau 3 :</b> Précipitations moyennes mensuelles à la station de Guelma (1995/2008).....	<b>07</b>
<b>Tableau 4 :</b> Variabilité des précipitations moyennes mensuelles à la station de Guelma (1995/2008).....	<b>08</b>
<b>Tableau 5 :</b> Les températures moyennes mensuelles à la station de Guelma (1985/2008)	<b>09</b>
<b>Tableau 6.</b> Températures moyennes annuelles à la station de Guelma (1985/86 - 2005/06).....	<b>10</b>
<b>Tableau 7.</b> Les extrêmes mensuels moyens à la station de Guelma.....	<b>11</b>
<b>Tableau 8.</b> Variations moyennes mensuelles de l'ensoleillement et de l'humidité relative de l'air à la station de Guelma (1995/2004).....	<b>12</b>
<b>Tableau 9.</b> Fréquences annuelles du vent à la station de Guelma (1995/2004).....	<b>13</b>
<b>Tableau 10.</b> Le bilan hydrologique selon la méthode de C.W Thornthwaite à la station de Guelma (1995/2008).....	<b>14</b>
<b>Tableau 11.</b> Description géologique et hydrogéologique des formations de la région d'étude.	<b>25</b>
<b>Tableau 12.</b> Faciès chimique des eaux de l'oued Seybouse en Mai et Aout 2005.....	<b>42</b>
<b>Tableau 13.</b> Faciès chimique des eaux des affluents de l'oued Seybouse Mai et Aout 2005.....	<b>45</b>
<b>Tableau 14.</b> Faciès chimique des seuils d'irrigation, Juin 2015.....	<b>45</b>
<b>Tableau 15.</b> Classe de salinité selon Richards (Faby et al, 2000).....	<b>51</b>
<b>Tableau 16.</b> Importance des éléments traces vis-à-vis des plantes .....	<b>56</b>
<b>Tableau 17.</b> Concentrations maximales en éléments traces recommandées pour les eaux d'irrigation (Ayers et Westcot, 1985).	<b>57</b>
<b>Tableau 18.</b> Directives d'interprétations de la qualité de l'eau pour l'irrigation (FAO, 1985, adapté).....	<b>60</b>
<b>Tableau 19.</b> Degré de restriction à l'usage des eaux d'irrigation dans les stations de pompage, selon les directives du FAO, 1985.....	<b>60</b>

<b>Tableau 20.</b> Etude statistiques des paramètres physico-chimiques analysés dans les eaux de surface (Aout 2005)	<b>62</b>
<b>Tableau 21.</b> Matrice de corrélation de Pearson (n) des paramètres physico-chimiques des eaux de surface de la nappe alluviale de Guelma en Aout 2005.	<b>62</b>
<b>Tableau 22.</b> Corrélations entre les variables et les facteurs .....	<b>63</b>
<b>Tableau 23.</b> Cosinus carrés des variables.....	<b>63</b>
<b>Tableau 24.</b> Classe des paramètres physico-chimiques analysés en Aout 2005.....	<b>67</b>
<b>Tableau 25.</b> Indices de saturation des principaux minéraux présents dans les eaux de l’oued Seybouse et ses affluents en Aout 2005.....	<b>70</b>
<b>Tableau 26.</b> Coefficient de corrélation, Juin 2016.....	<b>77</b>
<b>Tableau 27.</b> Statistique des paramètres physico-chimique des eaux de surface de la plaine de Guelma pour le mois de Juillet 2004.....	<b>79</b>
<b>Tableau 28.</b> Matrice de corrélation de Pearson des paramètres physico-chimiques des eaux de surface de la nappe alluviale de Guelma en juillet 2004.....	<b>79</b>
<b>Tableau 29.</b> Tableau des Corrélations entre les variables et les facteurs.....	<b>80</b>
<b>Tableau 30.</b> Indicateurs chimiques de pollution des eaux de surface selon les normes françaises.....	<b>82</b>
<b>Tableau 31.</b> Indicateurs chimiques de pollution des eaux de surface (issue de norme françaises).....	<b>86</b>
<b>Tableau 32.</b> Limite des classes bactériologiques.....	<b>90</b>
<b>Tableau 33.</b> Statistiques descriptives des principaux paramètres physico-chimiques analysés dans les eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (Basses eaux, 2005).....	<b>103</b>
<b>Tableau 34.</b> Paramètres statistiques de l’indice de saturation des eaux souterraines de la nappe de Guelma (Basses eaux, 2005).....	<b>115</b>
<b>Tableau 35.</b> Paramètres statistiques de l’indice d’échange de base pour les eaux de la nappe alluviale de Guelma (basses eaux 2005).....	<b>117</b>
<b>Tableau 36.</b> Classes des variables dans les eaux souterraines de l’aquifère de Guelma (Basses eaux, 2005).....	<b>122</b>

Liste des tableaux.

---

## Résumé

---

La plaine de Guelma fait partie de la moyenne Seybouse qui est une partie intégrante du bassin versant de l'Oued Seybouse. C'est une zone à vocation agricole où l'eau souterraine est un facteur indéniable du développement socioéconomique. Cependant, cette unique ressource en eau de la région est sujette à une dégradation qualitative

L'étude de l'origine des principaux éléments majeurs présents dans les eaux de la plaine de Guelma est conduite en utilisant les graphes binaires et l'analyse des indices de saturation vis-à-vis des minéraux potentiellement existant dans les eaux de surface.

Les ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  proviennent majoritairement de la dissolution de l'halite. Cependant, un enrichissement en ion  $\text{Cl}^-$  provient d'une contamination anthropique provoquée par le rejet des eaux usées urbaines et probablement avec un échange de base avec la matrice argileuse où le  $\text{Na}^+$  de ces eaux, caractérisées par le faciès chloruré sodique, est remplacé par les ions  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Ca}^{2+}$  des formations encaissantes, acquérant ainsi un faciès chloruré calcique et magnésien.

L'indice de saturation montre que les eaux de surface de la plaine de Guelma sont pour la plupart sous-saturées en Halite et en gypse, mais sursaturées en calcite et dolomite, favorisant la précipitation de ces minéraux carbonatés calcaires et dolomitiques et la dissolution des formations évaporitiques salifères et gypsifères.

La pollution organique est soulignée par la présence de teneurs élevées en nitrites, surtout au niveau des stations de prélèvement, proches des points de rejets des eaux usées. Les cinq stations de prélèvement indiquent une contamination des eaux par l'azote ammoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ).

Pour l'hydrochimie des eaux souterraines, en somme, un seul faciès chimique d'eau apparaît, c'est le faciès chloruré calcique, qui est étai à la base chloruré sodique, ceci est confirmé par les indices d'échange de base qui sont en faveur de la fixation du sodium et la libération du calcium par les formations argilo-marneuses miocènes.

L'évolution de la salinité en fonction du rapport  $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ , met en relief que ce sont les évaporites qui participent en grande partie dans la minéralisation de ces eaux, en particulier les formations évaporitiques salifères qui soulignent plus cette minéralisation que les évaporites gypsifères.

D'après les résultats du modèle de la nappe aquifère de Guelma, Il apparaît, que l'exploitation actuelle des forages, qui sont concentrés dans une zone très réduite, peut provoquer une baisse sensible du niveau piézométrique et même une surexploitation de la nappe de la haute terrasse avec son épuisement dans sa partie sud.

La zone se situant au Nord du village de Boumahra Ahmed pourrait faire l'objet d'une étude détaillée et approfondie, car l'étude géophysique montre une importante épaisseur d'alluvions perméables, favorisée par sa limite avec le djebel Zemzouma, qui est constitué de formations pliocènes perméables. Cette zone pourrait être, sur un plan hydrodynamique, intéressante et favorable à l'implantation de forages d'exploitation.

**Mots clés :** Seybouse, eaux souterraines, pollution, eaux de surface.

## Abstract

Guelma plain is located in the mid Seybouse basin which is a part of the watershed of Seybouse River. The plain is covered by agricultural areas where groundwater is considered as the main water resource and is an undeniable factor in economic development. However, these water resources are subject to a qualitative and especially quantitative degradation in the region.

The study of the origin of the main major elements present in the surface water in the plain of Guelma is conducted using binary graphs and analysis of saturation indices in the relation with the potential existing minerals. The  $\text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-$  come mainly from the dissolution of halite.

However, enrichment in ion  $\text{Cl}^-$  results from an anthropological contamination caused by urban wastewater and probably with a basic exchange with the clayey matrix where  $\text{Na}^+$  of these waters, characterized by sodic chlorinated facies, is replaced by  $\text{Mg}^{2+}$  and  $\text{Ca}^{2+}$  ions from underlying formations, so acquiring a calcic and magnesian chlorinated facies

The saturation index shows that the surface waters of the plain of Guelma are mostly under saturated in Halite and gypsum but oversaturated in calcite and dolomite, stimulating the precipitation of these limestone and dolomitic carbonate minerals and the dissolution of evaporate saliferous and gypsiferous formations. Organic pollution is underlined by the presence of high levels of nitrites, especially at sampling stations near the points of discharge of wastewater.

The five sampling stations indicate water contamination by ammonium nitrogen ( $\text{NH}_4$ ). As regards to groundwater, a single chemical water facies appears and is the calcic chlorinated facies, which was at the basis chlorinated sodium. This is confirmed by the indices of basic exchange which are in favour of the fixation of the sodium and the liberation of the calcium by the Miocene clayey marly formations.

The evolution of salinity according to the ratio  $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^- \text{SO}_4^{2-}$ , highlights that the evaporites participate largely in the mineralization of these waters, in particular saliferous evaporite formations which underline more this mineralization than gypsiferous evaporates formations.

The established numerical groundwater flow model of the Guelma aquifer shows that current exploitation wells, that are concentrated in a very small area, could cause a significant decrease in the groundwater level, even in its southern part. A detailed and thorough study could be carried out in the area lying north of the village of Ahmed Boumahra, as the geophysical study shows a significant thickness of permeable alluvium. This also is favored by Jebel Zemzouma, which bound this area and is constituted by permeable Pliocene formations. This area could be of a big interest in a drilling of water supply wells.

**Key words:** Seybouse, groundwater, pollution, surface water.

سهل قالمة هو جزء لا يتجزأ من حوض واد سيبوس.

تعد المياه الجوفية العامل الاساسي في التنمية الاقتصادية في المجال الزراعي ومع ذلك، فهذه الموارد المائية فريدة من نوعها في المنطقة تخضع لتدهور نوعي وكمي على وجه الخصوص.

تتم دراسة أصل العناصر الرئيسية الموجودة في المياه من سهل قالمة باستخدام الرسوم البيانية الثنائية وتحليل مؤشرات التشبع مع المعادن التي يحتمل أن تنشأ في المياه السطحية. فالصوديوم و الكلوريد يأتیان أساساً من تحلل الهاليت ، والإثراء من أيون الكلوريد مصدره هو التلوث الناجم عن تصريف مياه الصرف الصحي في المناطق الحضرية ، او ربما ناتج عن تبادل القواعد بين الطين وهذه المياه التي تتميز بسحنة كلوريد الصوديوم ولكن بواسطة ظاهرة التبادل مع الكالسيوم و المغنزيوم للتشكيلات المحيطة بها، نجد في نهاية المطاف سحنتها الكيميائية تصب كلوريد كالسيوم و المغنزيوم.

يظهر مؤشر التشبع أن المياه السطحية لسهل قالمة غير متشبعة معظمها من الهاليت و الجبس ولكن مشبعة من الكالسيوم و الدولوميت مما يعزز ترسيب هذه المعادن الكربوناتية الكلسية و الدولوميتية وتحلل الطبقات الملحية و الجبسية .

و أكد التلوث العضوي عن وجود مستويات عالية من النتريت ، وخاصة في محطات أخذ العينات بالقرب من نقاط تصريف مياه الصرف . تشير محطات أخذ العينات الخمس الى تلوث المياه بواسطة الأمونيوم.

بالنسبة لكمياء المياه الجوفية ، وباختصار ، تظهر سحنة واحدة ، وهي سحنة الكلوريد و الكالسيوم ، والتي كانت في الاساس سحنة الكلوريد و الصوديوم ، هذا ما يؤكد مؤشر التبادل القاعدي الذي يظهر تثبيث الصوديوم و اطلاق الكالسيوم من قبل تشكيلات الطين و المارن الميوسيني. يبين تطور الملوحة بدلالة  $HCO_3^-/Cl^- + SO_4^{2-}$  ، ان المتبخرات الملحية هي التي تشارك إلى حد كبير في تمعدن هذه المياه ، أكثر من المتبخرات الجبسية.

استناداً إلى نتائج نموذج المياه الجوفية لقالمة ، يبدو أن الاستغلال الحالي للآبار التي تتركز في منطقة صغيرة جداً يمكن أن يسبب انخفاض كبير في مستوى المياه الجوفية و حتى الإفراط في استغلال طبقة المياه الجوفية للطبقة العلوية مع تجفيفها في جزئها الجنوبي. ان المنطقة الواقعة في شمال قرية بومهرة أحمد يمكن أن تكون محور دراسة مفصلة وشاملة لان الدراسة الجيوفيزيائية تظهر سمك كبير من الطمي النفود ، التي تتواجد حدودها مع جبل زمزومة ، وتتألف من تشكيلات العصر البليوسين النفوذة . هذه المنطقة يمكن أن تكون على المستوى الهيدروناميكي ، مثيرة للاهتمام وملائمة لإنجاز ابار للاستهلاك.

**الكلمات المفتاحية:** سيبوس، مياه الجوفية، تلوث، مياه سطحية.

## **Introduction**

Le Nord algérien renferme une ressource en eau souterraine d'une importance capitale pour le développement socio-économique du pays. En effet, les eaux souterraines contribuent largement à la satisfaction des besoins en eau potable domestique, agricole et industrielle. Elles peuvent représenter dans de nombreuses communes et villes la seule ressource en eau disponible à cause de la rareté ou de l'existence locale de ressources en eau superficielles.

La plaine de Guelma située dans le Nord-Est de l'Algérie, est une zone à climat semi-aride. Elle confine une ressource en eau souterraine très exploitée pour l'alimentation en eau potable pour les besoins de la population locale. Ce qui a engendré une menace constante sur sa qualité et une diminution de sa quantité.

Les principaux aquifères de la plaine de la moyenne Seybouse sont : l'aquifère des travertins au Sud-Est, les alluvions plio-quadernaires de la haute terrasse, où la plupart des forages et des puits sont implantés, et la nappe de la vallée actuelle.

Le présent travail s'intéresse à l'étude de l'état quantitatif et qualitatif actuel de la nappe plio-quadernaire et de son évolution future. Un modèle hydrodynamique permettra d'évaluer et de prévoir l'évolution quantitative de la ressource en eau souterraine de l'aquifère.

Ce travail propose également un modèle conceptuel intégrant l'origine de la salinité et les processus d'acquisition des éléments chimiques majeurs, présents dans les eaux de la nappe plio-quadernaire de la plaine de la moyenne Seybouse, et vise également à identifier la part du chimisme de l'eau de la nappe plio-quadernaire due, d'une part, à l'interaction avec la roche encaissante et celle issue des apports extérieurs et d'autres part, à celle des eaux de surface, ayant une relation avec les eaux souterraines de la nappe, grâce à une étude géochimique approfondie.

Le mémoire inclut cinq chapitres :

Le premier chapitre présente les caractéristiques : climatiques, géomorphologiques et géologiques de la région de Guelma.

Le second chapitre est consacré à la reconnaissance des propriétés hydrogéologiques de la nappe, à savoir la géométrie, la structure et la relation entre des différentes nappes existantes, ainsi qu'une reconnaissance des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère.

Le troisième chapitre concerne l'étude de l'origine des principaux éléments majeurs dissous dans les eaux de surface : oued Seybouse et ses affluents, par les méthodes géochimiques ainsi que l'étude de l'évolution spatio-temporelle des éléments physico-chimiques et la détermination du degré de pollution des eaux de surface.

## **Introduction**

---

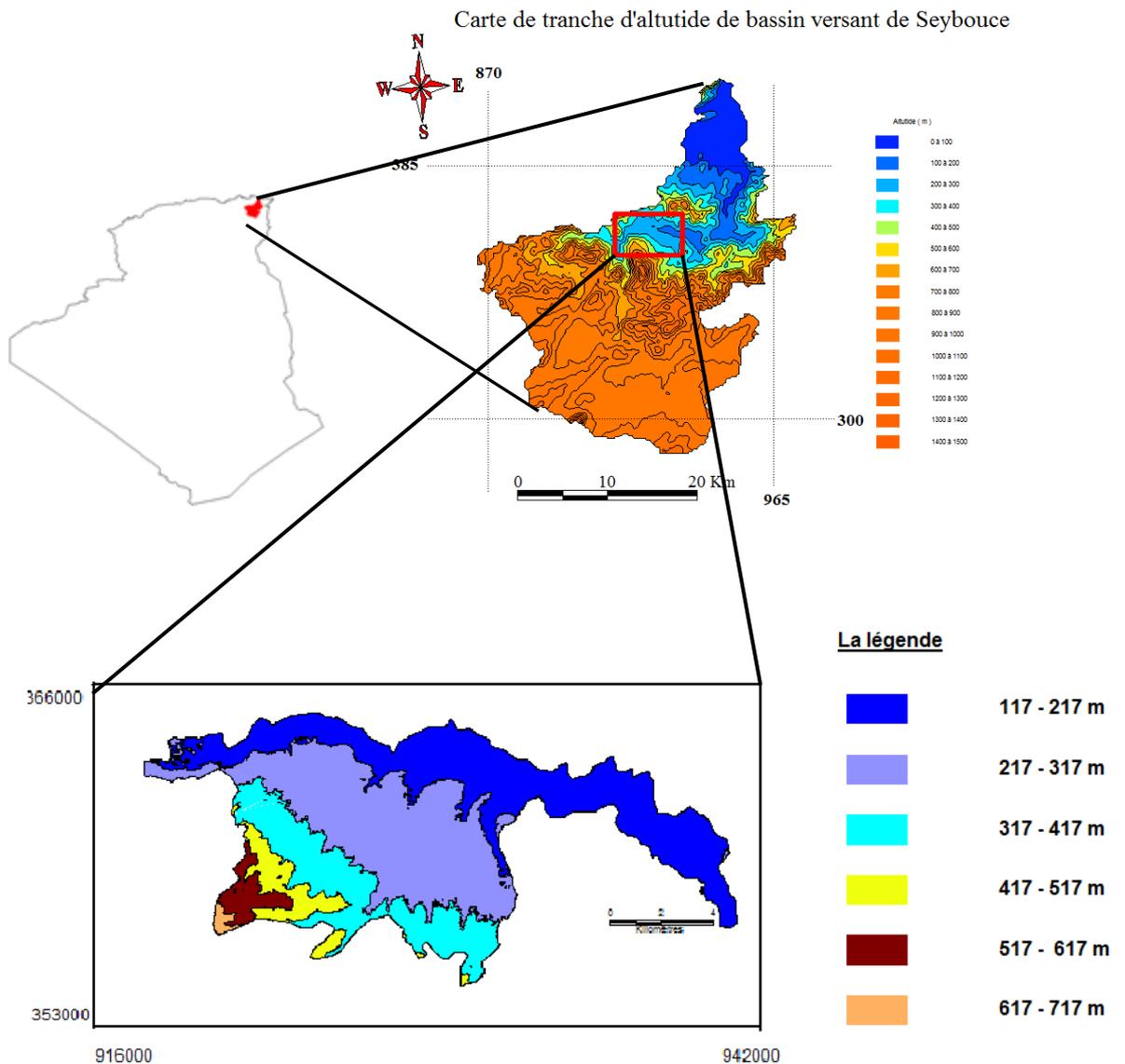
Le quatrième chapitre concerne l'étude hydrochimique des eaux souterraines de la nappe de la moyenne Seybouse, l'étude de l'origine des éléments majeurs et leur évolution spatiale en utilisant des cartes d'isoteneur et des graphes comparatifs, en utilisant une analyse statistique complète (descriptive et multivariable) des données hydrochimiques.

Le cinquième chapitre traite la modélisation hydrodynamique des écoulements dans l'aquifère plio-quadernaire. Il présente les résultats des simulations prévisionnelles de la piézométrie de la nappe selon divers scénarios de prélèvements.

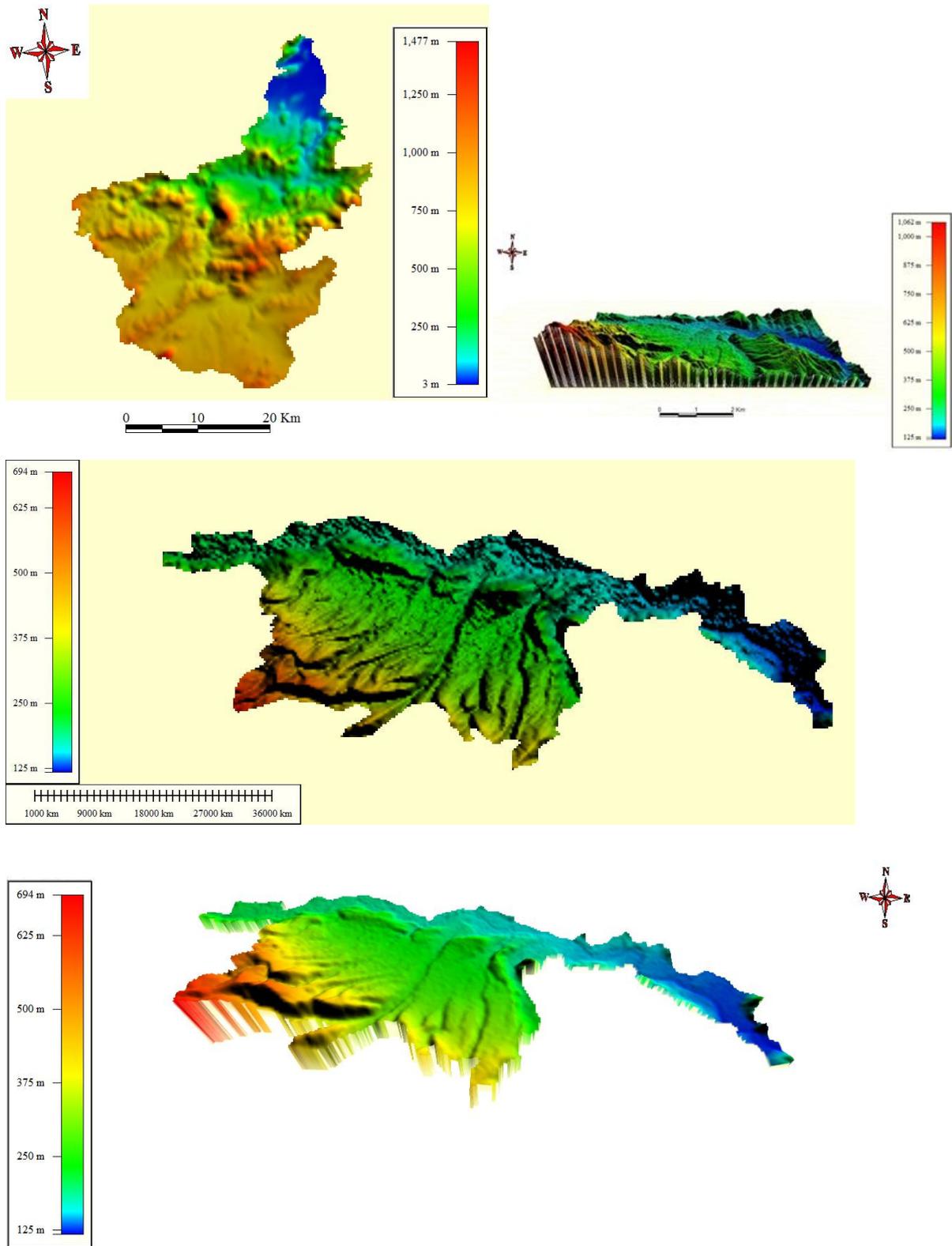
**I.1. Situation géographique**

La nappe alluviale de Guelma est une partie intégrante du bassin versant de l'Oued Seybouse. Elle fait partie de la moyenne Seybouse. Elle couvre une superficie de l'ordre de 122 km<sup>2</sup> avec environ 25 km d'Est en Ouest et entre 3 et 10 km de largeur. La plaine est limitée:

- au Nord par le massif de Houara et Djebel Bousba,
- au Sud par le massif de la Mahouna et de Beni marmis,
- à l'Ouest par le Djebel Arar et,
- à l'Est par le massif du Nador n'Bails.



**Figure 1.** Situation géographique de la nappe alluviale de Guelma dans le bassin versant de l'oued Seybouse avec les tranches d'altitude.



**Figure 2.** Modèle numérique de terrain(MNT) du bassin versant de Seybouse et de la nappe alluviale de Guelma en 2D et en 3D.

### I.1.2 Aspects sociaux économiques

La région de Guelma est une région agricole, connue par les cultures des céréales, de tomates, de pomme de terre et des agrumes. On signale aussi l'importance de l'élevage de bétail et de volailles.

L'activité industrielle est à ne pas négliger. Plusieurs unités industrielles ont été implantées, à titre d'exemple :

- La sucrerie,
- L'unité de céramique,
- La Sonacom (Fabrication des cycles et cyclomoteurs).
- La laiterie (dite La Guelmoise récemment installée)
- Unité de fabrication des pâtes.
- Conserverie de tomate industrielle.

En plus, il existe un nombre intéressant de mines et de carrières, comme celles du kaolin du djebel Debbagh et de marbre de l'unité de l'ENAMARBRE de Boumahra Ahmed).

#### I.2. Contexte climatologique

Pour la région d'étude, nous disposons des données climatiques de la station de Guelma (ONM) située à Belkheir, distante de 5 km de la ville de Guelma, dont les coordonnées sont représentées dans le tableau ci-dessous. Ces données ont servi à définir l'hydroclimatologie de la région..

**Tableau 1:** Caractéristiques géographiques et topographiques de la station de Guelma.

<i>Station de Guelma</i>	<i>Altitude</i>	<i>Longitude</i>	<i>Latitude</i>	<i>Période d'observation</i>
	227	7 ° 28 E	36° 28 N	1995 à 2008

#### I.2.1. Les précipitations

##### I.2.1.1. Répartition annuelle des précipitations

La variabilité interannuelle des précipitations est exprimée par le coefficient pluviométrique (CP) qui permet de déterminer les années excédentaires et celles des années déficitaires.

Le coefficient pluviométrique est calculé par la formule suivante :

$$CP = \frac{P}{\bar{P}}$$

Avec : P : Pluviométrie de l'année considérée en mm.

$\bar{P}$  : Pluviométrie moyenne pour la période d'étude.

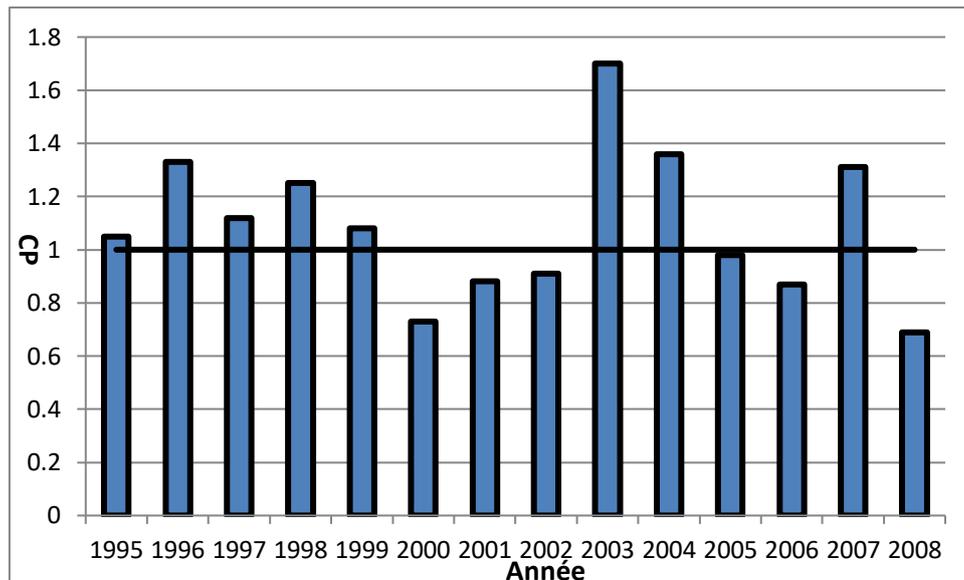
Nous avons deux cas : Si  $CP > 1 \Rightarrow$  année excédentaire

$CP < 1 \Rightarrow$  année déficitaire

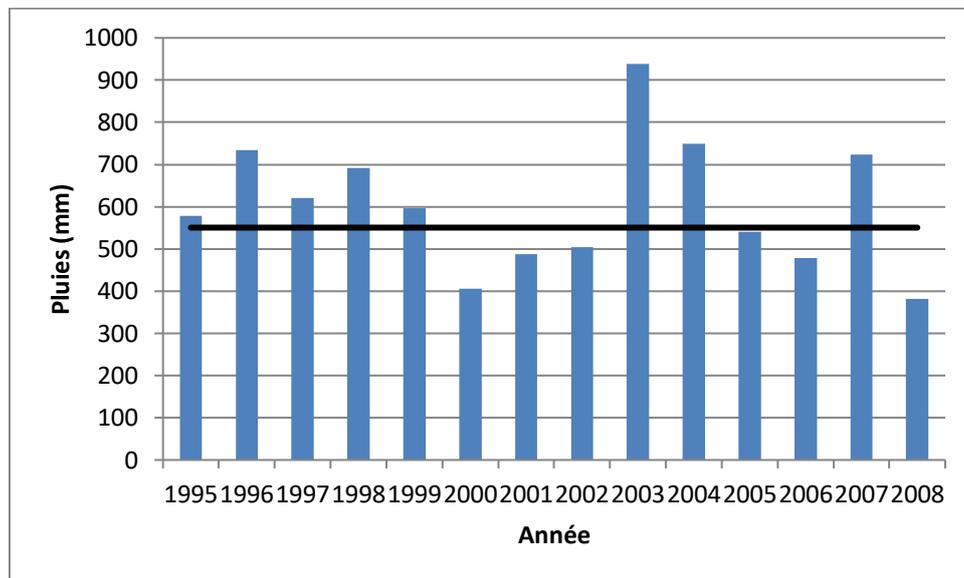
P.moyenne = 550.48mm

<i>Année</i>	<i>P (mm)</i>	<i>CP</i>	<i>Remarque</i>
1995	578.9	1.05	<i>An. Exc</i>
1996	734.8	1.33	<i>An. Exc</i>
1997	620.4	1.12	<i>An. Exc</i>
1998	691.6	1.25	<i>An. Exc</i>
1999	596.5	1.08	<i>An. Exc</i>
2000	405.3	0.73	<i>An. Défi</i>
2001	487.0	0.88	<i>An. Défi</i>
2002	503.8	0.91	<i>An. Défi</i>
2003	938.5	1.70	<i>An. Exc</i>
2004	748.9	1.36	<i>An. Exc</i>
2005	541	0.98	<i>An. Défi</i>
2006	478.3	0.87	<i>An. Défi</i>
2007	723	1.31	<i>An. Exc</i>
2008	381.8	0.69	<i>An. Défi</i>

**Tableau 2:** Précipitations annuelles à la station de Guelma de 1995 à 2008.



**Figure 3 :** Le coefficient pluviométrique à la station de Guelma (1995/2008)



**Figure 4:** Variabilité annuelle des précipitations à la station de Guelma.

**I.2.1.2. Répartition des précipitations mensuelles**

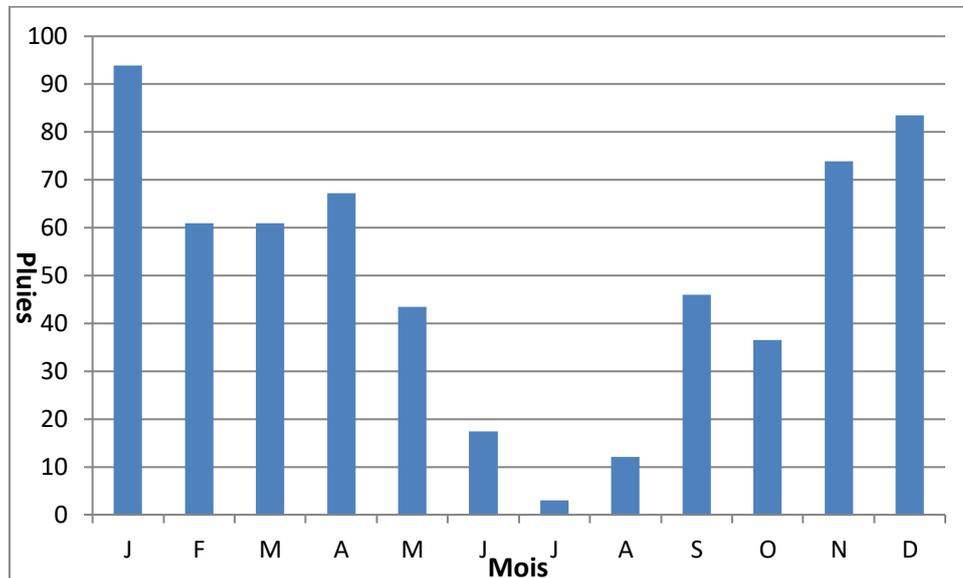
La répartition mensuelle des précipitations, au cours de l'année ainsi que leur variabilité conditionne le régime des cours d'eau et les fluctuations du niveau piézométrique des nappes phréatiques.

Le tableau ci-après montre cette variabilité sur une période de 14 ans.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
P (mm)	93.92	60.89	60.99	67.25	43.5	17.4	3.04	12.06	45.97	36.45	73.86	83.51

**Tableau 3 :** Précipitations moyennes mensuelles à la station de Guelma (1995/2008)

D'après la figure 4, la plus grande valeur des précipitations moyennes mensuelles, correspond au mois de Janvier, soit 93,92 mm, par contre la plus faible valeur correspond au mois de Juillet avec 3,04 mm.



**Figure 5.** Variabilité des précipitations moyennes mensuelles à la station de Guelma.

### I.2.1.3. Variabilité des précipitations mensuelles

**Tableau 4.** Variabilité des précipitations moyennes mensuelles à la station de Guelma (1995/2008).

Mois	Pluie moyenne (mm)	Ecart type	Coefficient de variation en %
J	93.92	<b>63.94</b>	70.65
F	60.89	51.87	88.40
M	60.99	51.65	83.43
A	67.25	47.70	72.90
M	43.5	35.65	85.90
J	17.4	22.88	85.05
J	3.04	<b>03.86</b>	136.49
A	12.06	14.71	131.74
S	45.97	27.66	126.59
O	36.45	29.54	84.09
N	73.86	55.89	78.52
D	83.51	50.40	62.63

Ce tableau montre que la saison hivernale est la plus pluvieuse avec une moyenne de 93,48 mm/mois et un pic au mois de janvier, ce qui produit une recharge de la nappe, par contre, l'été est sec avec une faible recharge de 3.04 mm/mois en Juillet, ce qui produira une

évaporation rapide de cette dernière. L'écart type entre les valeurs des précipitations mensuelles est plus important pendant le mois de janvier.

Le coefficient de variation mensuelle est supérieur à 100% pendant les mois de Juillet, Août et Septembre, traduisant une excessive dispersion due à une indigence pluviométrique. Pour le reste des mois de l'année, les valeurs du coefficient de variation sont pour la plupart supérieures à 70%, montrant une très forte dispersion.

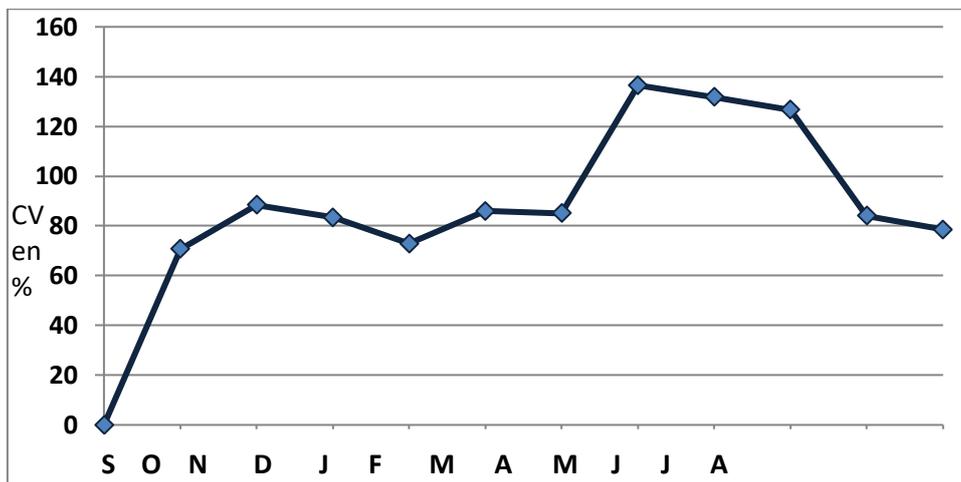


Figure 6. Le coefficient de variation à la station de Guelma (1995/2008)

I.2.2. Les températures

I.2.2.1 Les températures moyennes mensuelles

mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
températures moyennes en (°C)	9.66	10.14	11.52	15	19.56	24.3	27.10	27.35	23.42	19.86	14.25	10.92

Tableau 5 :Les températures moyennes mensuelles à la station de Guelma (1985/2008)

Les températures moyennes mensuelles les plus élevées sont observées essentiellement pendant l'été (Juin à Septembre) avec des températures variant de 24,3 à 23,42°C. Par contre les températures les plus basses, de 9.66 à 10.14°C, sont observées pendant la période d'hiver avec un minimum pendant le mois de janvier (9,66°C). Le mois le plus froid est le mois de Janvier (9,66°C); le mois d'Août est le plus chaud (27,35 ° C). L'écart entre le mois le plus chaud et le mois le plus froid est de 17,69 °C.

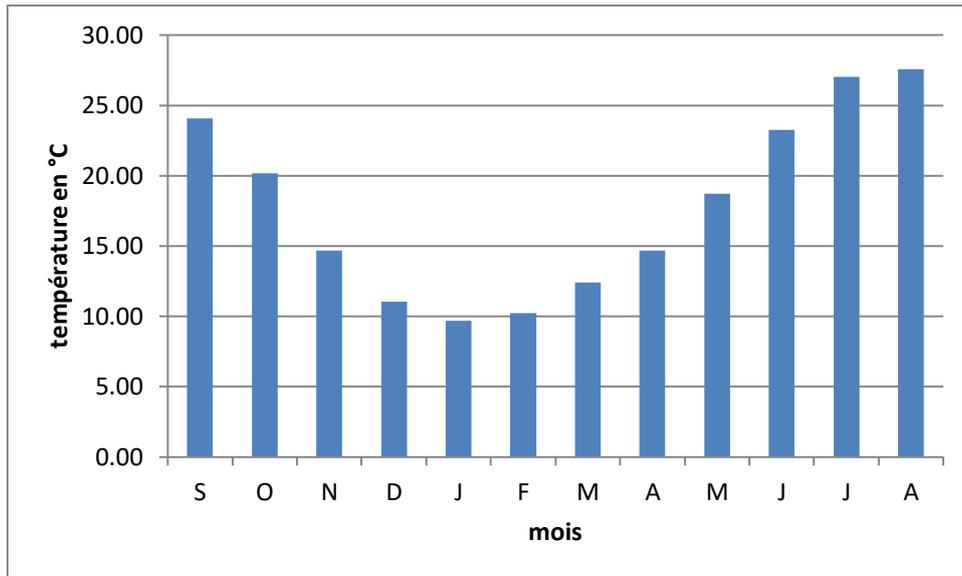


Figure 7. Températures moyennes mensuelles à la station de Guelma.

I.2.2.2. Variation des températures moyennes annuelles.

<i>Année</i>	<i>T (°C)</i>	<i>Année</i>	<i>T (°C)</i>
85/86	17,95	95/96	17,65
86/87	18,03	96/97	18,04
87/88	18,58	97/98	17,72
88/89	17,29	98/99	17,66
89/90	17,22	99/00	18,21
90/91	16,83	00/01	18,12
91/92	17,09	01/02	18,06
92/93	19,17	02/03	17,61
93/94	17,73	03/04	17,61
94/95	17,87	04/05	17,48
		05/06	18,41

Tableau 6. Températures moyennes annuelles à la station de Guelma (1985/86 - 2005/06).

Les températures moyennes annuelles sont assez proches et varient entre 17 et 19 °C.

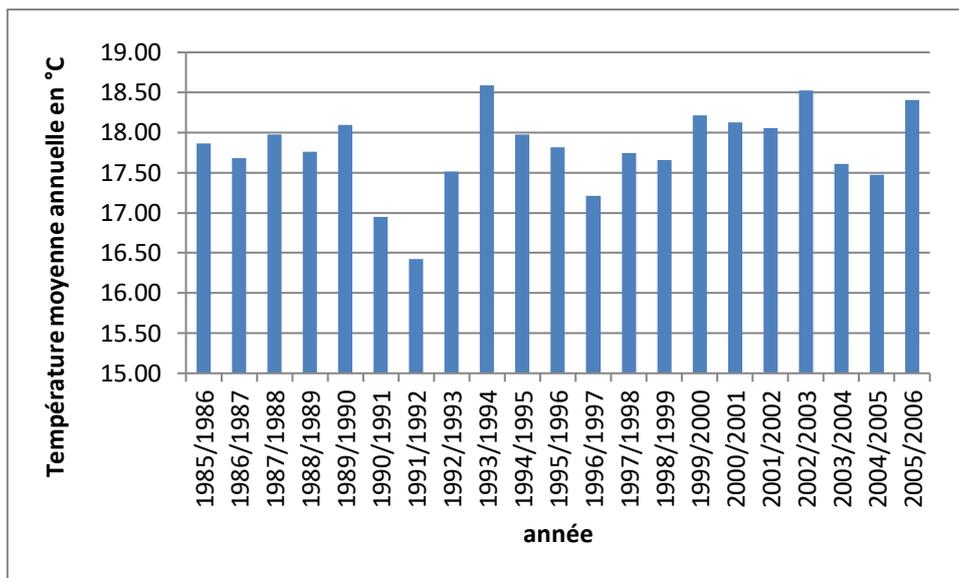


Figure 8. Variation des températures moyennes annuelles à la station de Guelma.

### I.2.2.3 Les extrêmes mensuels moyens

Les températures extrêmes ainsi que la moyenne des maxima et des minima sont représentées dans le tableau 7.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
T°max M	26,3	22,8	16,2	18	14,2	12,12	15,8	17,4	21,5	26,6	29,7	30,6
T°min (m)	21,4	17,1	12,6	7,3	7,3	8,5	10,9	11,9	14,7	21,6	24,2	25,4
T.moyM+m/2	23,85	19,95	14,4	12,65	10,75	10,31	13,55	14,65	18,1	24,1	26,95	28

Tableau 7. Les extrêmes mensuels moyens à la station de Guelma

La plus forte valeur est observée pendant le mois d’Août (30,6°), le minimum des minima est de 7,3°C correspondant au deux mois de Décembre et Janvier.

### I.2.3 Diagramme pluviothermique

D’après le diagramme pluviothermique, on distingue deux périodes, une période humide qui commence du début du mois d’Octobre et s’étale jusqu’au mois de Mai et qui dure huit mois, alors que l’autre période est sèche et débute à la fin du mois de Mai et se termine en Septembre.

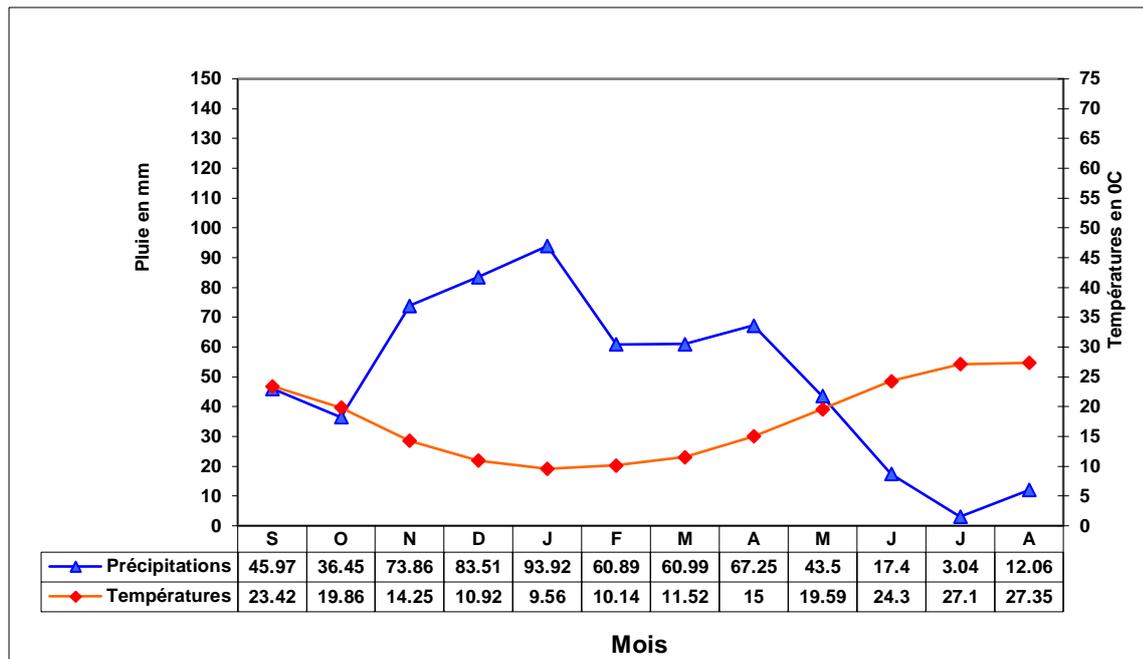


Figure 9. Diagramme pluviothermique à la station de Guelma.

### I.2.4 L'ensoleillement et l'humidité relative de l'air

- Les heures d'ensoleillement augmentent en été pour décroître en hiver avec une durée moyenne annuelle de l'ordre de 2360 heures. Le mois le plus ensoleillé est le mois de Juillet avec 353 heures de soleil. Le mois de Décembre est le moins ensoleillé avec seulement 147 heures.
- Les moyennes mensuelles de l'humidité relative de l'air ne descendent guère au-dessous de 50%. L'humidité relative est en générale plus élevée pendant les mois les plus chauds ; en Juillet et Août.

Mois paramètre	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Ensoleillement (heure)	243,8	223	161,5	147,5	160,9	182,9	225,1	241,1	275,5	307,5	353	310,2
Humidité relative (%)	66,7	68,3	72,8	75	74,5	75,7	73	71,9	68,3	60,5	55,3	56,4

Tableau 8. Variations moyennes mensuelles de l'ensoleillement et de l'humidité relative de l'air à la station de Guelma (1995/2004).

### I.2.5. Les vents

Dans la région de Guelma, les données traitées sur des moyennes de 25 ans, sont tirées de l'étude de SELTZER qui montre que les vents dominants sont de direction :

- Nord – Ouest avec une moyenne de 23,77 %, ils atteignent leur maximum au mois de juillet avec 10,36%.

- A l'inverse, les vents Nord –Est sont plus fréquents au mois de Juillet avec 32% au maximum, ils représentent 18,7 % des relevés annuels.

### I.2.5.1 Fréquences annuelles du vent

Les fréquences annuelles du vent à la station de Guelma sont représentées dans le tableau 10.

Classes	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
1-5m/s	9,1	3,6	3,2	2,6	2,8	1,4	3,6	8,0
6-10m/s	2,5	0,7	0,3	0,2	0,6	0,5	1,9	3,2
11-15m/s	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1
> 16m/s	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Nombre de vents calmes : 16 102

**Tableau 9.** Fréquences annuelles du vent à la station de Guelma (1995/2004)

## I.3. Le bilan hydrique

### I.3.1 Calcul de l'évapotranspiration réelle

#### I.3.1.1 Calcul de l'évapotranspiration réelle par la méthode de C.W.Thornthwaite

#### Bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite

Cette méthode permet de calculer le bilan de l'eau à l'échelle d'un bassin versant. Elle est utilisée notamment dans des régions caractérisées par des climats sub-humides et semi-arides. Elle est basée sur la notion de la réserve d'eau facilement utilisable (RFU). On admet, pour la région étudiée, que la hauteur d'eau maximale stockée dans le sol sera égale à 100 mm. Cette eau sera reprise ultérieurement par l'évapotranspiration.

- La méthode de Thornthwaite utilise les données de base du bilan de l'eau, à savoir précipitation et température, pour calculer l'évapotranspiration potentielle selon la relation suivante :

$$ETP(mm) = 16 \left( \frac{10.T}{I} \right)^a .K \text{ avec :}$$

$$I = \sum i = \sum \left( \frac{T}{5} \right)^{1.514} \text{ et } a = 0.016.I + 0.5$$

- $i$  et  $T$ : indice et température moyenne mensuelles.
- $K$  : coefficient de correction, fonction de la latitude et du mois. Ce coefficient est lu à partir de la table de Thornthwaite. Pour la zone étudiée, la latitude est voisine de 36 degrés Nord.
- Le principe de calcul du bilan hydrologique de Thornthwaite est le suivant :
  - Si pour un mois  $P \geq ETP$ , on pose  $ETR = ETP$  et la quantité d'eau qui reste ( $P - ETR$ ) va alimenter la RFU jusqu'à son maximum. Si la RFU dépasse sa valeur maximale, il y aura un excès ( $EXC$  ou  $Peff$ ) qui va partir soit sous forme d'infiltration efficace vers la nappe, soit sous forme de ruissellement.
  - Si  $P < ETP$ , la valeur de  $ETR = P + RFU$ , jusqu'à égalisation avec  $ETP$ . Si la RFU est nulle, il va se produire un déficit agricole  $Da = ETP - ETR$ , ce dernier paramètre représente alors les besoins des cultures à l'irrigation.

Les coefficients mensuels de correction et l'évapotranspiration potentielle corrigée calculée pour la période 1985-2006 sont mentionnés dans le tableau suivant.

paramètre mois	T (°C)	i	K	ETPC	Pluies (mm)	BH	CH	VR	RFU	ETPR	Def	Exc
<b>S</b>	23.42	10.4	1.05	110.1	45.97	-64.2	-0.6	0.0	0.0	46.0	64.2	0.0
<b>O</b>	19.9	8.1	0.91	70.1	36.45	-33.6	-0.5	0.0	0.0	36.5	33.6	0.0
<b>N</b>	14.3	4.9	0.95	39.3	73.86	34.6	0.9	34.6	34.6	39.3	0.0	0.0
<b>D</b>	10.9	3.3	0.70	17.6	83.51	65.9	3.8	65.4	100.0	17.6	0.0	0.5
<b>J</b>	9.56	2.7	0.73	14.3	93.92	79.6	5.6	0.0	100.0	14.3	0.0	79.6
<b>F</b>	10.1	2.9	0.78	17.0	60.89	43.8	2.6	0.0	100.0	17.0	0.0	43.8
<b>M</b>	11.5	3.5	1.02	28.3	60.99	32.7	1.2	0.0	100.0	28.3	0.0	32.7
<b>A</b>	15	5.3	1.15	52.3	67.25	14.9	0.3	0.0	100.0	52.3	0.0	14.9
<b>M</b>	19.6	7.9	1.32	99.1	43.5	-55.6	-0.6	-55.6	44.4	99.1	0.0	0.0
<b>J</b>	24.3	11.0	1.33	149.5	17.4	-132.1	-0.9	-44.4	0.0	61.8	87.7	0.0
<b>J</b>	27.1	12.9	1.33	183.4	3.04	-180.3	-1.0	0.0	0.0	3.0	180.3	0.0
<b>A</b>	27.4	13.1	1.34	188.0	12.06	-175.9	-0.9	0.0	0.0	12.1	175.9	0.0
<b>Annuel</b>	<b>17.8</b>	<b>85.9</b>		<b>968.9</b>	<b>598.8</b>	<b>-370.1</b>				<b>427.3</b>	<b>541.7</b>	<b>171.6</b>

**Tableau 10.** Le bilan hydrologique selon la méthode de C.W Thornthwaite à la station de Guelma (1995/2008)

L'analyse des résultats du bilan hydrique, nous permet de faire les constatations suivantes :

- L'ETR représente 71.36 % des précipitations ; le déficit agricole commence à partir du mois d'Octobre avec un maximum au mois de Juillet (180.3 mm).
- La reconstitution de la réserve utile commence en Novembre et s'épuise au mois de Juin.
- L'écoulement se produit après que la RFU soit satisfaite (RFU=100 mm), il dure cinq mois du mois de Décembre jusqu'à fin Avril avec un maximum au mois de Janvier (79,6 mm).

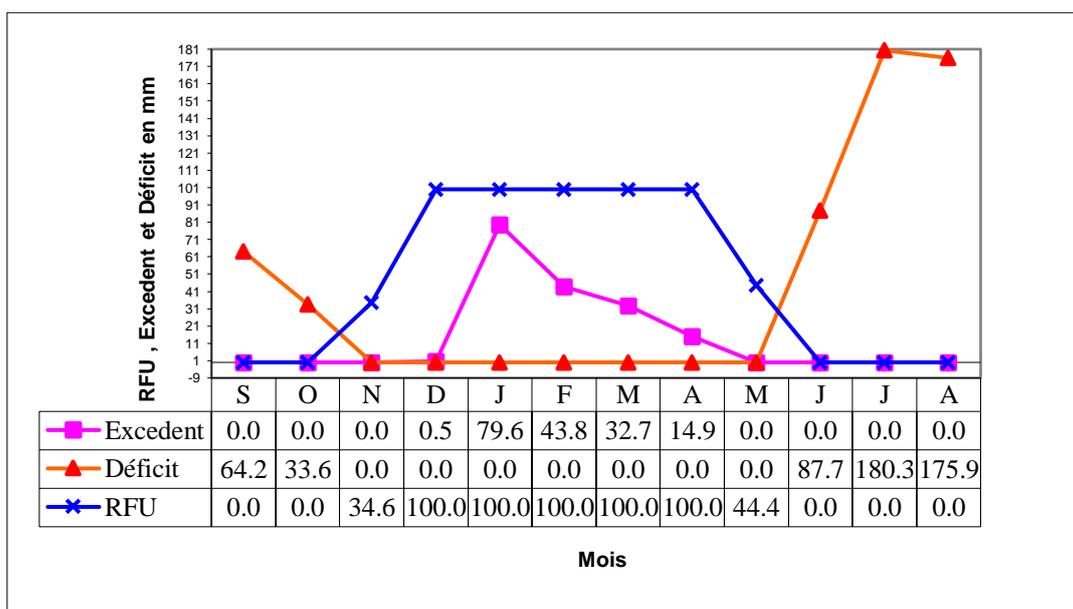
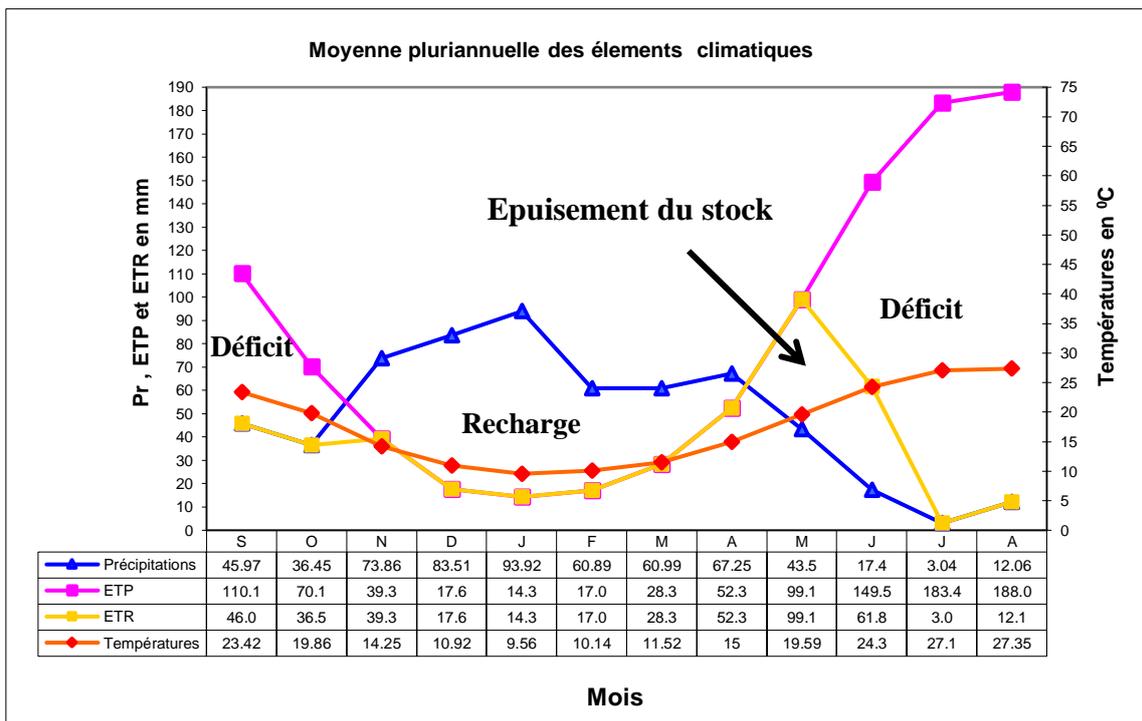


Figure 10. Représentation graphique du bilan de Thornthwaite

Ces graphes montrent que l'évapotranspiration maximale est observée pendant les mois de juillet et août avec des valeurs de 183.4 et 188 mm respectivement, ce qui produit un déficit agricole et nécessite une irrigation pour les zones des cultures. Par contre, pendant les mois de novembre, décembre, janvier, février, mars, et avril, on observe une recharge de la nappe.

### I.3.1.2 Calcul de l'évapotranspiration réelle par la formule de Turc

$$ETR = P / [0,9 + (P^2/L^2)]^{1/2}$$

Avec : P : précipitation moyenne annuelle en mm = 598.8 mm

L : pouvoir évaporant

$$L = 0,05T^3 + 25 T + 300$$

T : température moyenne annuelle en °C = 17,8 °C

Donc ETR = 389.6mm.

- La formule de Tixeront-Berckaloff, pour les pluies qui sont inférieures à 600 mm,

est la suivante: 
$$R = \frac{P^3}{3ETP^2}$$

D'où: R= 76,26 mm/an = 12, 73%

I= 95.24 mm/an = 15.9 %

## I.4.Contexte géologique et structural

### I.4.1. Orographie et géomorphologie

Le bassin de Guelma est un ancien bassin d'effondrement longtemps fermé, où s'est entassé un ensemble varié de sédiments allant du Miocène au Quaternaire. Les mouvements tectoniques du Plio-Quaternaire ont joué un rôle prépondérant dans la morphogenèse de la région. En effet, au cours de cette période se sont produits de petits soulèvements donnant naissance à des terrasses et des cônes de déjection. L'extension de ces terrasses fluviales et leur discontinuité le long de la Seybouse témoignent de la complexité morphogénétique et tectonique du bassin.

Du point de vue morphométrique, le domaine étudié est constitué d'une plaine de faible altitude (environ 150 m à l'Est, et 300 m à l'Ouest). Il appartient à

la moyenne Seybouse qui englobe dans sa partie Ouest le sous bassin de Bouhamdene qui est caractérisé par un fort relief (indice de pente  $i = 175 \text{ m/Km}$ ). La partie Est est occupée par le sous bassin de Mellah caractérisé, lui aussi, par un indice de pente plus fort ( $i = 240 \text{ m/Km}$ ). Ce qui explique l'aspect collinaire très remarquable.

A l'axe de cette plaine se trace la Seybouse qui prend naissance à l'Ouest de la ville de Guelma au lieu dit Medjez Ammar où se rencontrent les deux affluents de la Seybouse : les oueds Charef et Bouhamdene.

Le sens de l'écoulement de la Seybouse est d'Ouest en Est. La région, dite de Nador, est considérée comme étant l'exutoire du sous bassin versant.

Cette vallée est alimentée par un dense réseau hydrographique localisé le long des axes des principaux plissements dans les couches marneuses facilement érodées. D'autres affluents suivent le sens des failles affectant les formations mio-pliocènes.

Il s'agit d'un grand nombre d'oueds et de chaabats qui coulent tantôt vers le Nord tantôt vers le Sud, parmi lesquelles on cite :

O. Skhoune, O. El Maiz, O. Zimba, O. Meklouka, O. Boussora, du côté sud, et Bradaa, El Bridi, Errachaha, Ellihoudia, El Ma Labiod du côté nord.

Aux pieds du djebel Zemzouma, du côté Est, un grand nombre de sources se manifeste à la rencontre de la formation gréseuse avec les terrains marneux imperméables.

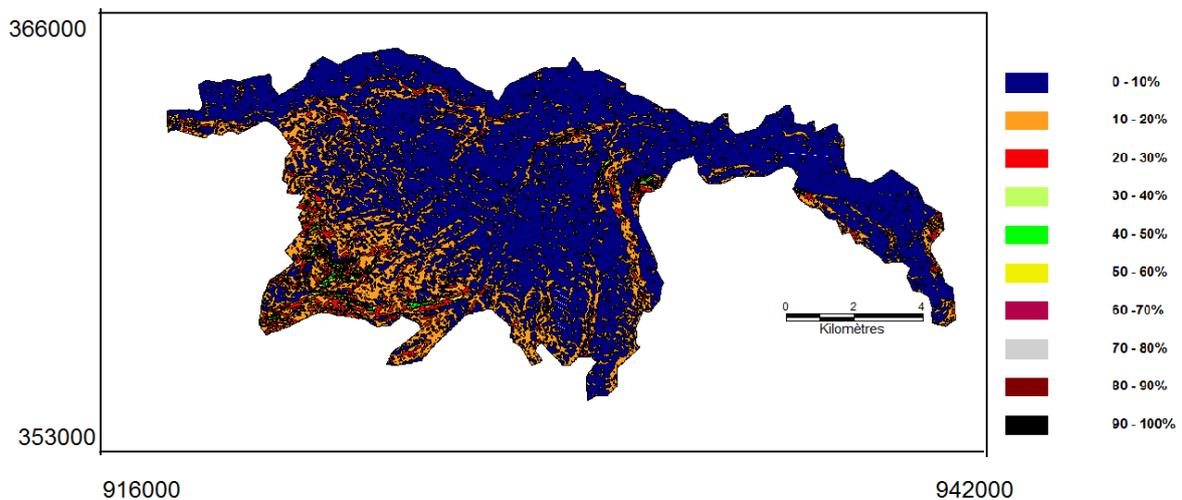
L'orographie de la région d'étude est formée en ligne générale de reliefs montagneux et collinaires constituant l'extrémité orientale de la chaîne des monts de Constantine et des contreforts occidentaux de la chaîne de la Medjerda. Ces deux contreforts sont traversés par des vallées profondes où courent les affluents droits et gauches de la Seybouse. Tous les cours d'eau ont un caractère torrentiel.

Les altitudes les plus élevées que l'on rencontre dans la région de Guelma sont Djebel Mahouna (1411m) et Ras El Alia (1317m).

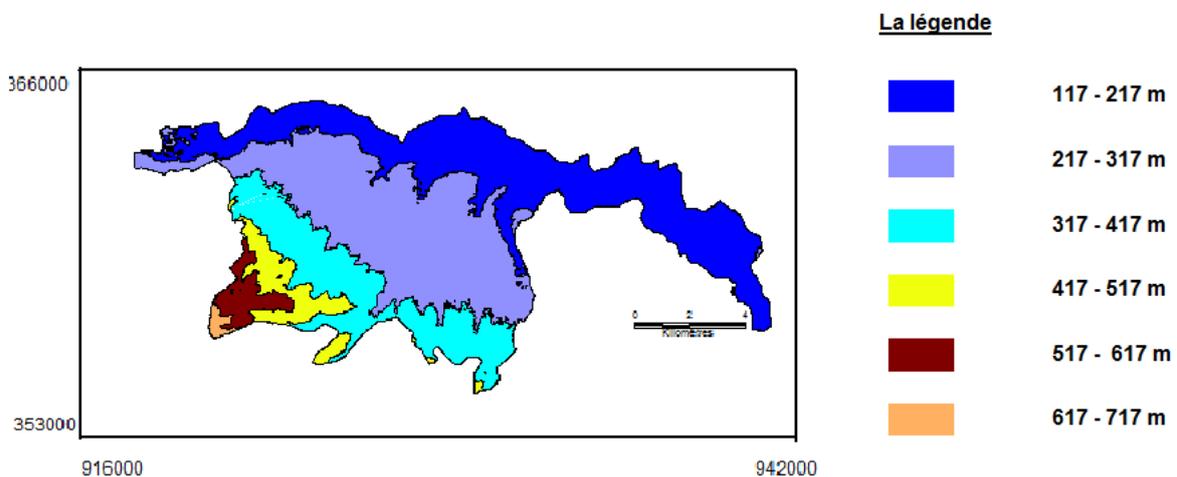
Dans la partie Sud, les altitudes varient de 1400m à 100m.

#### I.4.1.1 Répartition des pentes et des altitudes dans la nappe alluviale de la moyenne Seybouse.

La plaine creusée par la Seybouse offre des pentes généralement peu accentuées, qui ne dépasse pas les 10% pour la plupart de la superficie (**Fig. 11**). Ces pentes sont plus douces pour les versants exposés au Sud. Son fond est plat et présente une faible pente longitudinale et transversale. Elle est surmontée de terrasses qui s'élèvent à des altitudes diverses, qui augmentent du Nord au Sud (**Fig. 12**).



**Figure 11.** Carte des pentes de la nappe alluviale de la moyenne Seybouse



**Figure 12.** Carte des tranches d'altitude de la nappe alluviale de la moyenne Seybouse

Les reliefs qui surplombent immédiatement la plaine sont dans leur ensemble de pentes moyennes à sommets arrondies à l'exception des affleurements calcaires qui donnent lieu à des pentes plus raides et escarpées (Fig. 11), au vu de leur plus grande résistance à l'érosion

## **I.4.2. Géologie et stratigraphie**

### **I.4.2.1. Le primaire**

Les terrains primaires ne présentent pas beaucoup d'affleurements, ils sont réduits et se trouvent au Nord du massif de Nador N'Bails à l'entrée des gorges de l'Oued Seybouse.

Ces affleurements sont formés par des schistes satinés alternants avec des petits bancs de grés.

### **I.4.2.2. Le trias**

Le trias se localise uniquement à l'extrémité est de la plaine alluviale. Il est formé d'argiles bariolées injectées de gypse, cargneules et de bancs disloqués de calcaires dolomitiques sombres.

### **I.4.2.3. Le Néritique**

Caractérisé par un faciès jurassique – crétacé plus ou moins karstifié. Il est surmonté par plusieurs nappes de charriages et impliqué dans les grands accidents. Il apparaît aussi sous forme de fenêtre à Djebel Mahouna, Djebel Debagh, Nador et plus à l'Ouest à Djebel Taya.

### **I.4.2.4. Le jurassique**

Il est représenté par des dolomies noires avec des schistes calcaireux de faibles épaisseurs dans la région de Djebel Debagh.

### **I.4.2.5. Le Crétacé**

Le Crétacé inférieur est représenté par des calcaires massifs ou lissées et de dolomies à algues d'âge aptien, on le rencontre à Hamam Bredaa et Djebel Debagh.

Les calcaires massifs à microbrèches calcarinites avec des niveaux calcaires à chailles indiquent nettement le faciès néritique du Compagnien – Mæstrichtien (Vila 1972).

Le Crétacé supérieur est caractérisé par des niveaux calcaireux dolomitiques riches en orbitolines et des débris à Rudiste datant le Cénomaniens – Vraconien et d'épaisseur limitée.

### **I.4.2.6. L'unité tellienne**

Elle appartient au domaine externe de la chaîne des Maghrébides dans le Nord – Est Algérien. Cette unité correspond au domaine Tellien externe qui est constitué de formations paléogènes, où l'on distingue:

- un ensemble méridional à Nummulite et au Sud à Globigérines ;
- un ensemble médian à sédimentation profonde ;
- un ensemble septentrional à matériau Eocène.

La série débute par des marnes noires paléocènes et atteint le Lutécien inférieur avec une faune riche en nummulites.

#### **I.4.2.7. L'unité ultra – tellienne**

Le faciès dominant est celui des marnes et marno calcaires avec des barres de micrites à microfaunes variées.

La stratigraphie est la suivante de bas en haut:

- marnes à ammonites (barrémien – albien)
- marnes à micrites vertes (campaniens)
- marnes grises (maastrichtien)

A Djeballa Khemissi, cette unité est caractérisée par des formations crétacées de faibles épaisseurs.

#### **I.4.2.8. Le Numidien**

Il forme les principaux reliefs de la région de Guelma (Mahouna, Houara).

Il est caractérisé par un flysch gréseux constitué par les trois termes suivants:

- épaisseur d'argile verte et rouge d'âge oligocène
- alternance d'argile et de gros blocs de grès souvent hétérométriques d'âge aquitanien
- argile, silicites et marnes correspondants au Burdigalien inférieur.

A Hammam Debagh, le sommet est représenté par des grès grossiers à dragées de quartz.

#### **I.4.2.9. Le post – nappe**

##### **I.4.2.9.1. Le Mio-Pliocène**

Représenté au niveau du bassin de Guelma par des marnes à gypse, argiles et conglomérats rouges. Ils sont considérés comme des formations post – nappe, où on y voit succéder deux cycles:

- La molasse de Guelma visible sur la route Guelma-Bensmih, composée de grès jaunes friables, intercalés avec des formations argilo–marneuses grises ou jaunes parfois gypseuses.
- Le second cycle, formé par une succession d'argiles de conglomérats rouges, argiles grises à gypses et à soufre et des calcaires lacustres.

##### **I.4.2.10. Le Quaternaire**

Cette formation et celle du Pliocène constituent le réservoir de la nappe aquifère de Guelma.

Le Quaternaire occupe le centre du bassin et correspond au faciès de terrasses où l'on distingue:

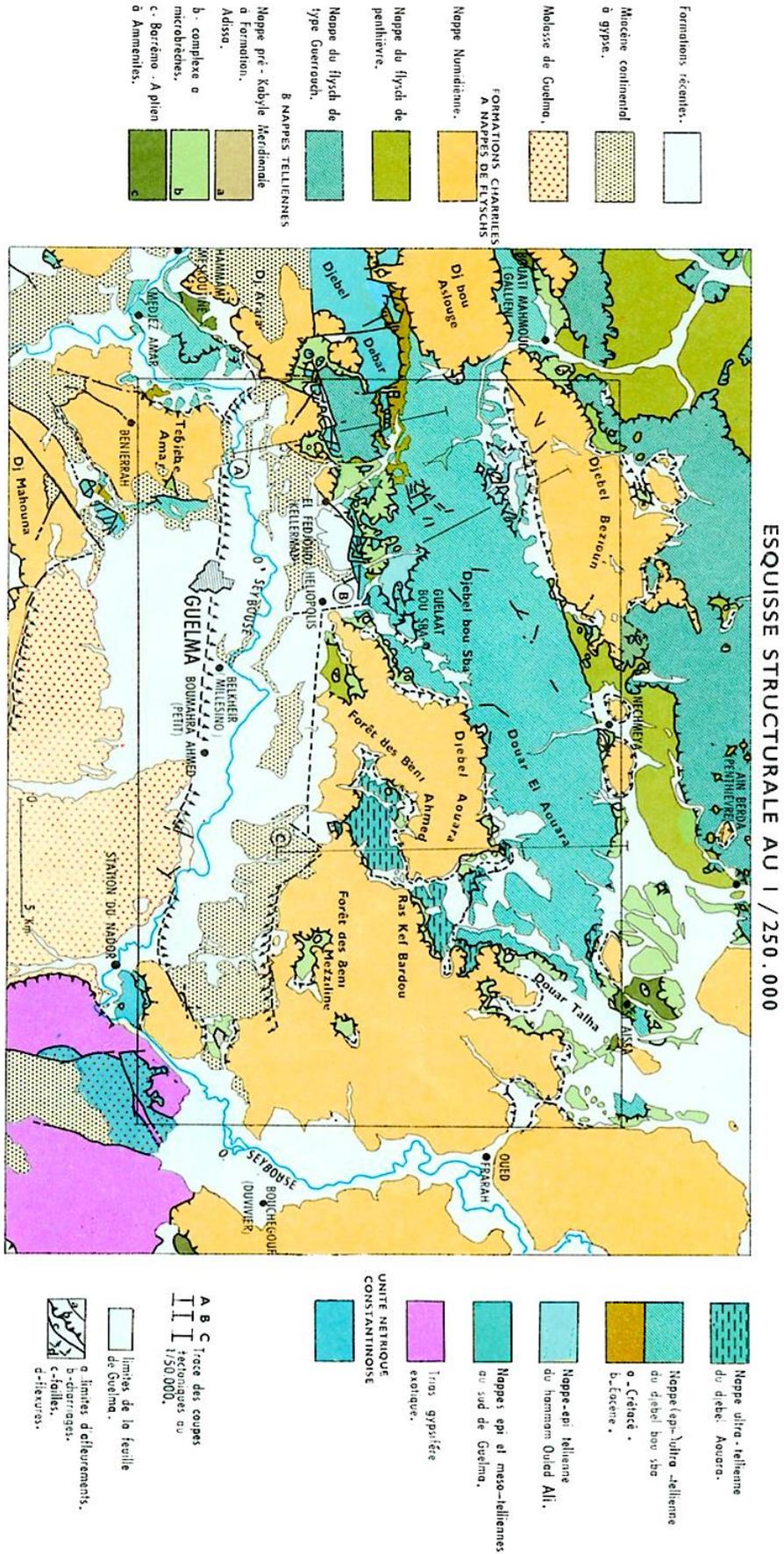
##### **a. Les alluvions anciennes**

Ce sont des éboulis mélangés parfois à des argiles numidiennes. Elles sont localisées tout le long du versant ouest du bassin.

Les terrasses d'alluvions anciennes dominant d'environ 55 m à 60 m le thalweg de la Seybouse, s'écarte pour former la grande plaine qui s'étend à l'Est de Guelma, et se rattache vers le Sud à la terrasse pliocène qui atteint des altitudes allant de 90 m à 100 m au dessus de la Seybouse. Cette dernière comprend tantôt des limons avec cailloux roulés, tantôt des conglomérats intercalés de bancs marno – calcaires légèrement travertineux.

***b. Les alluvions récentes***

Les alluvions récentes forment la majeure partie de la vallée principale actuelle de l'Oued Seybouse. Ce sont des cailloutis, galets et graviers calcaires parfois à ciment marneux.



**Figure 13.** Carte géologique de la région de Guelma (J.M.Vila)  
Extraite de la carte de géologie de Guelma (J.M.Vila)

### I.5. Tectonique

L'histoire géologique et les principales phases tectoniques de la région se résument ainsi:

La mer peu profonde au Trias, s'approfondit considérablement au Lias qui prend un caractère bathyal. Le Dogger et le Malm n'affleurent pas, soit parce qu'ils ont été érodés, soit parce qu'ils sont masqués par les amas gypso – salins du Trias.

Par contre au Crétacé, et exactement à son début, nous retrouvons une mer peu profonde qui s'approfondit au Barrémien pour former un géosynclinal. Elle s'étend en transgression vers le Sud tout en diminuant de profondeur et atteint son extension maximum au Sénonien.

Au Damien, une régression générale se produit et l'Eocène inférieur et moyen est masqué par une mer peu profonde avec des seuils et des hauts fonds. Le Crétacé et l'Eocène sont en continuité stratigraphique.

A la fin de l'Eocène moyen se produisent des mouvements de compression interne, refoulant les plis en direction du Sud, les transformant en plis déversés, épilés ou même en écailles imbriquées.

La direction générale du plissement Est – Ouest ou plus généralement Sud – Ouest, Nord – Est. A la même période les plissements de direction nord – sud, déjà ébranchés au Primaire et au Secondaire, se mettent à rejouer donnant lieu à des plis posthumes de direction nord – sud moins accentués que les autres.

Sur cette région, plissée et déjà érodée, revient une mer peu profonde d'où émergent quelques îlots crétacés et éocènes et où se dépose le flysch numidien.

Une phase orogénique à la fin de l'Oligocène plissera cette dernière formation et la charriera sur les précédentes.

Le Miocène moyen et supérieur, représentés par des sédiments lagunaires, lacustres et fluvio – continentaux, se sont déposés dans la dépression de Guelma, à la suite de mouvements orogéniques.

Le Miocène supérieur, formé de marnes sulfo – gypseuses, surmonté d'une assise de limons rouges gréseuse et de conglomérats, repose en transgression vers le Nord, par rapport au Miocène, sur le crétacé et le flysch gréseux.

A la suite des mouvements orogéniques post miocène, les travertins de Guelma se sont déposés au Pliocène et reposent en discordance sur les différentes assises redressées de la série miocène lacustres.

Les plissements les plus prononcés paraissent orientés suivant la direction Est–Ouest ou parfois légèrement infléchis Sud–Ouest, Nord–Est, toutefois un pli sensiblement dirigé Nord –

Sud semble avoir recoupé les plis précédents, il est jalonné par des affleurements de deux bombements anticlinaux du Barrémien.

Ensuite se produit une série de remblaiement et creusement de la vallée et du bassin de Guelma en relation avec les variations du niveau de l'Oued et de la mer.

### **I.6. Synthèse géologique**

En se basant sur la description géologique des terrains ainsi que les caractéristiques hydrogéologiques de chaque formation, on a pu établir le tableau 12 ci-dessous, qui synthétise et combine les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques de chaque étage.

Le couplage des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques des formations de la région a permis de distinguer un ensemble du remplissage plio-quadernaire, capable de constituer deux réservoirs d'eau :

- le réservoir de la nappe superficielle, représenté par des alluvions, constituées essentiellement par des sables, cailloutis, galets, limons et conglomérats ;
- le réservoir de la nappe des hautes terrasses, représenté par des galets, conglomérats, limons et sable.

**Tableau 11.** Description géologique et hydrogéologique des formations de la région d'étude.

Ere	Système	Lithologie	Epaisseur (m)	<i>Intérêt hydrogéologique</i>	
				perméabilité	type de nappe
Quaternaire	récent	-Alluvions actuelles : galets, calcaires, limons, travertins  -Alluvions anciennes : *Basse terrasse : sables, cailloutis, limons. * Moyenne terrasse : sables, cailloutis, galets, limons, conglomérats. *Haute terrasse : galets, conglomérats, limons. sables	15  30 - 50  100  - - - - -	perméable	*nappe de la basse terrasse  *nappe de la moyenne terrasse  *nappe de la haute terrasse
	ancien	tufs calcaires			
Tertiaire	Mio-Pliocène	argile à gypse		impermeable	substratum
	Pliocène	Travertins	-	perméable	nappe des travertins
Secondaire	Crétacé	calcaire massifs, dolomies	-	impermeable à perméable	-
	Jurassique- Crétacé	Karst	-	perméable	nappe des karsts
	Jurassique	dolomies, schistes calcareuses	-	impermeable	-
	Trias	argile à gypse	-	perméable	-
Primaire		shistes et grès	- -	impermeable à perméable	-

## I.6 Conclusion

La nappe alluviale de Guelma est une partie intégrante de la moyenne Seybouse qui fait partie du bassin versant de l'Oued Seybouse. Elle couvre une superficie de l'ordre de 122 km<sup>2</sup> avec environ 25 km d'Est en Ouest et entre 3 et 10 km de largeur.

Les contextes physique, climatique et géologique permettent de dégager les caractéristiques suivantes :

L'examen de la géologie a permis la détermination des surfaces occupées par la couverture quaternaire et celles où dominent les autres formations détritiques du Mio-Pliocène. L'ensemble est situé dans un cadre régional complexe marqué par la superposition de plusieurs nappes de charriage de la chaîne alpine.

Ce bassin est caractérisé par la présence d'une des plus grandes rivières de l'Algérie (oued Seybouse) qui coule d'Ouest en Est tout en étant en relation hydrodynamique avec la nappe alluviale tout le long de son parcours.

Le climat de la région est semi-aride tempéré, caractérisé par deux saisons : la première humide et froide (d'octobre à mai), la deuxième est sèche et chaude (de juin à décembre).

La précipitation moyenne annuelle est de 598.8 mm/an, l'évapotranspiration réelle est de 427.3 mm/an présentant 71.36 % des pluies. La région révèle un déficit agricole de 541.7 mm/an qu'il faudrait combler avec l'irrigation. Le déficit agricole commence à partir du mois d'Octobre avec un maximum au mois de Juillet (180.3 mm).

La reconstitution de la réserve utile commence en Novembre et s'épuise au mois de Juin. L'écoulement se produit après que la RFU soit satisfaite (RFU=100 mm), il dure cinq mois du mois de Décembre jusqu'à fin Avril avec un maximum au mois de Janvier (79,6 mm).

La cuvette de Guelma se localise dans un contexte structural complexe, elle est entourée par des diverses nappes d'origine différente et histoire paléogéographique distincte formant les hauteurs des différentes montagnes.

La géologie de la région est caractérisée par des formations allant du Quaternaire au Trias, présentant ainsi une lithologie très variée et qui comprend

essentiellement : les alluvions (sable, gravier, cailloutis...), les grès, les marnes, les argiles, les flyschs et les calcaires

La dépression qui forme le réservoir aquifère de la vallée de Guelma est remplie par les alluvions plio-quadernaires. Ce remplissage constitue l'ancienne et l'actuelle terrasse de la vallée de la Seybouse.

La naissance de cet édifice est le résultat d'un enchaînement de différentes phases tectoniques accompagnées de plusieurs stades de régression et de transgression de la mer qui ont affecté la région.

## **Chapitre II Etude hydrogéologique**

### **II.1 Géométrie et hydrodynamique de la nappe alluviale de Guelma (la moyenne Seybouse)**

#### **II.1.1 Structure et géométrie de la nappe alluviale de Guelma**

La modélisation des nappes aquifères et l'étude de transfert de pollution, passe premièrement par la reconnaissance de la géométrie et de la structure de la nappe aquifère, ainsi que l'identification de ses différents ensembles hydrogéologiques.

##### **II.1.1.1 Les unités aquifères**

Trois unités différentes par leur lithologie et leur stratigraphie constituent la nappe alluviale de Guelma :

-L'unité de la vallée actuelle de l'oued Seybouse, avec une altitude variant de 220 m à 120 m (Ouest, Est), appelée « basse terrasse ».

-L'unité de la vallée ancienne qui domine la première avec une altitude variant entre 230 m à 280 m, et s'étend vers le Sud entre la ville de Guelma et le village de Boumahra. Cette unité forme la haute terrasse.

La liaison entre ces deux unités se fait par un talus interrompu par les petits oueds.

- L'unité des travertins ou la plaine des calcaires travertineux, constituée sur la bordure Sud-ouest de la haute terrasse, avec une altitude de 250 m.

Mais cette unité n'a jamais été considérée comme aquifère du fait de son coefficient de perméabilité très faible

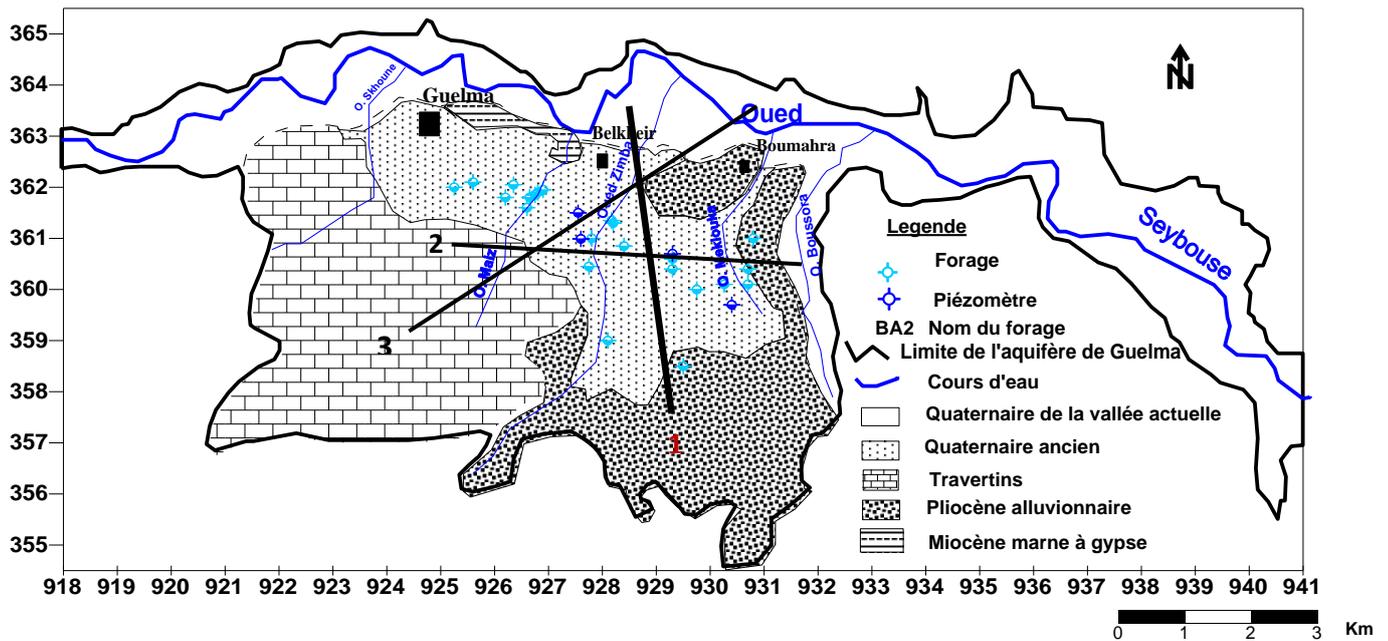
##### **a. La vallée actuelle (basse terrasse)**

Elle est formée par des graviers, des sables et de galets (coupe n<sup>o</sup> 1 et n<sup>o</sup> 2). Son substratum est constitué de l'extrémité Ouest jusqu'à Boumahra par des argiles et des marnes à gypse. De Boumahra jusqu'à Sidi Smir, le substratum est constitué par des argiles et des limons pliocènes, de cet endroit jusqu'à l'extrémité Est, on trouve des argiles et des grès numidiens.

A Boumahra, on trouve des poudingues pliocènes qui se rattachent aux affleurements du Djebel Zemzouma, également qu'entre Mechtet Djorf El Ahmar et Mechtet Regrig, des poudingues pliocènes se rattachent aux affleurements de Khala El Arbi.

L'épaisseur de cette nappe croît vers l'Est, elle est de 8 m au Nord de la ville de Guelma et atteint 16 m au Nord-Est de Boumahra.

La nappe de la basse terrasse est constituée de matériaux déposés dans le lit majeur du cours d'eau. Ce sont essentiellement des alluvions grossières d'une épaisseur moyenne de l'ordre de 10 m reposant sur un substratum marneux à gypse (coupe n<sup>o</sup> 1).



**Figure 14.** Carte d'inventaire des forages et des piézomètres dans la plaine de Guelma de l'année 2012 et position des coupes hydrogéologique.

La coupe n° 1 (Fig.15)., localisée à l'Ouest de la ville de Belkheir, d'orientation Nord-Sud montre la liaison entre la basse terrasse et la nappe de la haute terrasse se fait par la moyenne terrasse, qui est constituée d'un matériel détritique relativement fin en alternance avec des passages argileux. Le substratum est toujours marneux à gypse. On remarque que l'épaisseur est plus importante (40 m environ).

Dans la coupe n°1 (Fig.15), les alluvions des basses terrasses sont essentiellement constituées de cailloutis et de sable, tandis que la moyenne terrasse est formée de sables fins, avec intercalation de niveaux argileux.

Au niveau de la nappe de la basse terrasse, les plus fortes valeurs de transmissivité sont localisées entre oued Maïz et oued Skhoûn, au voisinage du lit actuel de l'oued Seybouse, où on a des valeurs de l'ordre de  $3,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  à  $4,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ . Dans cette nappe, les transmissivités diminuent d'Ouest en Est, où elles atteignent les plus faibles valeurs ( $2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ), entre Chaabet Maamora et oued Boussora, cela est dû à l'augmentation de l'épaisseur de trame argileuse dans cette partie (coupe n° 2). Plus à l'Est, la transmissivité diminue en se dirigeant vers mechtet Regrig ( $6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ) (Fig.15).

#### **b. La vallée ancienne (haute terrasse)**

Elle est formée par un remplissage plio-quaternaire. Le matériel pliocène est constitué par des galets, de grès, quartzites, gravier et des sables (fig. 15, 16 et 17). La couche superficielle

## Chapitre II Etude hydrogéologique

montre une affinité argileuse nette (coupe n<sup>01</sup>), tandis que les alluvions du Quaternaire sont plus grossières et moins colmatées que celles du Pliocène. Le substratum se compose essentiellement de formations miocènes à l'exception de la bordure est, qui est constituée par des argiles numidiennes.

Toutes les formations du Miocène sont imperméables, sauf pour les grès et les molasses qui sont légèrement perméables. L'épaisseur moyenne de cette nappe est de l'ordre de 100 m.

La coupe n<sup>01</sup> (Fig.15), montre que les formations de la haute terrasse sont de loin les plus intéressantes du point de vue épaisseur. Il s'agit d'un remplissage alluvionnaire qui dépasse 90 m, formé essentiellement de sables, de graviers et de cailloutis avec de petites intercalations argileuses. La forme du substratum marneux témoigne de l'ancien trajet de la Seybouse, qui était plus au Sud que son parcours actuel.

La coupe n<sup>02</sup> (Fig. 16), montre que la succession des matériaux pliocène en profondeur, lentille d'argile et des alluvions quaternaires fins, en couverture se poursuit d'Est en Ouest, jusqu'aux travertins, ce qui confirme la continuité du faciès dans toute la plaine. On s'aperçoit que la lentille d'argile est plus importante dans le côté Est, et plus faible au centre.

La topographie du substratum, fait différencier l'épaisseur de la couche des alluvions, cette dernière atteint le maximum au niveau du forage BA5, avec 110 m au total, en négligeant la mince lentille d'argile.

Plus au Sud, la nappe de la haute terrasse devient captive où une couche argileuse d'environ 8 m d'épaisseur surmonte les alluvions. Le substratum est toujours miocène et présente un sous bassement au centre de la plaine (c'est l'ancien lit probable de la Seybouse) (coupe n<sup>03</sup>, fig. 17).

Dans la haute terrasse, dans la partie Nord-Ouest, entre oued Skhoûn et oued Maïz, les valeurs de transmissivité augmentent du Sud vers la nappe des basses terrasses, où les alluvions deviennent plus grossières. Au niveau de Chaabet Maamora, on note les plus grandes valeurs de transmissivité ( $4,2 \cdot 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$ ) (Fig.19).

### c. Les calcaires travertineux

Les calcaires travertineux du Pliocène, situés au sud-Est de Guelma peuvent eux aussi constituer un aquifère, mais ils sont profondément drainés par les petits oueds.

Ces travertins se composent essentiellement de tuf vacuolaire ou spongieux, de calcaires blancs crayeux fissurés, parfois des lits marneux s'y présentent. Les travertins ont une épaisseur d'environ 55m.

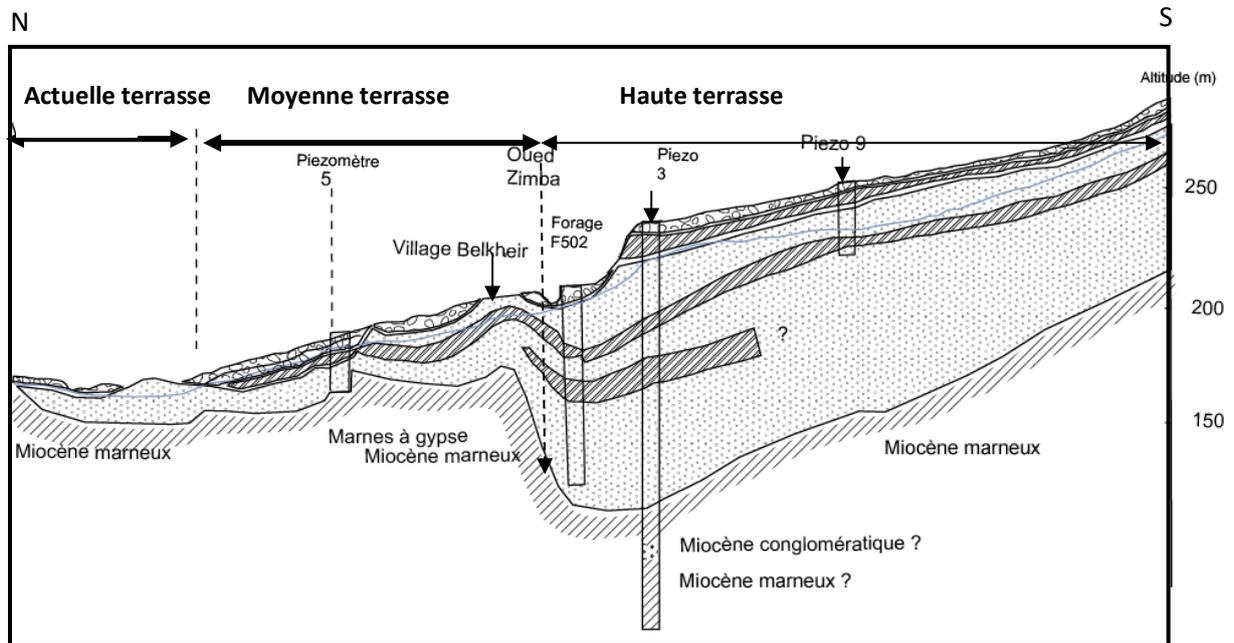
## **Chapitre II Etude hydrogéologique**

D'après les coupes 1 et 2 (Fig. 15 & 16), les calcaires travertineux pliocènes sont en contact direct avec les alluvions des hautes terrasses, dans la partie sud. D'après les données du piézomètre 3, il s'agit là de faciès variables : tufs vacuolaires ou spongieux, calcaires blancs crayeux fissurés avec de nombreuses recristallisations de calcite.

Dans la coupe 3 (Fig.17), les calcaires travertineux sont absents et reculent au Sud de la plaine vers les monts de la Mahouna.

Au niveau de la nappe des travertins, les valeurs de transmissivité, augmentent vers le Nord, à la limite avec la haute terrasse, où elles atteignent la valeur de  $3,6.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  (Fig.19).

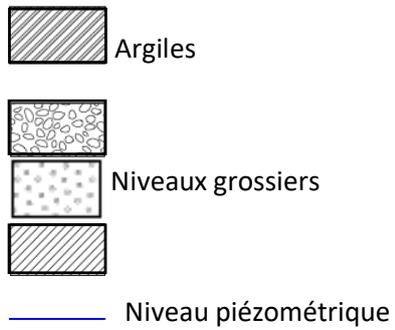
## Chapitre II Etude hydrogéologique



D'après Gaud, 1974

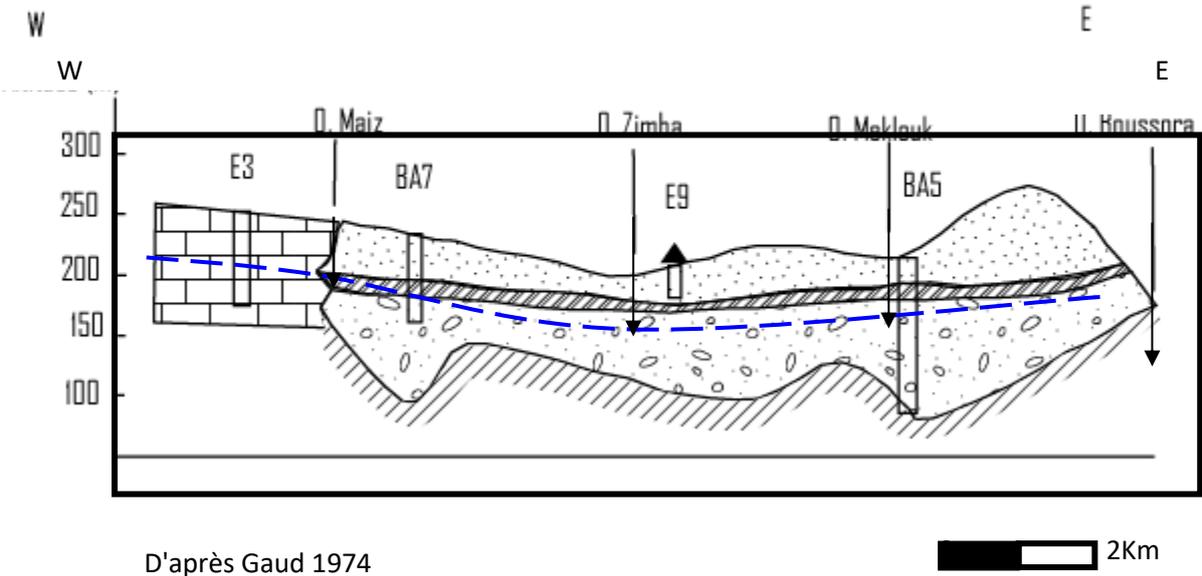
0 2Km

### Légende



**Figure 15.** Coupe 1 montrant la liaison entre la vallée actuelle et la vallée ancienne

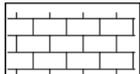
Chapitre II Etude hydrogéologique



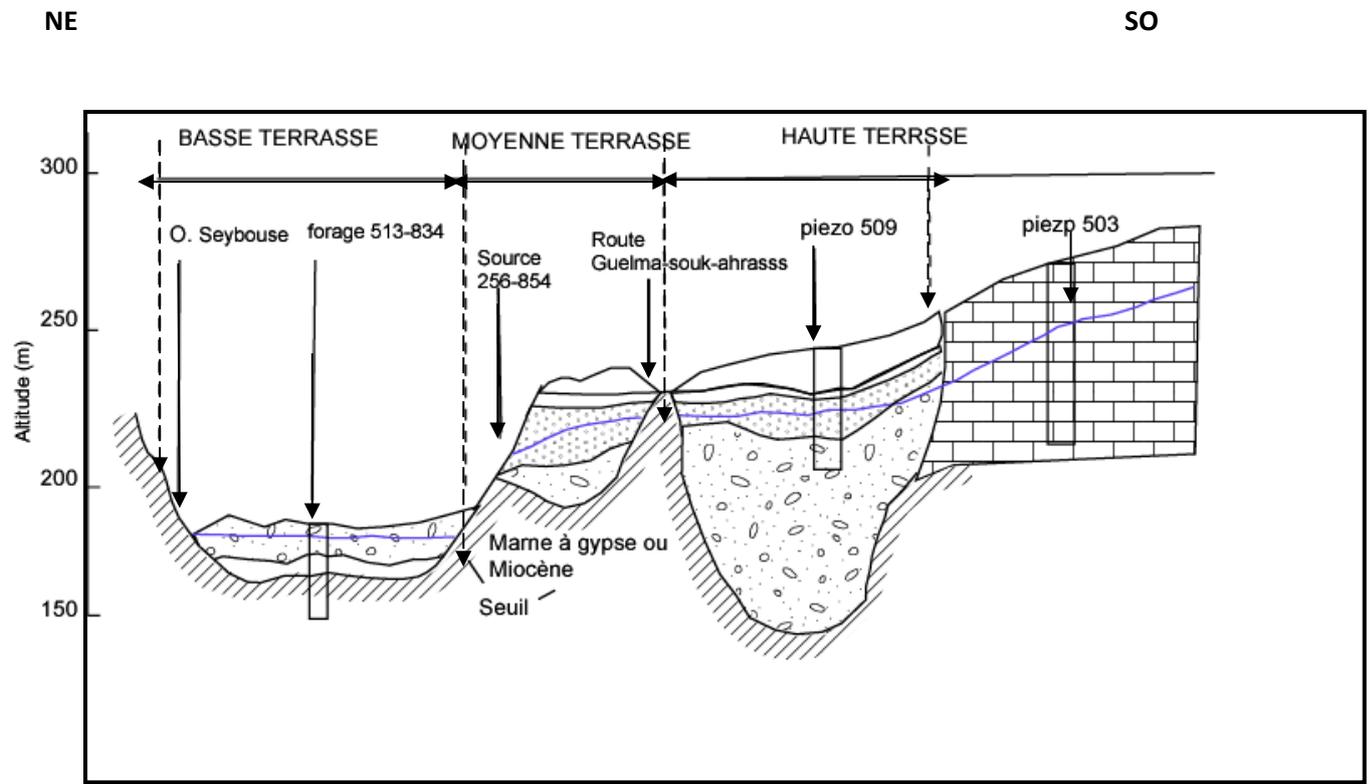
D'après Gaud 1974

2Km

Légende

-  Alluvions fins du quaternaire
-  Alluvions grossiers (gravier, galets, sables)
-  Calcaires travertineux
-  Substratum imperméable
-  Niveau piézométrique

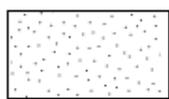
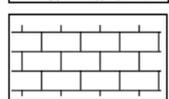
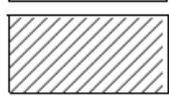
**Figure 16.** Coupe hydrogéologique transversale n°2.



D'après Gaud. B. 1974

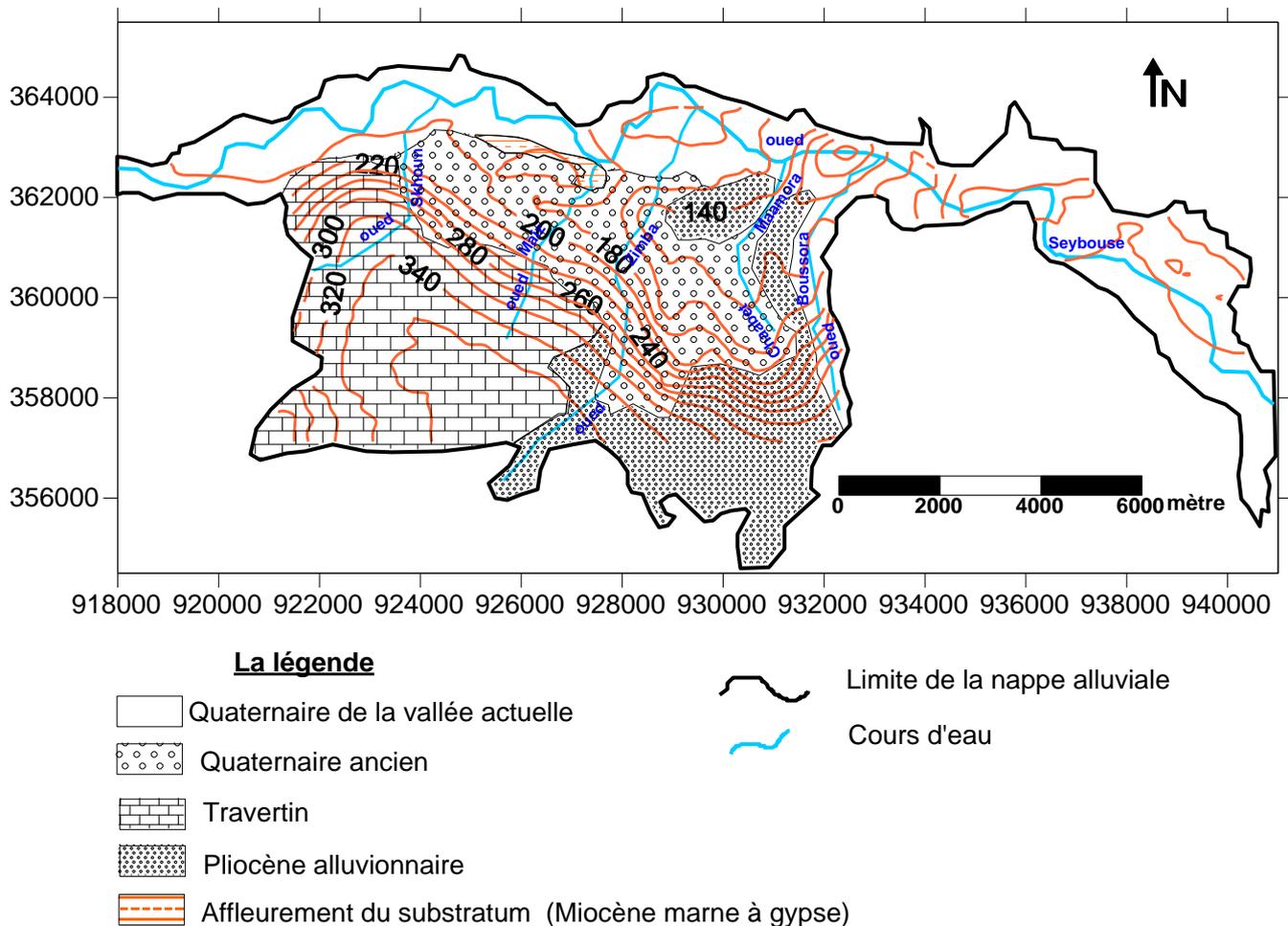


Légende

-  Alluvions fins
-  Caillouti
-  Travertins argileux
-  Substratum imperméable
-  Niveau piezométrique

**Figure 17 :** Coupe n° 3 montrant la présence d'un seuil de marnes à gypse isolant la basse terrasse de la haute terrasse et la relation entre les alluvions et les travertins.

II.1.1.2 Carte du substratum de la nappe aquifère de Guelma



**Figure 18.** Carte de la profondeur du substratum de la nappe aquifère de Guelma

La carte de la profondeur du substratum de l'aquifère de Guelma fait apparaître que le substratum s'enfonce vers la nappe du travertin, où il atteint son maximum (340 m), mais par contre au niveau de la nappe de la haute terrasse, nous observons qu'il s'élève du Sud, à la limite avec des mollasses, vers le Nord, où il affleure complètement au niveau de la moyenne terrasse entre oued Shkoun et oued Maiz., où nous assistons à l'émergence de plusieurs sources.

Tout au long de l'oued Seybouse, dans l'actuelle vallée, le substratum est peu profond (120 à 100 m), il atteint par endroit 80 m, d'où les alluvions qui présentent un intérêt hydrogéologique sont peu épaisses.

## Chapitre II Etude hydrogéologique

### II.2 Propriétés hydrodynamiques

#### II.2.1 La carte de transmissivité de la nappe aquifère de Guelma

Au niveau de la nappe des basses terrasses, les plus fortes valeurs de transmissivité sont localisées entre oued Maïz et oued Skhoûn, au voisinage du lit actuel de l'oued Seybouse, où on a des valeurs de l'ordre de  $3,8 \cdot 10^{-3}$  à  $4,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ . Dans cette nappe, les transmissivité diminuent de l'ouest vers l'est, où ils atteignent les plus faibles valeurs ( $2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ), entre Chaabet Maamora et oued Boussora, cela est dû à l'augmentation de l'épaisseur de la trame argileuse dans cette partie (coupe hydrogéologique 2). Plus à l'Est, la transmissivité diminue en se dirigeant vers Mechtet Regrid ( $6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

Au niveau de la nappe des travertins, les valeurs de transmissivité, augmentent vers le Nord, à la limite avec la haute terrasse, où elles atteignent la valeur de  $3,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Dans la haute terrasse, dans la partie Nord-Ouest, entre oued Skhoûn et oued Maïz, les valeurs de transmissivité augmentent du Sud vers la nappe des basses terrasses, où les alluvions deviennent plus grossières. Au niveau de Chaabet Maamora, on notes les plus grandes valeurs de transmissivité ( $4,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

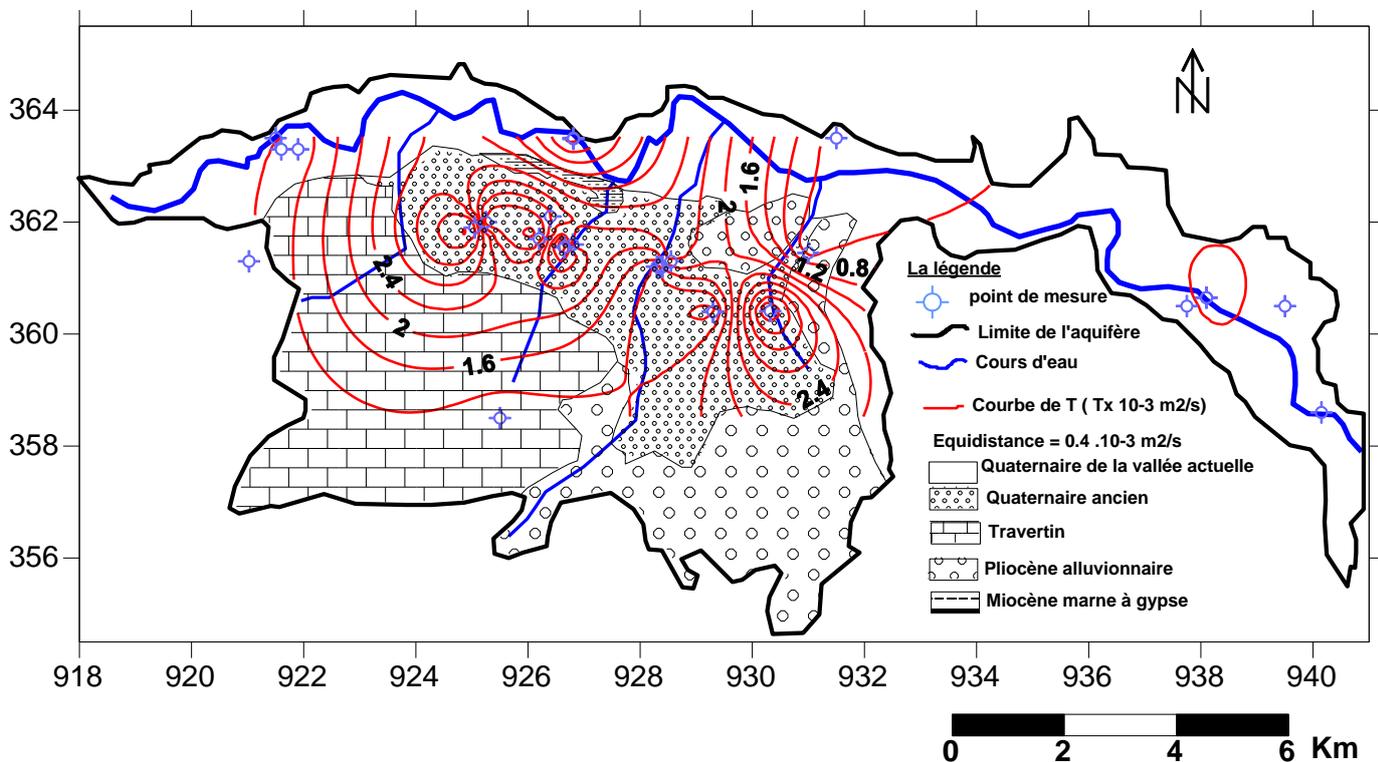


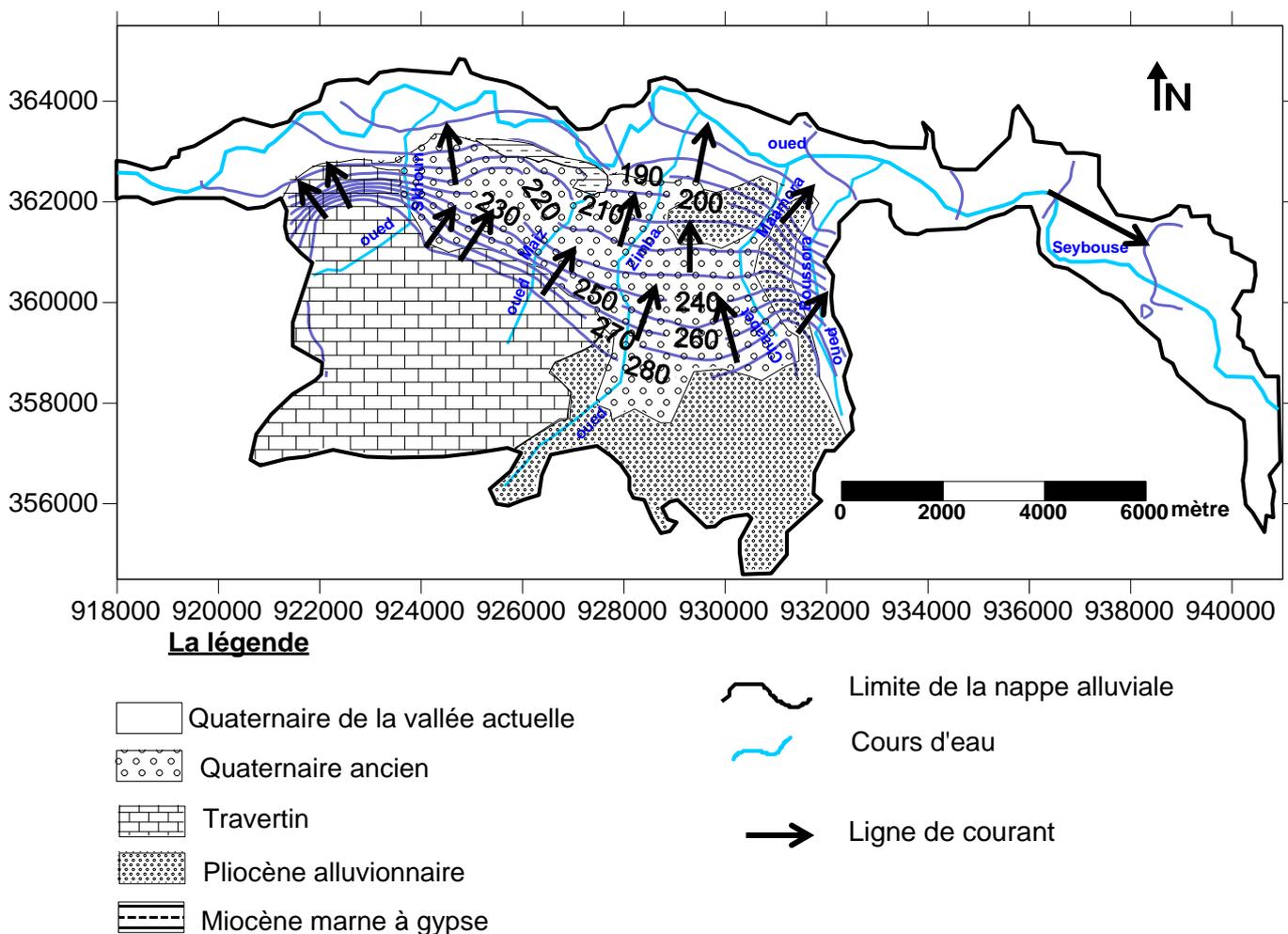
Figure 19. Carte de transmissivité de la nappe alluviale de Guelma.

## Chapitre II Etude hydrogéologique

### II.3 La piézométrie

L'essai d'identification des aquifères et la détermination de leurs caractéristiques hydrogéologiques permettent de reconnaître les potentialités en eaux souterraines de la région. Dans le système hydrogéologique de la plaine de Guelma, l'oued Seybouse coule entre deux seuils imperméables : les marnes du Crétacé à l'ouest (au niveau du pont de la route vers Constantine) et les marnes du Trias à l'est (aux environs du Nador). Il s'agit probablement d'une zone d'effondrement comblée par des dépôts Miocènes (argiles et marnes à gypse) et Quaternaires (alluvions hétérogènes sous formes de terrasses). Ces alluvions souvent très perméables et surtout très épaisses contiennent une nappe importante alimentée par les infiltrations des eaux de pluie et par les apports latéraux du bassin versant de l'oued Seybouse.

#### II.3.1 La carte piézométrique de la nappe aquifère de Guelma



**Figure 20.** Carte piézométrique de la nappe alluviale de Guelma.

## Chapitre II Etude hydrogéologique

Afin d'avoir des informations d'une part sur la morphologie de la surface piézométrique (la forme, et l'espacement des isopièzes), donnant le sens d'écoulement et d'autre part, de connaître la variation du gradient hydraulique et les zones d'alimentation et de drainage de la nappe; nous avons établi une carte piézométrique, basée sur la mesure du niveau piézométrique des points d'eau et leur report sur la carte topographique. Les courbes ainsi dessinées représentent les équipotentiels de la surface piézométrique de la nappe.

La carte de la figure 20 représente l'état de la surface piézométrique, nous remarquons que le sens d'écoulement est généralement vers l'oued Seybouse (e.i. du Sud vers le Nord).

D'après la morphologie des isopièzes, qui se resserrent parallèlement dans la partie sud-ouest de la ville de Guelma (zone des travertins) on peut déduire que la nappe des travertins alimente celle des alluvions. Ce resserrement signale l'importance du gradient hydraulique dans cette zone qui prend des valeurs de l'ordre de 0.008.

La partie centrale de la plaine, entre Boumahra et Belkhier est marquée par une augmentation de l'espacement entre les isopièzes impliquant une diminution sensible du gradient hydraulique qui passe à des valeurs de 0.018. Le sens d'écoulement est toujours du Sud vers le Nord.

Dans l'extrémité Sud- Est, une zone d'alimentation apparaît aux limites de la plaine des alluvions avec la mollasse argilo- gréseuse mais les valeurs du gradient sont moyennes de l'ordre de 0.03.

Dans les alluvions situées sur la rive Nord de l'oued Seybouse, le sens d'écoulement est du Nord- Ouest vers le Sud-Est, c.a.d. à partir du piémont de djebel Houara vers l'oued Seybouse.

En ce qui concerne les vitesses de l'écoulement on peut distinguer trois zones de vitesses différentes :

- La première zone située dans les travertins d'une vitesse moyenne de l'ordre de  $12 \cdot 10^{-6}$  m/s.

## Chapitre II Etude hydrogéologique

- La deuxième située dans le centre de la plaine avec une vitesse d'écoulement de  $0.9 \cdot 10^{-6}$  m/s.
- La troisième zone est située à l'Est de l'oued Boussora et caractérisée par des vitesses faible de l'ordre de  $0.3 \cdot 10^{-6}$  m/s.

D'après la forme des courbes, on constate l'existence de trois axes de drainage d'orientation générale Nord –Sud, situés le long des affluents principaux de l'oued Seybouse (O. Boussora, O. Zimba et O. Maiz). Cependant, il y a deux lignes de partage des eaux essentielles : la première située au Sud de Boumahra entre Chaabat Maklouka et oued Boussora , la deuxième entre oued Zimba et oued Maiz et la troisième est située à l'Ouest de la ville de Guelma tout au long de l'oued Skhoun, séparant ainsi les travertins des alluvions.

### II.3.2 Les conditions aux limites

La carte de l'état piézométrique et les données lithologiques confirment les limites suivantes :

- Limites à flux imposé (limites d'alimentation) :  
Les calcaires travertins du côté Sud-Est.  
Les grès du Miocène du côté Est (ces formations sont peu perméables).  
La mollasse de Guelma du côté Sud-est considérée comme une zone de faible apport à cause des lentilles argileuses qu'elle contient.
- Limites à flux nul : ce sont les affleurements des marnes à gypse du Miocène et les argiles numidiennes qui forment l'essentiel des limites étanches surtout du côté du Nord.

### II.4 Conclusion

Dans le cadre de notre étude nous avons essayé d'apporter une contribution à la mise en valeur des ressources de la plaine alluviale de Guelma et de cerner les potentialités qu'offrent le milieu et les contraintes naturelles de cette région.

La nappe alluviale de Guelma est constituée de trois unités différentes par leur stratigraphie et leur lithologie :

## Chapitre II Etude hydrogéologique

-L'unité de la vallée actuelle de l'oued Seybouse (basse terrasses) ;

-L'unité de la vallée ancienne haute terrasse), dominant la première par une altitude variant entre 230 m à 280 m, et s'étend vers le sud. L'épaisseur moyenne de cette nappe est de l'ordre de 100 m, la plupart des forages sont implantés dans cette terrasse ;

- L'unité des travertins, constituée sur la bordure Sud-est de la haute terrasse, elle est profondément drainée par les petits oueds.

Les résultats des essais par pompage ont permis d'obtenir des valeurs de transmissivité comprises entre  $10^{-3} \text{ m}^2 / \text{s}$  et  $5. 10^{-3} \text{ m}^2 / \text{s}$  qui diminuent d'Ouest en Est et de Nord en Sud. Les valeurs de perméabilité sont de l'ordre de  $10^{-5} \text{ m/s}$ . La transmissivité est importante, au niveau de la nappe des basses terrasses, où les plus fortes valeurs sont observées au voisinage du lit actuel de l'oued Seybouse. Dans la haute terrasse, les valeurs de transmissivité augmentent du Sud vers le Nord, où les alluvions deviennent plus grossières. On note les plus grandes valeurs de transmissivité ( $4,2.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ), au niveau de Chaabet Maamora

L'interprétation de la carte piézométrique a montré que l'allure des courbes isopièzes et le tracé des lignes de courant déterminent un sens de l'écoulement convergeant vers l'oued Seybouse (du Sud vers le Nord). A l'ouest, la nappe des hautes terrasses se fait alimentée latéralement par les travertins. La nappe des hautes terrasses, alimente la nappe des basses terrasses, suivant un axe de drainage d'orientation Sud-ouest et Nord-est.

La carte des conditions aux limites présente une idée sur les différents sens de la circulation souterraine des eaux et de leur provenance.

### III.1. Qualité des eaux de l'oued Seybouse et de ses affluents

L'évaluation de la qualité des eaux des cours d'eau, en relation avec une nappe aquifère alluviale, est une étape importante pour expliquer le processus des échanges chimiques entre les eaux de la nappe aquifère et celles de la rivière et de définir l'origine de leur minéralisation respective.

L'irrigation des terres agricoles de la plaine de Guelma est assurée par trois stations de pompage « El fedjoudj », « Guelma » et « Boumahra Ahmed », situées au niveau de l'oued Seybouse, respectivement de l'amont à l'aval.

#### III.1.1 Matériels et méthodes

##### III.1.1.1 Les propriétés géochimiques et degré de pollution organique

Afin de déterminer les propriétés géochimiques et mieux cerner le degré de pollution des eaux de l'oued Seybouse, nous avons interpréter des analyses physico-chimiques de trois compagnes de prélèvement, faites pendant la période d'irrigation.

Le choix de l'analyse de ces paramètres chimiques essentiellement les ions majeurs (Ca, Mg, Na, K, Cl, SO<sub>4</sub> et HCO<sub>3</sub>) est indispensable pour déterminer les propriétés géochimiques de ces eaux, pour les nutriments (nitrates NO<sub>3</sub>, nitrites NO<sub>2</sub>, ammonium NH<sub>4</sub> et orthophosphates PO<sub>4</sub>) leur dosage permettra de savoir l'ampleur de la pollution causée par le rejets des eaux usées domestiques qui sont généralement très chargées en ces nutriments.

Pour la campagne de juillet 2004, les prélèvements des eaux ont été effectués sur des stations répartis le long de l'oued Seybouse (Fig. 43), ils ont été réalisés par la Direction de l'Environnement de la ville de Guelma et analysés par le laboratoire du même organisme.

Les paramètres physico-chimiques sont le pH, la conductivité électrique (CE), le potentiel d'oxydoréduction (Eh), l'oxygène dissous, la demande biochimique en oxygène (BD<sub>5</sub>), la demande chimique en oxygène (DCO), l'ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), les orthophosphates (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), le phosphore total et les nitrites (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>).

L'interprétation des analyses, nous a permis de déterminer le degré de pollution organique évalué par le calcul de l'indice de pollution organique, surtout au niveau de l'oued Maiz, qui reçoit le tiers des eaux usées non épurées.

L'échantillonnage réalisé en Aout 2005 s'est fait au niveau des trois seuils d'irrigation implantés dans l'oued Seybouse et à la station de pompage « Charef », située à quelques mètres de la confluence de l'oued Bouhamdane et de l'oued Charef, qui constituent l'oued Seybouse et au niveau des affluents: oued Skhoûn, oued Maïz et oued Boussora (Fig. 35). Le pH a été mesuré sur le terrain à l'aide d'un multi-paramètre WTW (P3 MultiLine pH / LFSET). Les échantillons ont été prélevés à l'aide de 2 flacons en polypropylène

préalablement rincés par l'eau de l'échantillon. Chaque échantillon a été filtré immédiatement sur le site à l'aide de filtres de 0,45 µm d'acétate de cellulose. Le filtrat pour les analyses des cations a été stocké dans des flacons de 250 cm<sup>3</sup> en polyéthylène et immédiatement acidifié pH<2 par ajout d'acide nitrique. Les échantillons d'eau destinés à l'analyse des anions n'ont pas été acidifiés. Tous les échantillons ont été conservés dans une glacière à une température inférieure à 4°C et transférés au laboratoire et conservés dans un réfrigérateur à une température inférieure à 4°C jusqu'à ce qu'ils soient analysés dans un délai d'une semaine au maximum. Les éléments chimiques analysés sont : calcium (Ca<sup>2+</sup>), magnésium (Mg<sup>2+</sup>), sodium (Na<sup>+</sup>), potassium (K<sup>+</sup>), chlorure (Cl<sup>-</sup>), bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), le résidu sec (RS) et la demande en oxygène chimique (COD). Les analyses chimiques des éléments majeurs ont été réalisées au Laboratoire de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) de Constantine. Les méthodes utilisées sont celles préconisées par American Water Works Association and Water Environment Federation. Les éléments métalliques en trace essentiellement le fer total (Fe), le manganèse (Mn), le cuivre (Cu), le chrome (Cr), le zinc (Zn) et le plomb (Pb) étaient analysés par absorption atomique à flamme dans le même laboratoire.

En Juin 2016, l'échantillonnage a été fait au niveau des trois stations de pompage des eaux d'irrigation à savoir de l'amont à l'aval : El Fedjouj, Guelma et Boumahra (Fig. 57). Les paramètres suivants : pH, température, conductivité électrique, oxygène dissous, potentiel d'oxydoréduction (Eh), ont été mesurés sur terrain à l'aide d'un appareil multi paramètres HANNA (HI 9828). Les échantillons ont été prélevés à l'aide de 2 flacons en polypropylène préalablement rincés par l'eau de l'échantillon. Chaque échantillon a été filtré immédiatement sur le site. Le filtrat pour les analyses des cations immédiatement acidifié pH<2 par ajout d'acide nitrique. Les échantillons d'eau destinés à l'analyse des anions n'ont pas été acidifiés. Tous les échantillons ont été conservés dans une glacière à une température inférieure à 4°C et transférés au laboratoire du Centre National de Recherche Nucléaire d'Alger (CRNA). Les éléments chimiques analysés sont : le calcium (Ca<sup>2+</sup>), magnésium (Mg<sup>2+</sup>), sodium (Na<sup>+</sup>), potassium (K<sup>+</sup>), chlorure (Cl<sup>-</sup>), bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) et nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

Ces prélèvements avait comme objectif l'étude de l'origine des principaux éléments chimiques majeurs présents dans les eaux de surface et l'analyse des indices de saturation vis-à-vis des minéraux potentiellement existants dans ces eaux.

### III.1.1.2 Pollution microbiologique

En 2005, nous avons réalisé l'échantillonnage en juillet et aout, respectivement avant et après les lâchées du barrage. Neuf sites de prélèvement ont été choisis (Fig.55) et (Fig.56) ; au niveau des seuils d'irrigation (Charef ; située plus à l'amont de la plaine de Guelma, El fedjoudj, Guelma et Boumahra Ahmed), et au niveau des affluents qui sont les milieux récepteurs des rejets domestiques ; à savoir de l'amont à l'aval : oued Skhoûn, oued Maïz, oued Zimba, chaabet Maamora et oued Boussora.

En Aout 2016, l'échantillonnage (Fig.57) visait la détection de l'amélioration apportée par l'installation de la STEP, mise en marche en 2008, mais malheureusement, elle ne traite que les eaux usées urbaines de la ville de Guelma seulement.

Les deux campagnes de prélèvement avaient comme objectifs :

- Connaître le degré de pollution bactériologique des eaux de surface et leur aptitude à l'irrigation par rapport à la charge fécale,
- ainsi que la connaissance des effets des lâchées du barrage sur leur qualité bactériologique.

Les prélèvements ont été faits dans des bouteilles en verre stérilisées, puis conservés dans une glacière portable. Les échantillons ont été acheminés directement au laboratoire de la Direction de la Santé de la ville de Guelma pour être analysés.

L'identification des coliformes totaux et des coliformes fécaux, a été faite par filtration par membrane et par fermentation en tube multiple, les streptocoques fécaux par fermentation en tube multiple.

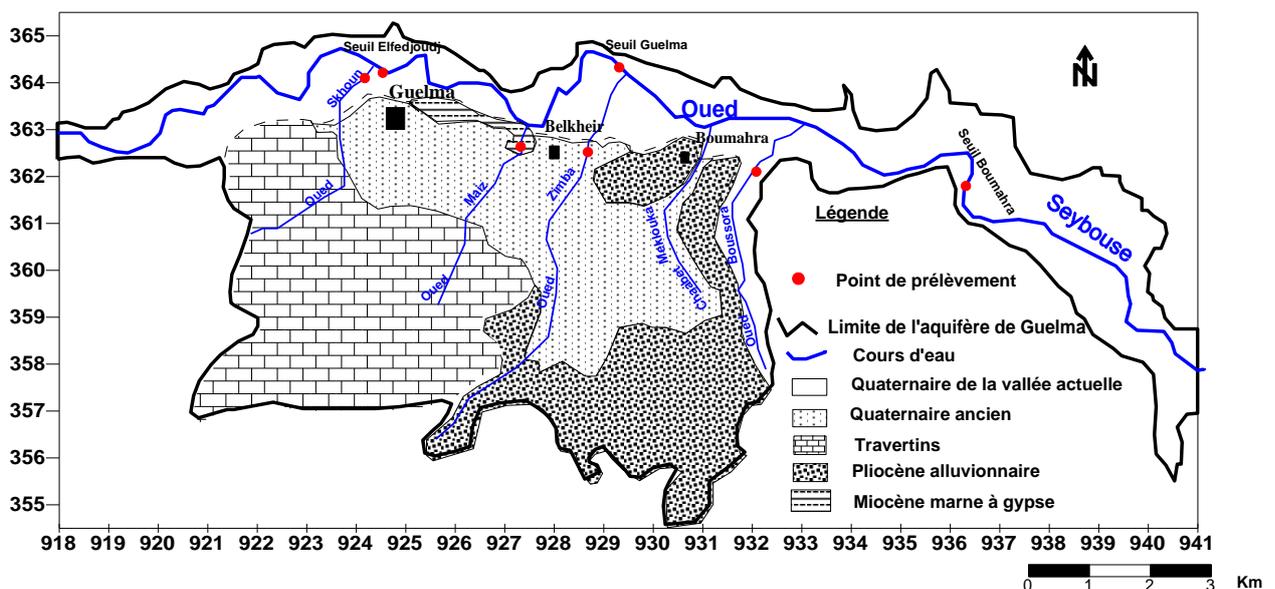


Figure 21. Localisation des points de prélèvement des eaux, Mai et Aout 2005.

### III.2. Faciès chimique

Les résultats des analyses chimiques des eaux de l'oued Seybouse et de ses affluents, effectuées au sein du laboratoire de l'ANRH de Constantine en Mai et en Aout de l'année 2005 ont permis de définir le faciès chimique des eaux (Tableau 12).

**Tableau 12.** Faciès chimique et formule ionique des eaux de l'oued Seybouse, 2005.

	Seuil d'irrigation	Charef	El fedjoudj	Guelma	Boumahra
Mai	Formule ionique	$rCl > rSO_4^- > rHCO_3^-$ $rNa^+ > rCa^{++} > rMg^{++}$	$rCl > rSO_4^- > rHCO_3^-$ $rNa^+ > rCa^{++}, rMg^{++}$	$rCl > rSO_4^- > rHCO_3^-$ $rNa^+ > rCa^{++} > rMg^{++}$	$rCl > rSO_4^- > rHCO_3^-$ $rNa^+ > rCa^{++} > rMg^{++}$
	Faciès chimique	Chloruré sodique	Chloruré sodique	Chloruré sodique	Chloruré sodique
	Formule ionique	$rCl > rSO_4^- > rHCO_3^-$ $rCa^{++} > rMg^{++} > rNa^+$	$rCl > rSO_4^- > rHCO_3^-$ $rCa^{++} > rMg^{++} > rNa^+$	$rCl > rSO_4^- > rHCO_3^-$ $rCa^{++} > rMg^{++} > rNa^+$	$rCl > rSO_4^- > rHCO_3^-$ $rCa^{++} > rMg^{++} > rNa^+$
Août	Faciès chimique	Chloruré calcique	Chloruré calcique	Chloruré calcique	Chloruré calcique

Au mois de mai, les seuils de pompage, Charef, El fedjoudj, Guelma et Boumahra présentent le même faciès chimique, chloruré sodique dont l'origine est le lessivage des formations géologiques salifères (Tableau 12). Les chlorures et le sodium peuvent provenir de la dissolution des marnes miocènes et des formations évaporitiques.

En mai, l'apport des affluents de l'oued Seybouse, dont les eaux sont de faciès chimique différent (Tab.13) à celui des eaux d'irrigation, ne modifient guère le faciès chimique de ces dernières.

Au mois d'août, après les lâchées du barrage, les eaux d'irrigation présentent un faciès chloruré calcique.

Le faciès bicarbonaté calcique des oueds Maïz et Skhoûn, est dû aux calcaires travertineux, localisés à l'Ouest de la nappe alluviale de Guelma.

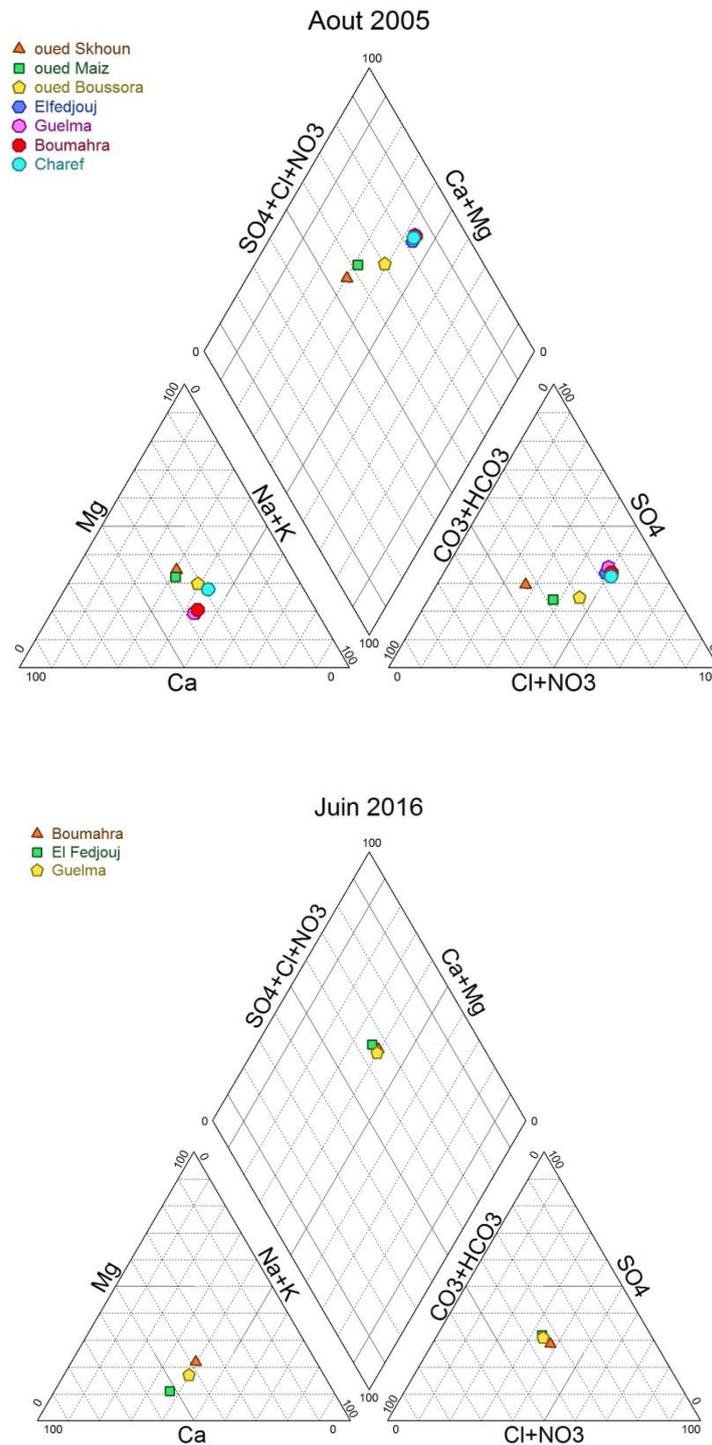
**Tableau 13.** Faciès chimique et formule ionique des eaux des affluents de l’oued Seybouse, 2005.

Affluent		Oued Skhoûn	Oued Maïz	Oued Zimba	Oued Boussora
Mai 2005	Formule ionique	$rCl > rSO_4^{--} > rHCO_3^-$ $rCa^{++} > rNa^+ > rMg^{++}$	$rHCO_3^- > rCl > rSO_4^{--}$ $rCa^{++} > rMg^{++} > rNa^+$	$rCl > rHCO_3^- > rSO_4^{--}$ - $rCa^{++} > rMg^{++} > rNa^+$	
	Faciès chimique	Chloruré calcique	Bicarbonaté calcique	Chloruré calcique	
Août 2005	Formule ionique	$rCl > rSO_4^{--} > rHCO_3^-$ $rCa^{++} > rMg^{++} > rNa^+$	$rCl > rSO_4^{--} > rHCO_3^-$ $rCa^{++} > rMg^{++} > rNa^+$	-	$rCl > rSO_4^{--} > rHCO_3^-$ $rCa^{++} > rMg^{++} > rNa^+$
	Faciès chimique	Chloruré calcique	Chloruré calcique	-	Chloruré calcique

**Tableau 14.** Faciès chimique des seuils de pompage, Juin 2016.

Seuil d'irrigation		El fedjoudj	Guelma	Boumahra
Juin 2016	Formule ionique	$rHCO_3^- > rCl > rSO_4^{--}$ $rCa^{++} > rNa^+ > rMg^{++}$	$rHCO_3^- > rCl > rSO_4^{--}$ $rCa^{++} > rNa^+ > rMg^{++}$	$rCl > rHCO_3^- > rSO_4^{--}$ $rCa^{++} > rNa^+ > rMg^{++}$
	Faciès chimique	Bicarbonaté calcique	Bicarbonaté calcique	Chloruré calcique

Les résultats des analyses de juin 2016, montrent que le faciès chimique bicarbonaté calcique marque les eaux de l’oued Seybouse au niveau des deux seuils d’irrigation (Tab.14), en amont ; El Fedjoudj et Guelma rappelant les formations des calcaires travertineux, traversées et lessivées par ces eaux, toutefois le faciès devient chloruré calcique à la station de Boumahra, plus en aval du bassin, ceci est dû au lessivage des évaporites, essentiellement l’halite, avec probablement un échange de base (Ca/Na) avec la matrice argileuse.



**Figure 22.** Faciès chimique des eaux de surface de la plaine de Guelma.

Les représentations des compositions des eaux en éléments majeurs dans le diagramme de Piper (Piper, 1944), au mois d'août 2005, après les lâchées du barrage, montrent un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien, rivières (Fig.22). En Juin 2016, les trois stations

d'irrigation montrent un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien, dont l'origine est probablement la dissolution des formations évaporitiques, essentiellement l'halite (Fig. 22).

### III.3. Acquisition de la charge saline des eaux de surface

Des corrélations ont été établies entre la concentration de chaque élément et la minéralisation totale (Yermani et al, 2003). D'une façon générale, les teneurs en  $\text{Na}^+$  et  $\text{Ca}^{2+}$  augmentent avec la charge saline dans les eaux, ainsi que le  $\text{Cl}^-$ ; toutefois, les teneurs en  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{NO}_3^-$  participent considérablement à l'augmentation de la charge saline (Fig. 23).

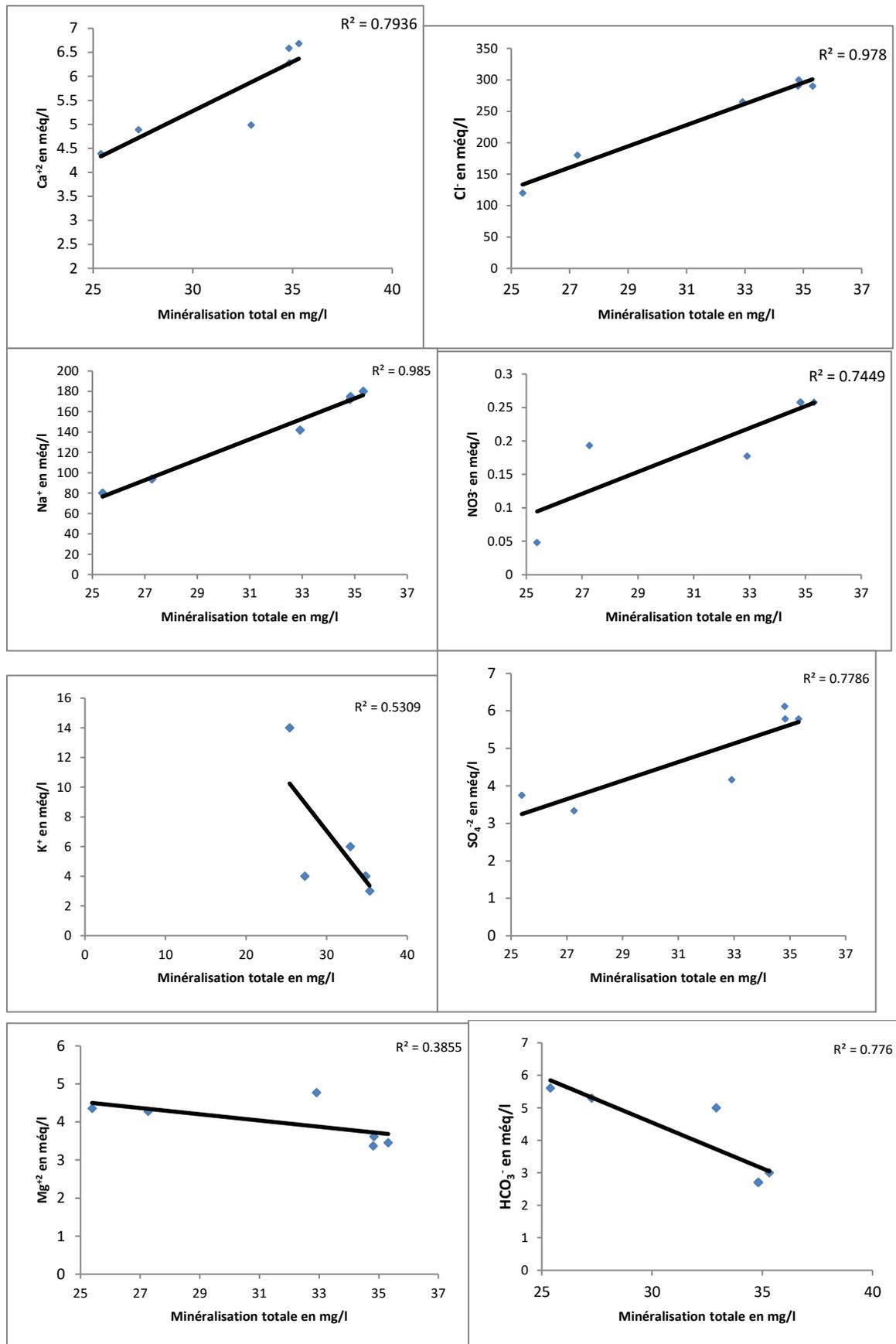


Figure 23. Correlation entre les différents ions et la minéralisation totale

### III.3.1. Evolution spatiale des éléments chimiques des eaux de l'oued Seybouse

#### III.3.1.1 Les cations (Fig.24)

- **Calcium**

Le calcium est le cation le plus commun dans les eaux de surface. Il dépend principalement des formations géologiques (dépôts de carbonates ou de gypse présents, etc. (Saidati Bouhlassa et al 2008).

Au mois de mai, l'oued Skhoûn apporte, au seuil d'El fedjoudj un plus de calcium, étant donné que cette station de pompage est située seulement à 300 m de cet oued, où on observe la teneur la plus élevée (146 mg/l).

Au mois d'août, après les lâchées du barrage de Hammam Debagh, la teneur la plus élevée en calcium, est toujours observée à la station d'irrigation d'El fedjoudj, à cause probablement des apports de l'oued Skhoûn dont le faciès chimique est bicarbonaté calcique.

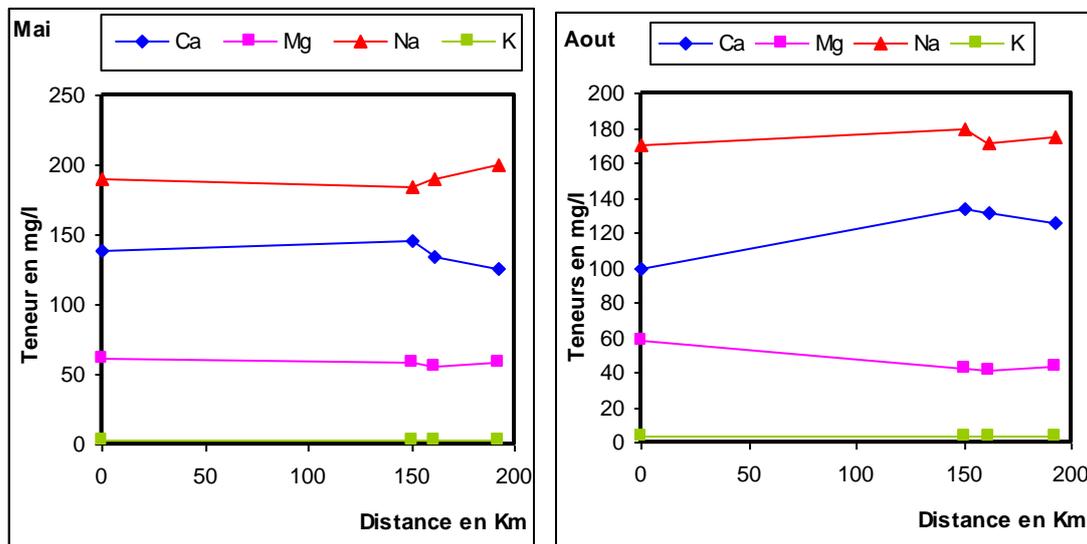


Figure 24. Evolution spatiale et temporelle des cations dans les eaux de surface de la plaine de Guelma (mai et Aout 2005)

- **Magnésium**

An mois de mai, les teneurs en Mg, au niveau des quatre seuils d'irrigation sont très proches les unes des autres. Les eaux des affluents de l'oued Seybouse présentent également des valeurs proches à celles observées au niveau des seuils de pompage.

Au mois d'août, on note la diminution des teneurs en magnésium, par rapport au mois de Mai, au niveau des quatre stations d'irrigation, ceci est du probablement à la dilution des eaux de l'oued Seybouse par celles du barrage.

- **Sodium**

Au mois de mai, les teneurs en sodium, ne varient pas de façon importante, la teneur la plus élevée est observée à la station de Boumahra (205 mg/l).

Au mois d'août, les teneurs en sodium diminuent par rapport à celles prélevées au mois de Mai, ceci est dû probablement par la dilution de ces eaux par l'apport du barrage.

- **Potassium**

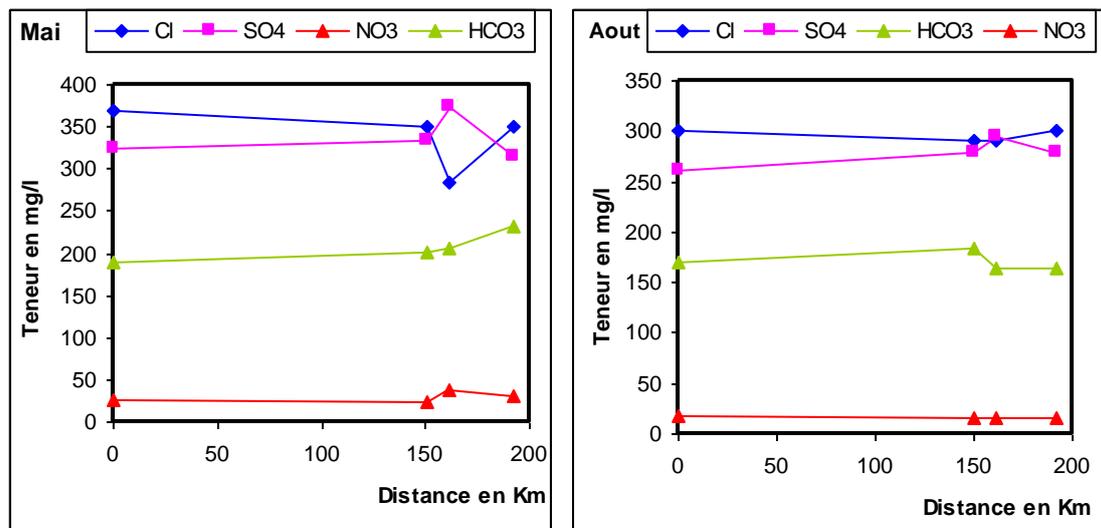
Les teneurs en potassium sont très faibles et égales à 3 mg/l dans les quatre seuils de pompage pour les deux périodes de mai et d'août.

### III.3.1.2. Les anions (Fig. 25).

- **Les chlorures**

Pendant le mois de mai, les teneurs en chlorures, ne varient pas de façon importante, sauf pour le seuil de Guelma, où elles diminuent.

Au mois d'août, les teneurs en chlorure, dans les seuils d'irrigation sont presque identiques et sont inférieures aux teneurs observées au mois de mai. Cette diminution s'explique probablement, par le fait que les lâchées du barrage, dont le volume est important, arrivent à diluer les concentrations en chlorures.



**Figure 25.** Variation spatiale et temporelle des anions dans les eaux de surface de la plaine de Guelma (2005)

- **Les sulfates**

Au mois de mai et d'août, les seuils de pompage d'El fedjoudj et de Guelma montrent les teneurs les plus élevées en sulfates, cela est dû probablement à la pollution par les eaux usées des affluents des oueds Skhoûn et Maïz.

- **Les bicarbonates**

Au mois de mai, les teneurs en bicarbonates augmentent de l'amont vers l'aval, ils atteignent 232 mg/l au seuil de Boumahra.

Pendant le mois d'août, l'oued Skhoûn montre la teneur la plus élevée en bicarbonate (342 mg/l) et cela se ressent au seuil d'El fedjoudj, où on la teneur est la plus importante avec 183 mg/l.

#### III.4. Aptitude des eaux de l'oued Seybouse à l'irrigation

Il y'a quatre critères majeurs à considérer lors de l'évaluation de la qualité des eaux d'irrigation:

1. La concentration en sels dissous (risque de salinité)
2. La quantité de sodium dans l'eau comparée à d'autres cations (risque de sodicité).
3. La concentration des éléments toxiques qui inhibe la croissance des plantes ou deviennent un danger environnemental.
4. Le bénéfice nutritionnel résultant de nutriments (nitrates, phosphates et sulfates) **(HACH Company, 1993).**

##### III.4.1 Le risque de salinité

En plus de la rareté et la répartition temporelle défavorable du facteur de production d'eau, la salinité est devenue une problématique typique des régions arides et semi-arides.

L'accumulation des sels dans le sol occasionne des effets nocifs sur les végétaux et sur le sol. Il s'en suit une diminution des rendements et à terme, une stérilisation du sol. En plus de la dite salinité primaire, due en particulier à des inondations périodiques par une eau de mauvaise qualité, et à la remontée d'une nappe phréatique, la salinité est dite secondaire lorsqu'elle est induite par l'activité humaine, liée souvent à des pratiques d'irrigation **(Mansouri, 2003).**

Les plantes et l'évaporation prélèvent l'eau du sol en y abandonnant une large part des sels apportés par l'eau d'arrosage, ce qui conduit à une augmentation de la salinité de l'eau du sol. La pression osmotique de l'eau du sol augmentant avec sa concentration en sels dissous. La plante consacre alors l'essentiel de son énergie non pas à se développer, mais à ajuster la concentration en sel de son tissu végétal de manière à pouvoir extraire du sol l'eau qui lui est nécessaire **(Faby et al, 2000).**

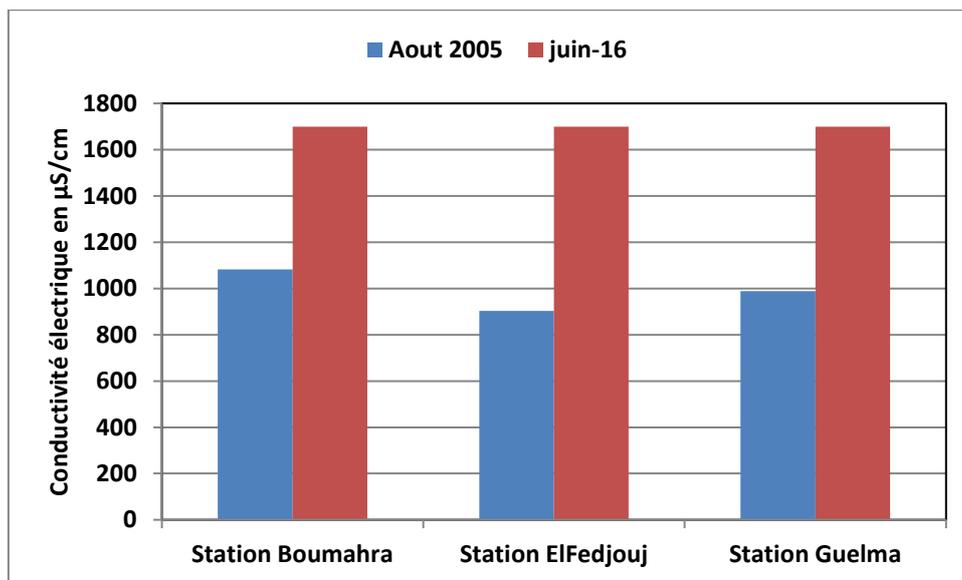
##### III.4.1.1 Evolution temporelle et spatiale de la salinité

Richards, en 1969 a établi une échelle de qualité des eaux d'irrigation en fonction de leur salinité, évaluée par leur conductivité électrique (Tab. 15) **(Faby et al, 2000).**

**Tableau 15.** Classe de salinité selon Richards (Faby et al, 2000).

	Conductivité de l'eau (mmhos/cm)	Sels correspondants estimés en Na Cl (mg/l)
I- Excellente	<0,25	<160
II- Faible salinité	0,25-0,75	160-500
III- Forte salinité	0,75-2,25	500-1500
IV- Très forte salinité	2,25-5	1500-3600

Les eaux de l'oued Seybouse, au niveau des seuils de pompage montrent globalement la même conductivité, soit une forte salinité, les sels solubles estimés en NaCl correspondant sont compris entre 500 et 1500 mg/l. Cependant, l'augmentation de cette salinité est remarquable entre 2005 et 2016, ceci est dû probablement à l'infiltration des eaux d'irrigation évaporées et concentrées en sels.

**Figure 26.** Evolution spatio- temporelle de la conductivité électrique des eaux d'irrigation.

#### III.4.2. Le risque de sodicité

L'accumulation du sodium sur le complexe adsorbant des sols peut dégrader les propriétés physiques des sols. Leur capacité de drainage, donc leur perméabilité, conditionne la productivité des terres irriguées. Un excès de sodium par rapport aux alcalino-terreux (Ca, Mg, ...) dans le complexe adsorbant provoque la défloculation des argiles, une destruction du sol qui se traduit par une réduction de la perméabilité et de la porosité des couches superficielles du sol. L'eau d'irrigation stagne alors à la surface du sol et ne parvient plus jusqu'aux racines. D'autre part, à proportion égale de sodium et d'alcalino-terreux dans la

solution, la tendance à la sodisation du sol est d'autant plus forte que la concentration en cations totaux dans la solution est plus élevée. Ainsi, le risque de sodisation relatif à une eau d'irrigation est caractérisé par deux paramètres : le SAR (Sodium Adsorption Ratio) qui rend compte du rapport entre la concentration en sodium et en alcalino-terreux, et la conductivité de l'eau appliquée (Faby et al, 2000).

➤ **Diagramme de Richards**

Richards (1954) a élaboré une classification, en se basant sur les deux paramètres à savoir (SAR et conductivité électrique). D'après le diagramme de Richards, les eaux d'irrigation, au niveau des quatre seuils de pompage appartiennent à la même classe d'aptitude à l'irrigation ; la classe  $C_3 S_1$  (Fig.27), elles sont de qualité admissible, en générale, convenant à l'irrigation des cultures tolérantes aux sels sur des sols bien drainés. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée.

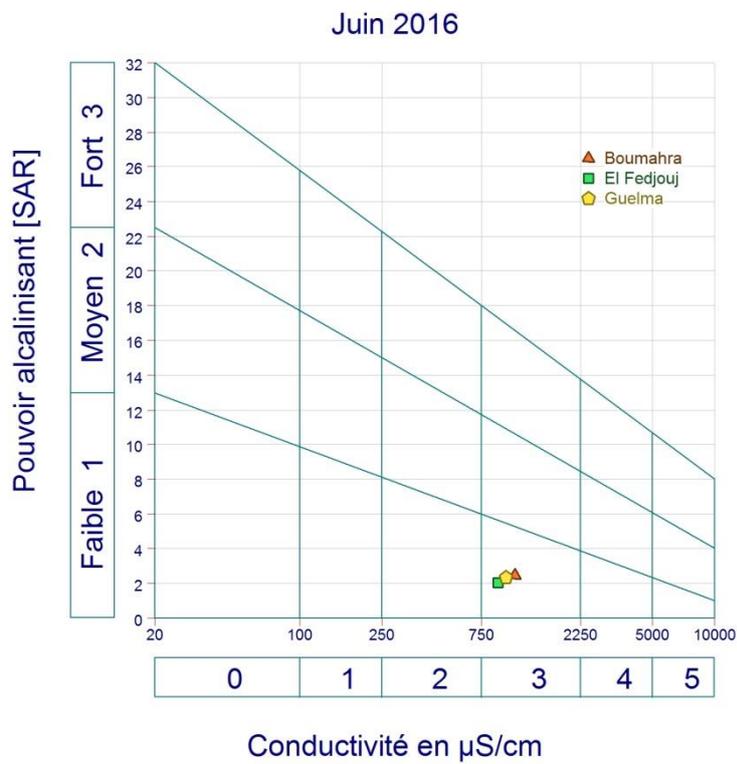
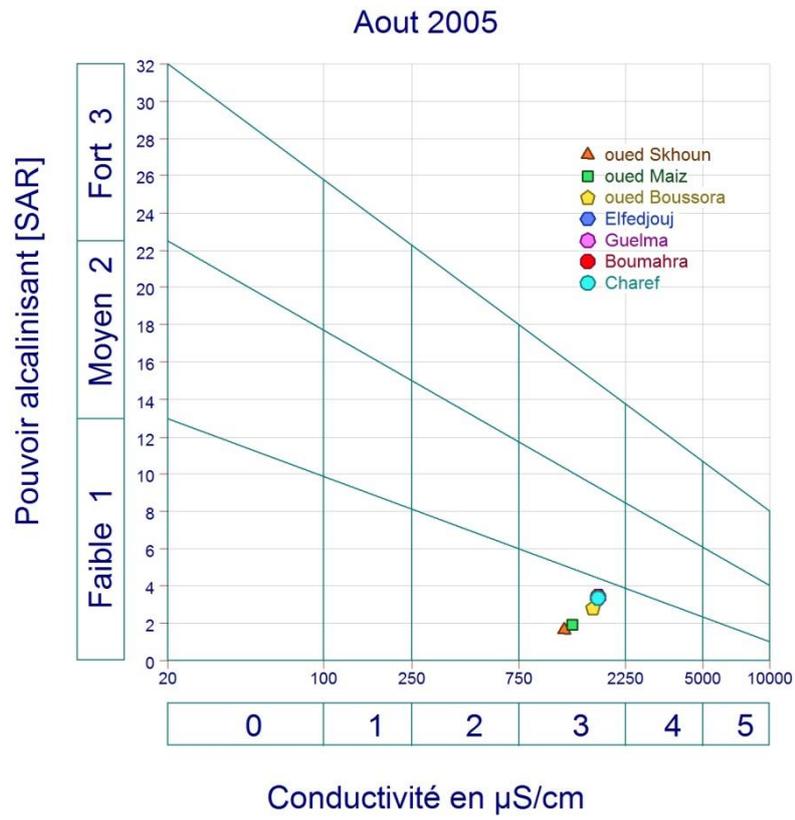
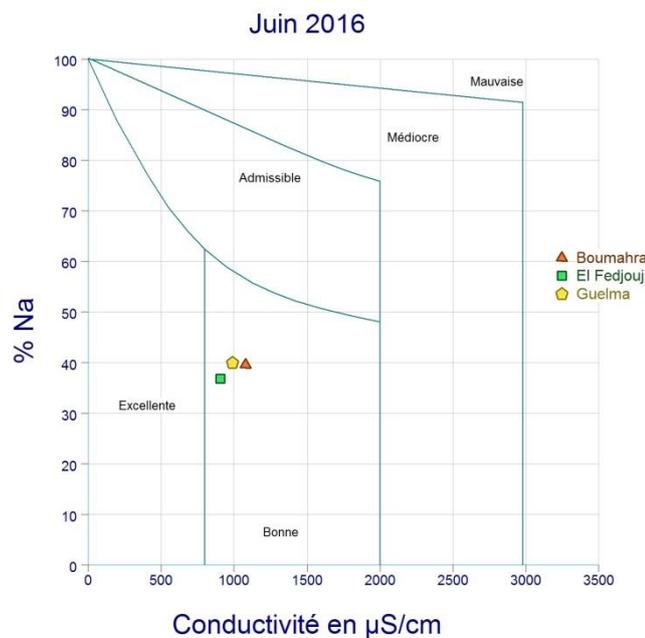
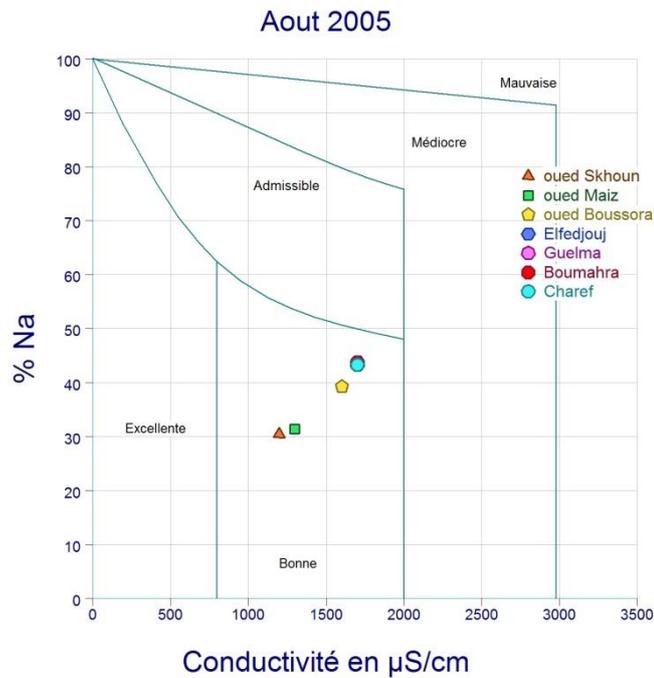


Figure 27. Classification des eaux de surface d'après le diagramme de Richards (Riverside).

➤ **Diagramme de Wilcox**

La classification de Wilcox est fondée sur la combinaison de la teneur en sodium dans l'eau et la conductivité électrique, généralement connue en %. Cette classification définit cinq classes : excellente, bonne, admissible, médiocre et mauvaise.



**Figure 28.** Classification des eaux d'irrigation d'après le diagramme de Wilcox.

Selon la classification de Wilcox, les eaux d'irrigation sont de bonne qualité.

### III.4.3. Les éléments métalliques en traces

Certains éléments traces, peu nombreux, tels que le bore, le fer, le manganèse, le zinc, le cuivre et le molybdène, sont reconnus nécessaires au développement des végétaux à de très faibles teneurs.

L'irrigation, à partir des eaux usées, va apporter ces éléments mais aussi d'autres oligo-éléments non indispensables à la plante tels que le plomb, le mercure, le chrome, le fluor, l'aluminium, le cadmium, le sélénium et l'étain (Faby et al, 2000) (Tab. 16).

**Tableau 16.** Importance des éléments traces vis-à-vis des plantes (Stengel et al, 1998)

Elément	cadmium Cd	chrome Cr	cuivre Cu	fer Fe	manganèse Mn	nickel Ni	plomb Pb	zinc Zn	mercure Hg
Indispensable ou bénéfique pour les plantes	non	non	oui	oui	oui	oui	Non	oui	non
Toxicité envers les plantes	oui	oui surtout $Cr^{VI}$	oui	-	oui, surtout si $pH < 5$ et teneur élevée	oui	Oui	oui à teneur très élevée	non

**Tableau 16.** Importance des éléments traces vis-à-vis des plantes (Stengel et al, 1998)

En considérant plus particulièrement les écosystèmes sols, des concentrations excessives en éléments traces induisent des dysfonctionnements d'ordre biologique (Stengel et al, 1998). Certains éléments sont très toxiques pour la croissance des récoltes (HACH COMPANY, 1993). La phytotoxicité sublétales due aux éléments traces s'expriment par des changements des métabolismes. La phytotoxicité aiguë se manifeste par des symptômes de chlorose, une chute de la biomasse aérienne, ou le développement limité des racines, qui signifient toujours des pertes au niveau des cultures (Stengel et al, 1998).

De ce fait, une eau d'irrigation doit être conforme aux recommandations (Tab.16), pour qu'il n'y ait pas de risque. Ces niveaux ne doivent normalement endommager ni les plantes ni les sols.

**Tableau 17.** Concentrations maximales en éléments traces recommandées pour les eaux d'irrigation (Ayers et Westcot, 1985).

Elément	Symbole	Utilisation à long terme	Utilisation à court terme
		eaux utilisées en permanence pour tous les types de sol (mg/l)	utilisation allant jusqu'à 20 ans sur des sols à texture fine ayant un pH de 6 à 8,5 (mg/l)
Aluminium	Al	5	20
Arsenic	As	0,1	2
Béryllium	Be	0,1	0,5
Bore	B	1	2,5
Cadmium	Cd	0,01	0,05
Chrome	Cr	0,1	1
Cobalt	Co	0,05	5
Cuivre	Cu	0,2	5
Fluorure	F	1	15
Fer	Fe	5	20
Plomb	Pb	5	10
Lithium <sup>(1)</sup>	Li	2,05	2,5
Manganèse	Mn	0,2	10
Molybdène	Mo	0,01	0,05 <sup>(2)</sup>
Nickel	Ni	0,1	2
Sélénium	Se	0,02	0,02
Vanadium	V	0,2	1
Zinc	Zn	2	10

1) : La concentration maximale recommandée pour l'irrigation des agrumes est de 0,075 mg/l.

(2) : Uniquement pour les sols acides à texture fine ou des sols acides à teneur relativement élevée en oxyde de fer.

Pour les deux périodes de prélèvement Mai et Août 2005, les teneurs en éléments traces métalliques, pour les quatre stations (Charef, El fedjoudj, Guelma et Boumahra Ahmed), sont inférieures aux concentrations maximales recommandées.

Au niveau de l'oued Maïz, affluent de l'oued Seybouse, on note une teneur relativement élevée en chrome (0,096 mg/l), qui a pour origine l'industrie de la céramique et de la faïence.

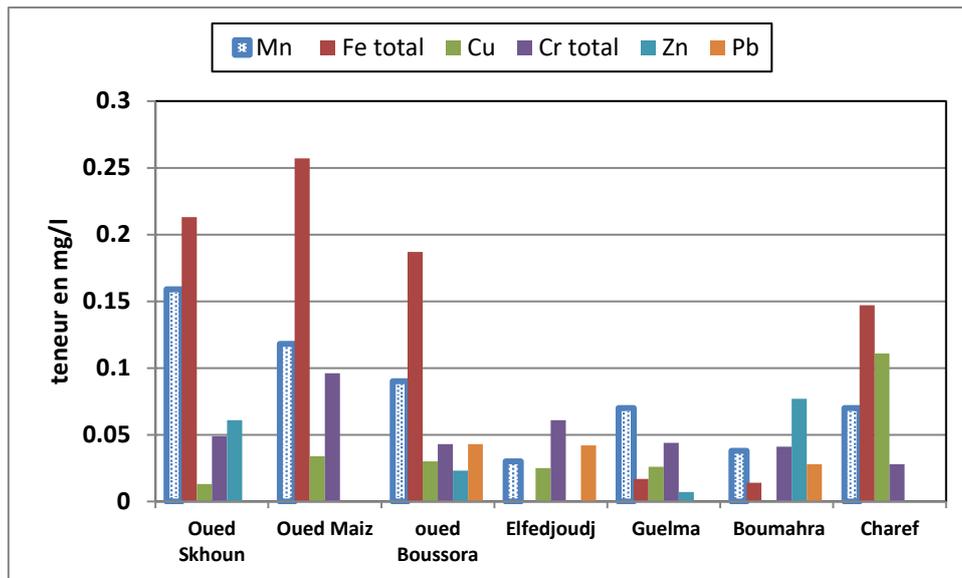


Figure 29. Teneur en éléments métalliques en traces dans les eaux de surface (Aout, 2005)

En Juin 2016, les teneurs en lithium et en fluorure sont aussi inférieures aux concentrations maximales recommandées (Fig. 30).

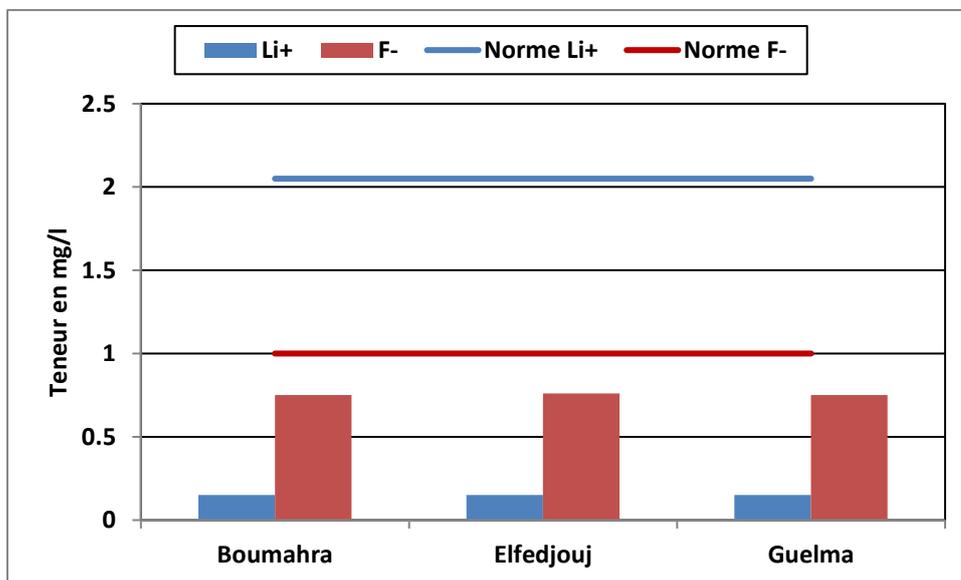


Figure 30. Teneur en élément en trace aux stations d'irrigation, juin 2016.

#### III.4.4. Substances nutritives

L'azote, le phosphore, le potassium et les oligo-éléments, le zinc, le bore et le soufre, sont indispensables à la vie des végétaux, se trouvent en quantité appréciables, mais en proportions très variables par rapport aux besoins de la végétation. Dans certaines circonstances, ces

éléments peuvent être en excès par rapport aux besoins de la plante et provoquer des effets néfastes, aussi bien pour les cultures que pour les sols.

L'azote en quantité excessive peut perturber certaines productions, retarder la maturation de certaines cultures, accentuer la sensibilité des cultures aux maladies (Faby et al, 2000).

#### **III.4.4.1. Les nitrates**

Au mois de mai, au niveau des seuils de pompage des eaux d'irrigation, les valeurs des nitrates sont entre 23 et 37 mg/l. Le seuil de Guelma, montre la plus grande teneur (37 mg/l), suivi par le seuil Boumahra (31 mg/l). Ces teneurs en nitrates mettent en valeur les eaux d'irrigation et augmentent le bénéfice nutritionnel pour les cultures, il est donc nécessaire d'en tenir compte lors du calcul des besoins fertilisants des cultures irriguées.

Au moi d'Août, la teneur en nitrates, au niveau des seuils d'irrigation diminue et reste constante (16 mg/l).

#### **III.4.4.2. Le potassium**

Un excès de fertilisation potassique conduit à une fixation éventuelle du potassium à un état très difficilement échangeable, à une augmentation des pertes par drainage en sols légers (Faby et al, 2000).

- Au mois de mai, les apports des eaux d'irrigation en potassium sont très faibles au niveau des quatre seuils de pompage, où les teneurs ne dépassent pas les 3 mg/l.
- Au mois d'août, après les lâchées du barrage, les teneurs en potassium sont très faibles, assez semblables à celles observées au mois de mai.

#### **III.4.4. Degré de restriction à l'usage des eaux d'irrigation de l'oued Seybouse**

Les directives du FAO, pour l'interprétation de la qualité de l'eau d'irrigation, sont représentées dans le tableau 18.

**Tableau 18.** Directives d'interprétation de la qualité de l'eau pour l'irrigation (FAO, 1985, adapté)

Problème potentiel en irrigation	unité	Degré de restriction à l'usage		
		aucun	léger à modéré	sévère
Salinité CE ou ADS	ds/m mg/l	<0,7 <450	0,7-3,0 450-2000	>3,0 >2000
<u>Toxicité Spécifique des ions</u> <u>-Sodium</u> irrigation de surface irrigation par aspersion	SAR méq/l	<3 <3	3-9 >3	>9 -
<u>-Chlorure</u> irrigation de surface irrigation par aspersion	mg/l méq/l	<4 <3	3-9 >3	>10 -
<u>-Bore</u>	mg/l	<0,7	0,7-3	>3
<u>Effets divers</u> Azote (NO <sub>3</sub> -N) Bicarbonate	mg/l méq/l	<5 <1,5	5-30 1,5-8,5	>30 >8,5
pH	Gamme normale 6,5-8,4			

**Tableau 19.** Degré de restriction à l'usage des eaux d'irrigation dans les stations de pompage, selon les directives du FAO, 1985.

Degré de restriction à l'usage	Période de prélèvement	Salinité	Toxicité spécifique des ions			
			Sodium	Chlorure	Azote NO <sub>3</sub> -N	Bicarbonate
	<b>Mai 2005</b>	léger à modéré	léger à modéré	léger à modéré	léger à modéré	léger à modéré
	<b>Août 2005</b>	léger à modéré	léger à modéré	léger à modéré	aucun	léger à modéré
	<b>Juin 2016</b>	léger à modéré	léger à modéré	léger à modéré	léger à modéré	sévère

Selon les restrictions du FAO, (1985), les limites d'utilisation des eaux d'irrigation, sont légères à modérées au niveau des seuils, pour les deux périodes de prélèvement en ce qui concerne la salinité et les éléments chimiques suivants : sodium, chlorures et azote et sévère pour les bicarbonates pour la période de juin 2016.

### III.5. Etude Statistique multivariable (Aout 2005)

L'analyse multivariable donne une image synthétique de l'ensemble des données en tenant compte de leur structure interne. Les analyses multivariées facilitent l'interprétation des

données en présentant l'information contenue dans le tableau des résultats analytiques sous une forme plus condensée et généralement plus significative.

Pour décrire un ensemble d'individus (ou d'échantillons) caractérisés par plusieurs variables (ou paramètres), on peut réaliser soit:

- des analyses factorielles, pour trouver un petit nombre de variables explicatives. On distingue :

- l'analyse en composantes principales,
- l'analyse factorielle des correspondances,
- l'analyse factorielle discriminante.

- ou bien des classifications, pour grouper les individus en quelques classes distinctes. On distingue :

- la classification ascendante hiérarchique,
- les nuées dynamiques et agrégations.

### III.5.1 Analyse en composantes principales (ACP)

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode très efficace pour l'analyse de données quantitatives (continues ou discrètes) se présentant sous la forme de tableaux à M observations / N variables. Elle permet de :

- visualiser et analyser rapidement les corrélations entre les N variables,
- visualiser et analyser les M observations initialement décrites par N variables sur un graphique à deux ou trois dimensions, construit de manière à ce que la dispersion entre les données soit aussi bien préservée que possible,
- construire un ensemble de P facteurs non corrélés

Les limites de l'Analyse en Composantes Principales viennent du fait que c'est une méthode de projection et que la perte d'information, induite par la projection, peut entraîner des interprétations erronées. Des astuces permettent cependant d'éviter ces inconvénients. **(XLSTAT, 2013)**

C'est un outil très utile pour l'interprétation des données géochimiques. Elle permet de réarranger ces données d'une manière à les présenter sous une forme plus explicite quant aux processus et facteurs qui influencent la chimie des eaux **(Bekoussa, 2009)**.



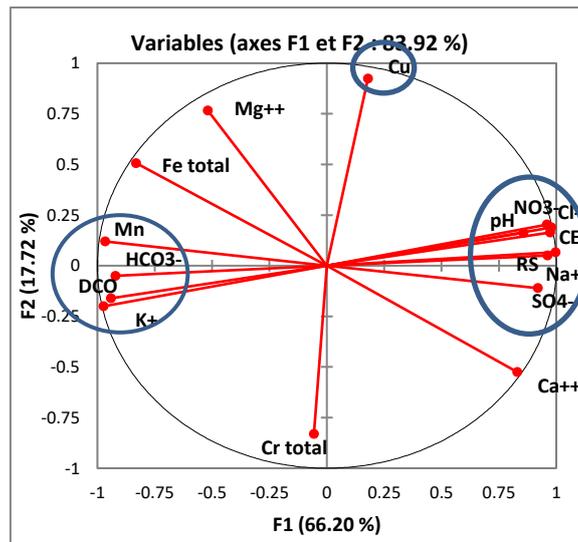
**Tableau 22.** Corrélations entre les variables et les facteurs.

	F1	F2	F3	F4	F5
Ca <sup>++</sup>	0.830	-0.525	-0.136	-0.095	-0.082
Mg <sup>++</sup>	-0.519	0.766	0.364	0.104	0.024
Na <sup>+</sup>	<b>0.997</b>	0.067	0.028	0.019	0.000
K <sup>+</sup>	<b>-0.973</b>	-0.201	-0.107	0.007	0.029
Cl <sup>-</sup>	<b>0.960</b>	0.203	0.120	0.115	-0.098
SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	<b>0.920</b>	-0.111	-0.372	-0.040	0.038
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>-0.920</b>	-0.050	0.358	-0.038	-0.145
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>0.979</b>	0.189	-0.063	0.029	0.020
pH	<b>0.857</b>	0.163	0.221	-0.044	0.433
Conductivité	<b>0.974</b>	0.164	0.097	0.064	-0.108
Mn	<b>-0.966</b>	0.120	-0.159	-0.069	-0.150
Fe total	<b>-0.831</b>	0.507	0.223	0.020	-0.055
Cu	0.179	<b>0.924</b>	-0.088	-0.275	0.177
Cr total	-0.056	<b>-0.831</b>	0.271	-0.474	0.088
Zn	-0.443	-0.411	-0.093	0.765	0.203
Pb	0.307	-0.352	0.880	0.080	0.033
DCO	<b>-0.940</b>	-0.161	-0.091	-0.185	0.218
RS	<b>0.962</b>	0.050	0.176	0.073	-0.191

**Tableau 23.** Cosinus carrés des variables

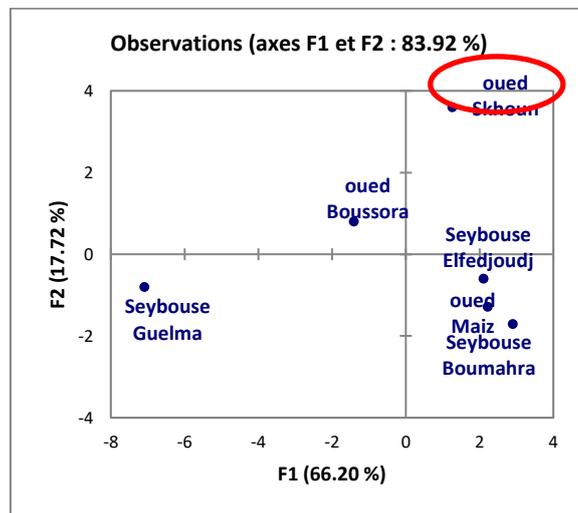
Cosinus carrés des variables :					
	F1	F2	F3	F4	F5
Ca <sup>++</sup>	<b>0.690</b>	0.276	0.019	0.009	0.007
Mg <sup>++</sup>	0.269	<b>0.587</b>	0.132	0.011	0.001
Na <sup>+</sup>	<b>0.994</b>	0.004	0.001	0.000	0.000
K <sup>+</sup>	<b>0.947</b>	0.040	0.011	0.000	0.001
Cl <sup>-</sup>	<b>0.922</b>	0.041	0.014	0.013	0.010
SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	<b>0.846</b>	0.012	0.139	0.002	0.001
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>0.847</b>	0.002	0.128	0.001	0.021
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>0.959</b>	0.036	0.004	0.001	0.000
pH	<b>0.735</b>	0.026	0.049	0.002	0.187
Conductivité	<b>0.948</b>	0.027	0.009	0.004	0.012
Mn	<b>0.933</b>	0.014	0.025	0.005	0.022
Fe total	<b>0.690</b>	0.257	0.050	0.000	0.003
Cu	0.032	<b>0.853</b>	0.008	0.076	0.031
Cr total	0.003	<b>0.691</b>	0.074	0.224	0.008
Zn	0.197	0.169	0.009	<b>0.585</b>	0.041
Pb	0.094	0.124	<b>0.774</b>	0.006	0.001
DCO	<b>0.884</b>	0.026	0.008	0.034	0.047
RS	<b>0.925</b>	0.003	0.031	0.005	0.036

Pour confirmer le fait qu'une variable est fortement liée à un facteur, il suffit de consulter la table des cosinus : plus le cosinus est élevé (en valeur absolue), plus la variable est liée à l'axe. Plus le cosinus est proche de zéro, moins la variable est liée à l'axe (**XLSTAT, 2013**).

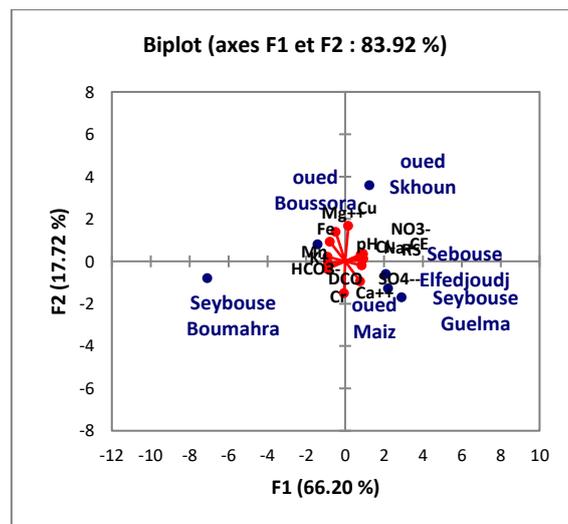


**A. Le cercle des corrélations des variables**

(Les variables significatives sont entourées d'un cercle)



**B. Projection des observations sur le plan I-II**



**C. Projection des observations et des variables sur le plan I-II**

**Figure 31.** ACP des eaux de surface de la plaine de Guelma, Aout 2005.

### III.5.1.1 ACP après rotation orthogonale Varimax (Aout 2005)

La rotation Varimax normalisée est destinée à maximaliser les variances des poids factoriels normalisés pour les variables de chaque facteur. C'est une méthode fréquemment utilisée afin de faciliter l'interprétation et de faire ressortir des facteurs non visible lors de l'ACP sans rotation (Bekoussa, 2009).

Cependant, cette méthode ne montre pas de changement.

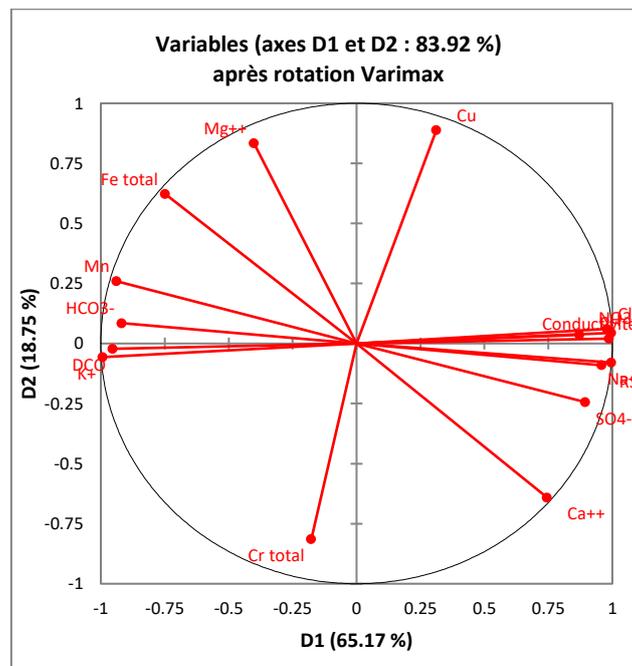


Figure 32. ACP après rotation orthogonale Varimax (Aout 2005)

Le premier plan factoriel de l'analyse en composantes principales (ACP) s'est révélé suffisant pour traduire l'essentiel de l'inertie avec 83.92 % (fig.31). L'axe 1 réunit 66.20 % de la variance totale, et le second axe 17.72 %.

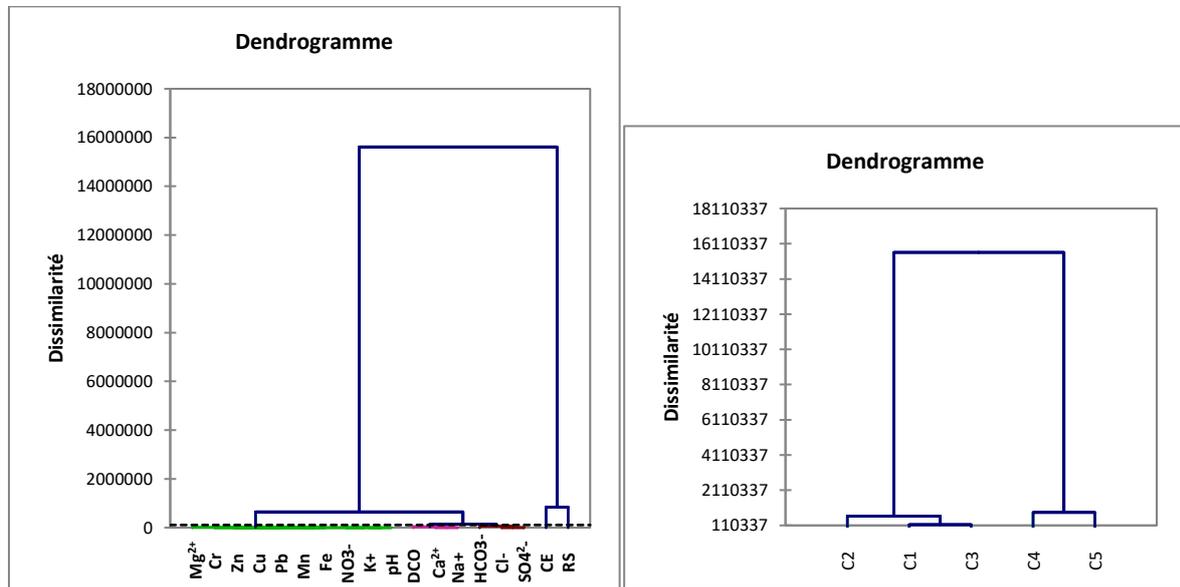
Le facteur I montre que la salinité est liée principalement au Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup> et les SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, on note que la station Oued Seybouse El fedjoudj est plus riche en ces éléments, donc sa salinité est due à la dissolution de l'halite et du gypse.

Plus en aval vers la station Seybouse Guelma, on note que cette dernière est corrélée avec DCO et Mn, traduisant une pollution organique mixte due aux rejets urbains et industriels. Aussi la bonne corrélation de cette même station avec HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et K<sup>+</sup> ne peut que refléter l'enrichissement de l'oued Seybouse en bicarbonates par le lessivage des formations carbonatées calcaires, car l'absence de corrélation avec le Ca<sup>2+</sup> est traduite par l'échange de base avec les argiles qui ont fixé le Ca<sup>2+</sup> et libéré le K<sup>+</sup>, d'où l'enrichissement de ces eaux par ce dernier.

L'axe I fait ressortir aussi la pollution de l'oued Skhoun par le Cu, dont l'origine est caractérisée par les rejets industriels.

Le Pb est absent sur ces deux axes, mais en consultant les cosinus carrés des variables (Tab. 23), on remarque que cet élément n'est pas lié à ces deux axes mais plutôt à l'axe III.

**III.5.2. Classification ascendante hiérarchique**

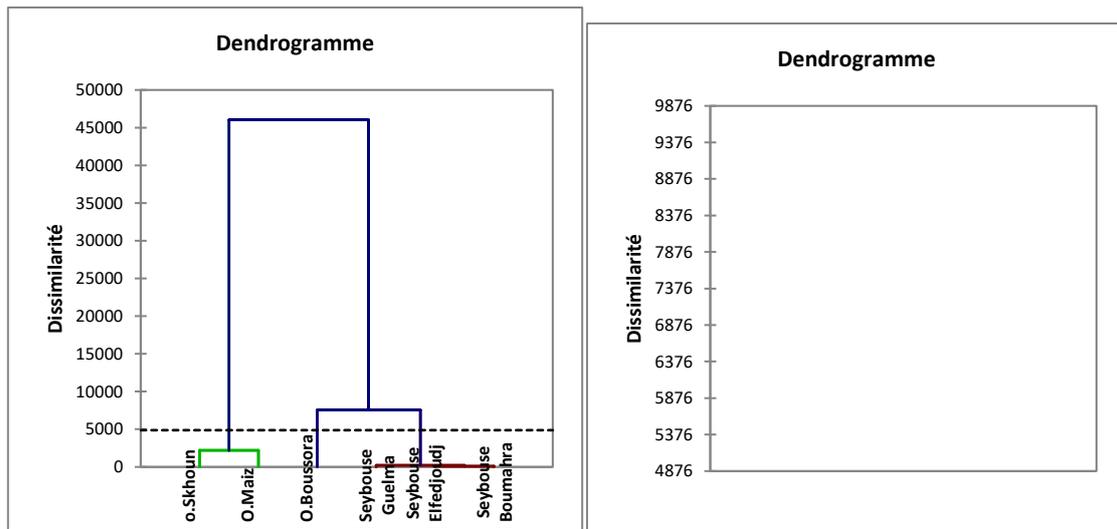


**Figure 33.** Dendrogramme des paramètres physico-chimiques (Aout 2005)

**Tableau 24.** Classe des paramètres physico-chimiques, Aout 2005.

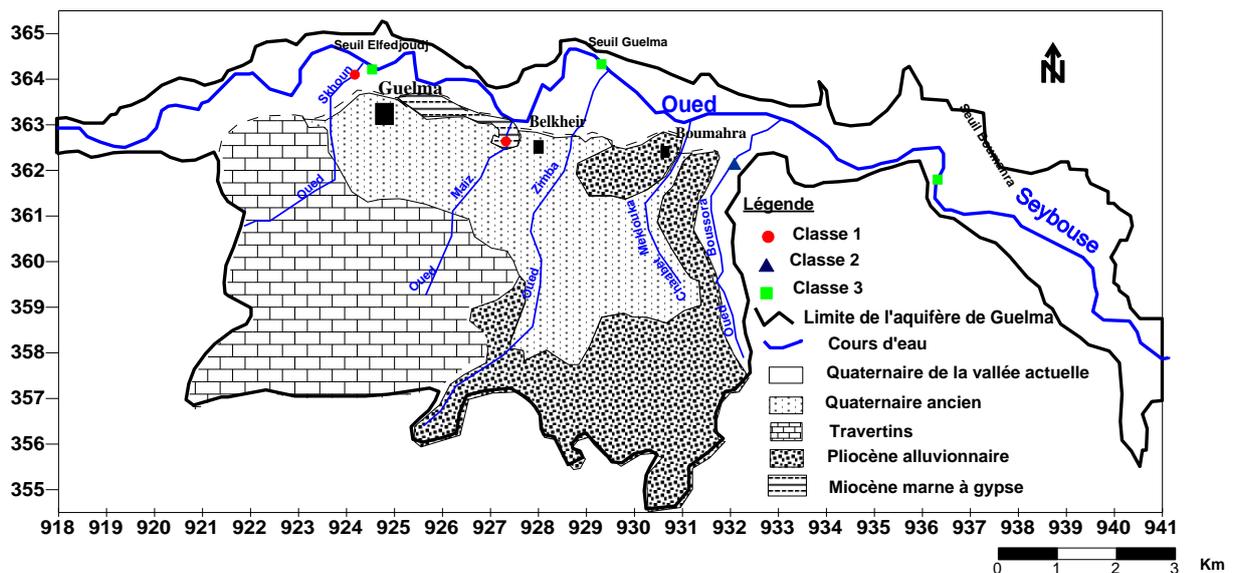
Observation	Ca <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	DCO	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	pH	Mn	Fe	Cu	Cr	Zn	Pb	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CE	RS
Classe	1			2									3			4	5	

**Tableau 24.** Classe des paramètres physico-chimiques, Aout 2005.



**Figure 34.** Classification ascendante hiérarchique des eaux de surface de la plaine de Guelma pour le mois de Juillet 2004

Le dendrogramme fait ressortir trois classes des eaux de surface bien illustré sur la carte dans la figure 26 . Il est bien évident que les affluents : oued Skhoun et oued Maiz sont les milieux récepteur des rejets et appartient à la même classe.



**Figure 35.** Carte des classes des eaux de surface de la plaine de Guelma pour le mois d’Aout 2005

### III.6. Origine des principaux éléments majeurs dans les eaux de surface de la plaine de Guelma

Pour caractériser l’état du système vis-à-vis d’un minéral présent, on utilise l’indice de saturation IS défini comme le logarithme décimal du rapport entre le produit ionique et la

constante d'équilibre de la réaction de dissolution considérée (Lalbat, 2006). Ainsi pour un minéral AB qui se dissocie en donnant  $A^+$  et  $B^-$  on a :

La réaction de dissolution



La constante d'équilibre

$$K_{AB} = [A^+]_0 \times [B^-]_0$$

Où  $[A^+]_0$  est la concentration en ions  $A^+$  et  $[B^-]_0$  de l'ion  $B^-$  respectivement à l'équilibre.

L'indice de saturation de la solution vis-à-vis du minéral AB s'écrit alors :

$$IS_{AB} = \log \left[ \frac{A^+ \cdot B^-}{K} \right]$$

Le logiciel DIAGRAMMES 5.1 qui a été utilisé pour le calcul des indices de saturation (Simler R, 2012) à partir des activités ioniques conduit aux données rapportées dans le tableau 25 et la figure 38.

Les eaux ayant des indices de saturation compris entre -0,1 et 0,1 sont considérées comme saturées, cette fourchette tient compte de l'incertitude sur les mesures relatives au pH. Les eaux dont les indices de saturation sont inférieurs à -0,1 sont considérées comme sous-saturées et les valeurs supérieures à 0,1 montrent des eaux sursaturées.

L'eau est en équilibre avec un minéral lorsque  $IS = 0$ , elle est sous-saturée lorsque  $IS < 0$  et sursaturée lorsque  $IS > 0$ . Quand une solution est sous-saturée à l'égard d'un minéral, celui-ci aura tendance à se dissoudre (Saidati Bouhlassa et al, 2008).

Généralement, Ces eaux sont sous-saturées (indice de saturation,  $IS < 0$ ) vis-à-vis du gypse et de l'halite ce qui suppose, *a priori*, une possibilité de dissolution, mais dans l'ensemble elles sont sursaturées vis-à-vis de la calcite et de la dolomite (Fig. 38).

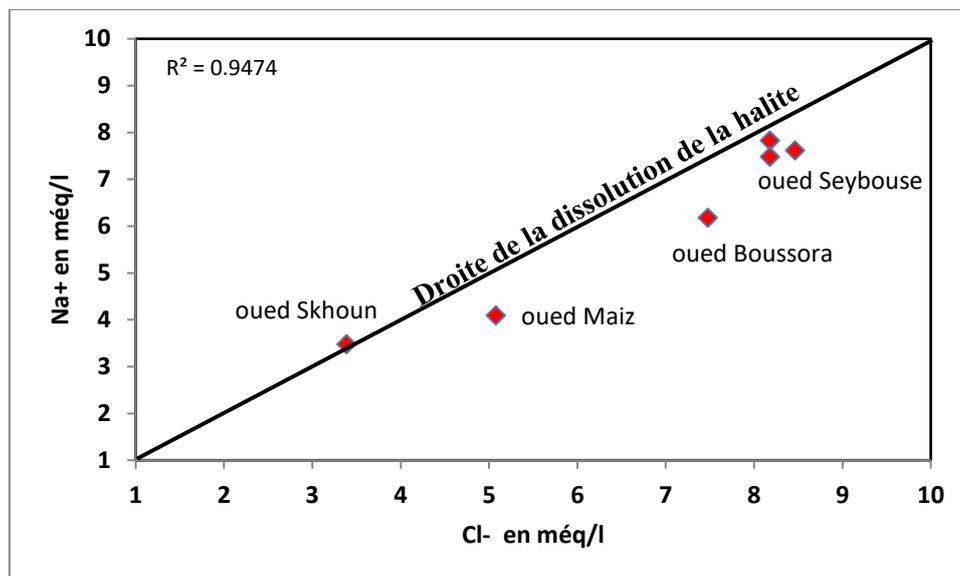
**Tableau 25.** Indices de saturation des principaux minéraux présents dans les eaux de l'oued Seybouse et ses affluents en Aout 2005

Indice de saturation	IS Anhydrite	IS Aragonite	IS Calcite	IS Dolomite	IS Gypse	IS Halite
OuedSkhoun	-1.64	-0.24	<b>-0.09</b>	<b>-0.06</b>	<b>-1.42</b>	<b>-6.63</b>
OuedMaiz	-1.65	0.21	0.35	0.78	<b>-1.43</b>	<b>-6.38</b>
OuedBoussora	-1.58	-0.05	0.1	0.31	<b>-1.36</b>	<b>-6.04</b>
Seybouse El Fedjoudj	-1.33	0.1	0.24	0.33	<b>-1.11</b>	<b>-5.91</b>
Seybouse Guelma	-1.31	-0.22	<b>-0.08</b>	<b>-0.32</b>	<b>-1.09</b>	<b>-5.92</b>
Seybouse Boumahra	-1.35	-0.07	0.08	0.04	<b>-1.13</b>	<b>-5.9</b>

L'étude de l'origine des principaux éléments majeurs présents dans les eaux de l'oued Seybouse et de ses affluents est conduite en utilisant les graphes binaires et l'analyse des indices de saturation vis-à-vis des minéraux potentiellement existant dans les eaux souterraines.

### III.6.1. Le couple $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$

Les ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$ , présents dans les eaux de surface, proviennent majoritairement de la dissolution de l'halite. Ceci est confirmé par la corrélation positive importante ( $R = 0.947$ ) qui existe entre les deux ions pour tous les échantillons analysés.



**Figure 36.** Relation entre  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  dans les eaux de surface de la plaine de Guelma (Aout 2005)

Sur le graphe binaire, représentant les ions  $\text{Cl}^-$  en fonction des ions  $\text{Na}^+$  (Fig. 36), on constate que tous les points sont près de la droite de pente 1 (droite de dissolution de l'halite) indiquant la même origine des ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  (dissolution des formations salifères), le coefficient de corrélation traduit cette liaison ( $R^2 > 0.9$ ). Le positionnement de ces points au-dessous de la droite, traduit un léger enrichissement en ions chlorures (Blum et al, 2002 ;

**Krimissa et al, 2004**). Ces chlorures peuvent avoir aussi une origine anthropique, certaines activités produisent des flux riches en chlorures (les eaux usées. Etc....) (**Kloppmann et al, 2011**), Cependant toutes les eaux usées sont déversées à l'état brut dans les oueds Skhoun et Maiz durant cette année, puisque la station d'épuration des eaux usées n'était pas encore fonctionnelle et c'est ce qui explique probablement le surplus en chlorures dans ces eaux.

### III.6.2. Les couples $\text{Ca}^{+2} / \text{SO}_4^{2-}$ et $\text{Ca}^{+2}/\text{HCO}_3^-$

Les Figures 37 et 38, montrent une bonne corrélation entre  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  ( $R^2 = 0.90$ ) et entre IS gypse et  $\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$  ( $R^2 = 0.99$ ), ce qui suppose, *a priori*, une possibilité de dissolution (**Yermani et al, 2003**), puisque ces eaux sont sous-saturées en gypse. Cependant les eaux de l'oued Seybouse ainsi que les eaux de ses affluents situées au-dessus de la droite de dissolution du gypse, sont plus riches en  $\text{Ca}^{2+}$ , cet excès a comme origine la dissolution des formations carbonatées (calcaires et dolomies), essentiellement les calcaires travertineux, qui sont traversés par les oueds Skhoun et Maiz.

Une bonne corrélation est observée aussi entre les ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{HCO}_3^-$  ( $R^2 = 0.95$ ) (Fig 37) pour l'ensemble des points analysés, on remarque toujours cet excès en  $\text{Ca}^{2+}$ , affirmant un enrichissement, dû au lessivage, non seulement des calcaires, mais aussi des formations gypsifères et dolomitiques. Cependant une mauvaise corrélation est observée entre IS Calcite et les ions  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , ce qui suppose, *a priori*, une possibilité de précipitation de la calcite.

Les points prélevés dans les affluents à l'exception de l'oued Skhoun, se positionnent au voisinage et sur de la droite de mise en solution de la calcite (Fig. 37) traduisant la même origine pour les deux éléments  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{HCO}_3^-$ , qui est la dissolution des formations carbonatées calcaires, surtout pour les eaux de l'oued Boussora (positionnement sur la droite de dissolution).

Les eaux des affluents se positionnent autour et sur de la droite de la dissolution de la dolomite, donc le  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  dans ces eaux ont la même origine qui sont les formations carbonatés dolomitiques, donc le  $\text{Ca}^{2+}$  et le  $\text{Mg}^{2+}$  des eaux de l'oued Skhoun en particulier, dont le point est situé sur la droite de dissolution de la dolomite (Fig.37), provient d'une grande partie de la dissolution des formations carbonatés dolomitiques.

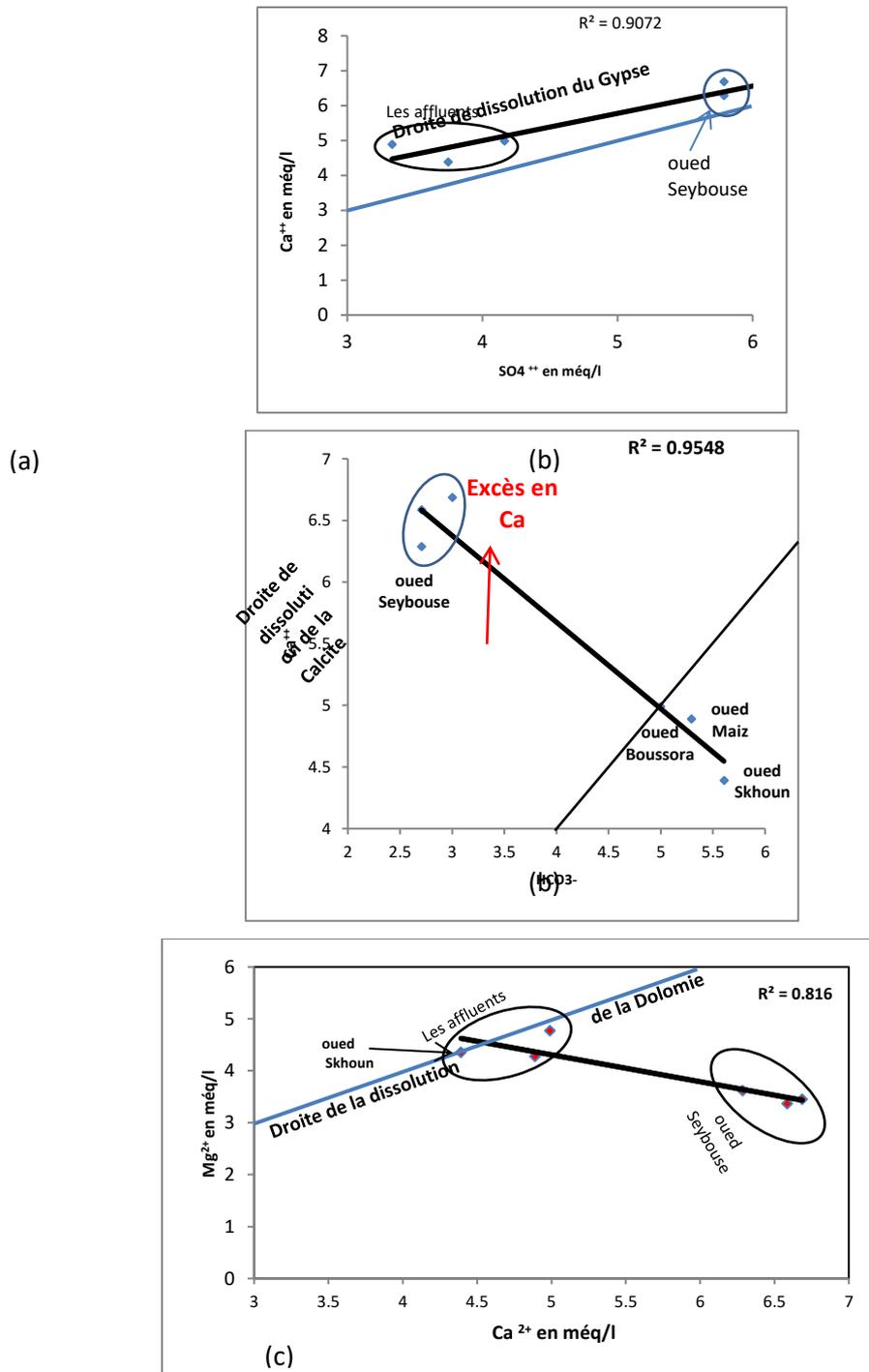
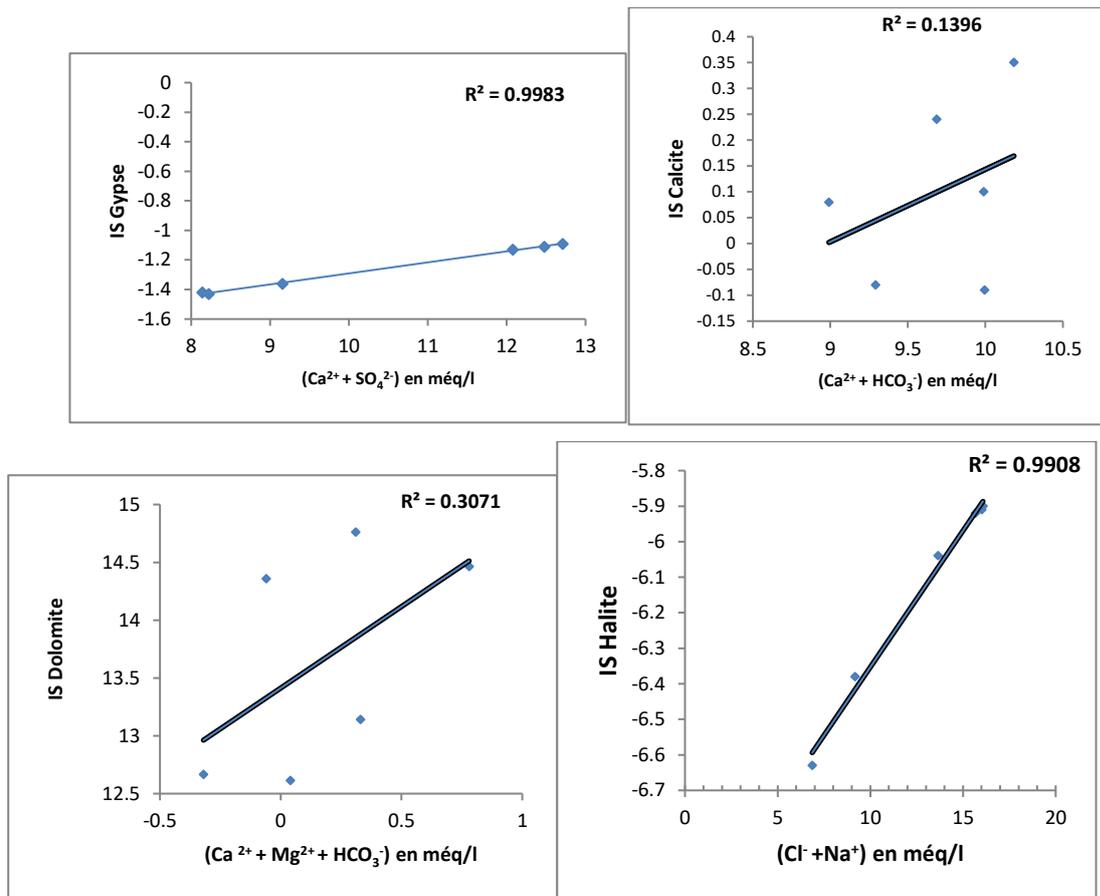


Figure 37. Distribution des échantillons d'eaux de surface par rapport à la droite de mise en solution du gypse (a), de la calcite (b) et de dolomite (c)

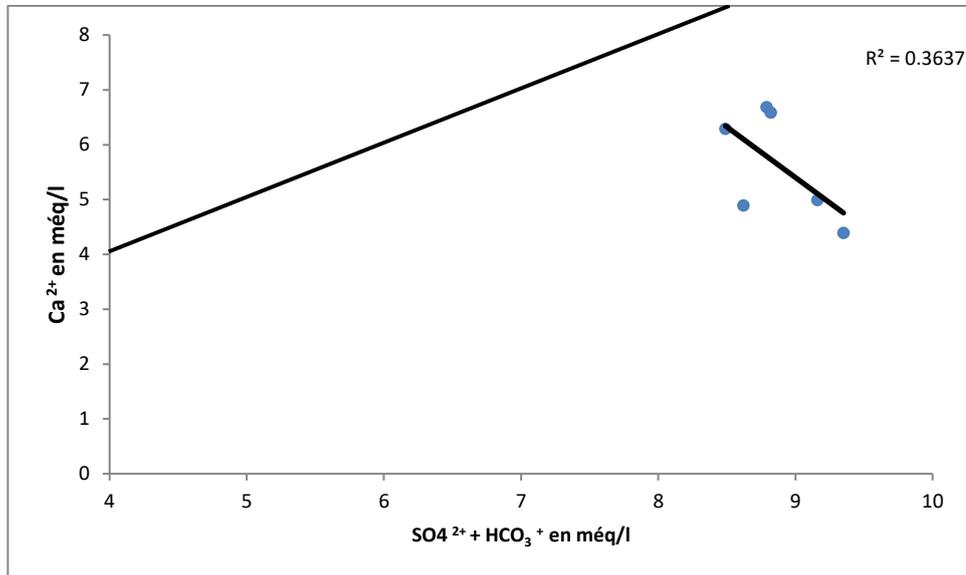


**Figure 38.** Corrélation des indices de saturation des eaux vis-à-vis du gypse, de la calcite de la dolomite et de la halite en fonction de  $Ca+SO_4$ (a),  $Ca+HCO_3$  (b),  $Ca+Mg+HCO_3$ (c) et  $Cl^- + Na^+$ (d) respectivement, dans les eaux de surface pour le mois d'Aout 2005. ( $R^2$  coefficient de détermination).

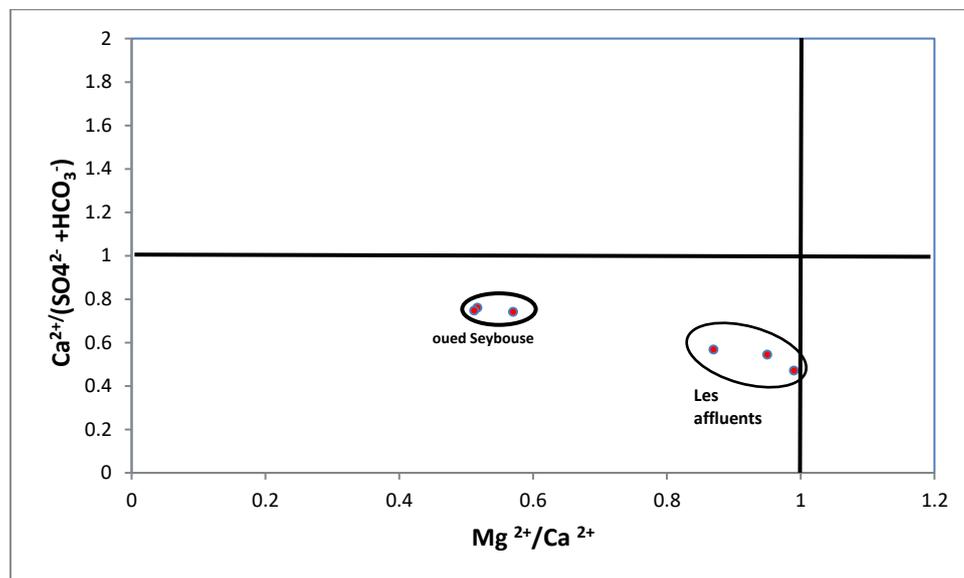
Les eaux de surface de la plaine de Guelma sont majoritairement sursaturées vis à vis de la calcite et de la dolomite, ceci indique une précipitation de ces deux minéraux dans les eaux, donc seuls les minéraux carbonatés tendent à précipiter. L'absence de corrélation entre les indices de saturation des eaux vis-à-vis de la calcite en fonction de  $Ca^{2+}+HCO_3^-$  (coefficient de détermination  $R^2 = 0.14$ ) (Fig.37) et de la dolomite en fonction de  $Ca^{2+}+Mg^{2+}+HCO_3^-$  (coefficient de détermination  $R^2 = 0.30$ ), infirme la dissolution de ces minéraux carbonatés au sein des eaux de surface de la plaine (**Bekoussa, 2009**).

Lorsque la matrice contient de la dolomite, le cristal composite  $MgCa(CO_3)_2$  peut se trouver engagé dans un processus de dissolution incongrue au cours duquel, le cristal entier est dissous avant que la calcite ne précipite à nouveau, tandis que le magnésium reste en solution en compagnie d'ion carbonate. Cela peut être le cas dans des systèmes dans lesquels, la calcite a atteint la saturation, tandis que la solution reste sous-saturée par rapport à la

dolomite. Certes, tout apport extérieur d'ions calcium, par exemple à l'occasion de la dissolution du gypse, augmentera l'état de saturation en calcite et favorise la dissolution incongruente de la dolomite (Ammary, 2007).



**Figure 39.** Relation entre Ca et HCO<sub>3</sub>+SO<sub>4</sub> pour l'ensemble des échantillons prélevés en Aout 2005.



**Figure 40.** Relation entre Ca / (HCO<sub>3</sub>+SO<sub>4</sub>) et Mg/Ca pour le mois de Aout 2005.

D'autre part, un excès en Ca<sup>2+</sup> par rapport à HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>+SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, représentant l'origine carbonatée et évaporitique (Bekoussa, 2009), ce qui n'est pas le cas pour les eaux de l'oued Seybouse et ses affluents, puisque ces eaux de surface sont plus riches en Ca<sup>2+</sup> qu'en Mg<sup>2+</sup> mais plus riches en (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>+HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) par rapport au calcium. Ceci est confirmé par la mauvaise corrélation entre le Ca<sup>2+</sup> et les HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>+SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (Fig.39).

### III.6.3 Mise en évidence des échanges de base

L'utilisation de l'indice d'échange de base (i.e.b.) permet de mettre en évidence les modifications du chimisme de l'eau au cours de son trajet. Par définition, l'i.e.b est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existants dans l'eau. Il est obtenu par la relation suivante (Schoeller, 1956).

$$i.e.b = \frac{[rCl - r(Na + K)]}{rCl}$$

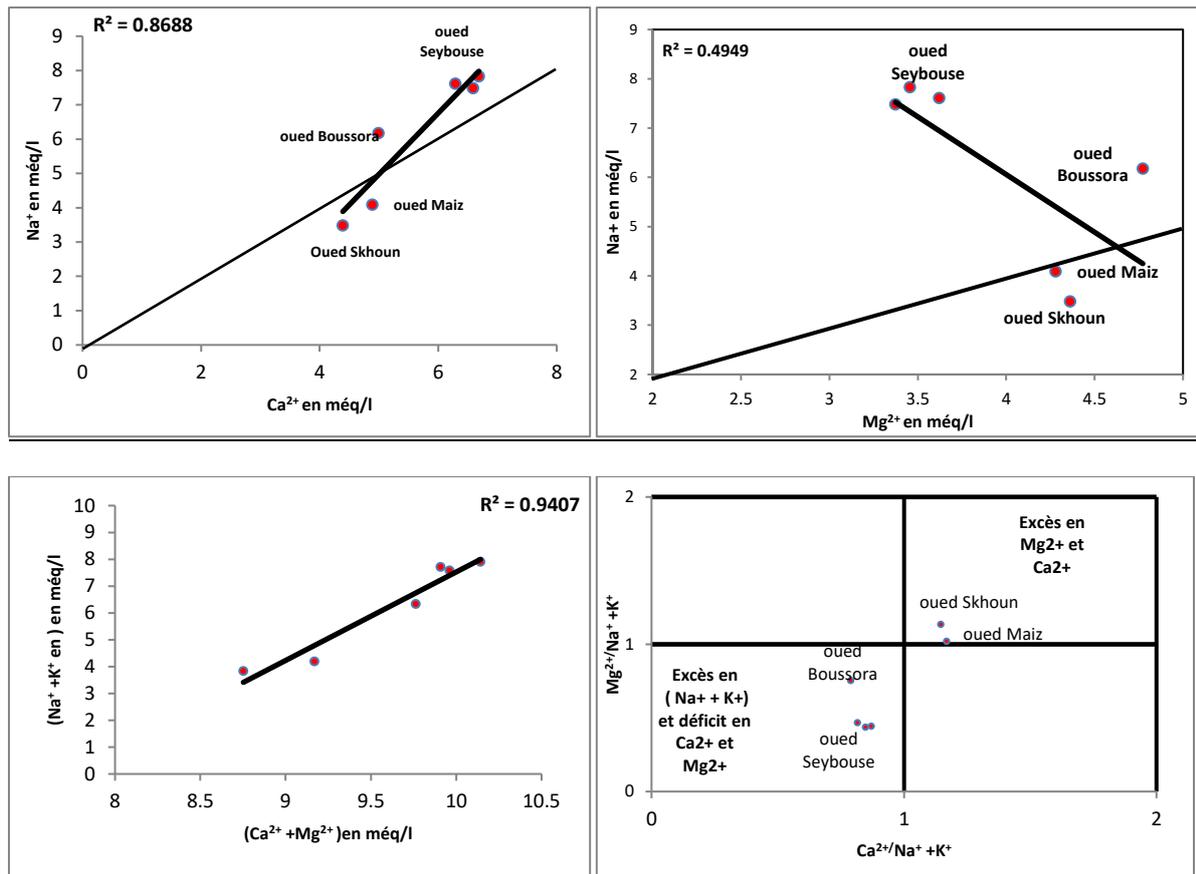
- Si l'i.e.b. est négatif alors les ions  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$  de l'eau sont échangés contre les ions  $K^+$  et  $Na^+$  des formations encaissantes.
- Si l'i.e.b. est positif alors les ions  $Na^+$  et  $K^+$  de l'eau sont remplacés par les ions  $Mg^{2+}$  et  $Ca^{2+}$  des formations encaissantes.
- Si l'i.e.b. = 0 alors il y a un équilibre entre les compositions chimiques de l'eau et celle du terrain encaissant.

**Tableau 25.** Les indices d'échange de base dans les eaux de surface

Point d'eau	i.e.b	Interprétation
Oued Skhoun	<b>-0.134</b>	$Ca^{2+}$ et $Mg^{2+}$ de l'eau sont échangés contre les ions $K^+$ et $Na^+$ des formations encaissantes.
Oued Maiz	0.174	$Na^+$ et $K^+$ de l'eau sont remplacés par les ions $Mg^{2+}$ et $Ca^{2+}$ des formations encaissantes.
oued Boussora	0.153	
Seybouse Elfedjoudj	0.033	
Seybouse Guelma	0.073	
Seybouse Boumahra	0.088	

### III.6.4 Relation entre les ions échangeables

Malgré un indice d'échange de base négatif, les eaux de l'oued Skhoun, indiquant un échange de  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$  de l'eau par le  $Na^+$  et  $K^+$  de la matrice argileuse, la figure 34, montre toujours un excès de  $Ca^{2+}$  et de  $Mg^{2+}$ , ceci est dû au fait que les eaux de l'oued Skhoun sont situées sur la droite de dissolution de la dolomite (Fig. 37), ces formations dolomitiques procurent à cette eau une concentration assez importante de ces deux éléments, où l'échange de base existe, mais n'est pas assez reflété par la valeur de l'indice de base.

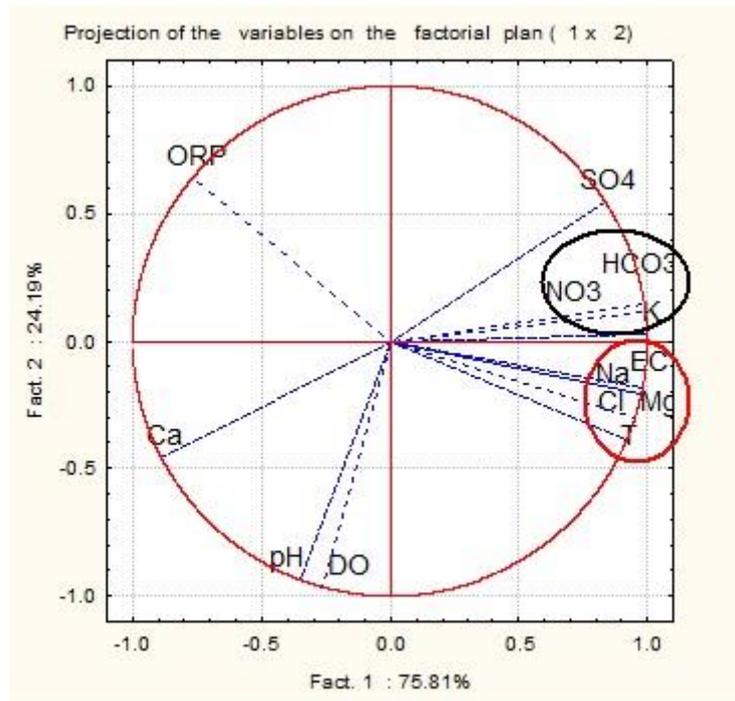


**Figure 41.** Relation entre les ions échangeables dans les eaux de surface de la plaine de Guelma en Aout 2005

Pour les eaux de l’oued Seybouse et de l’oued Boussora, on note que ces eaux s’enrichissent en Na<sup>+</sup> et en K<sup>+</sup>, malgré le fait que l’indice d’échange de base traduit la fixation de ces deux éléments par les argiles et la libération des alcalino-terreux (Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup>) (Fig.41), ceci laisse supposer que ce phénomène d’échange de base n’est pas assez important par rapport à l’apport en Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup>, dû au lessivage des formations gypsifères et carbonatées ou bien attribué à une précipitation secondaire de calcite (**Hamzoui, 2012**).

### III.6.5 Etude statistique (Juin 2016)

Nous avons réalisé à l’aide du logiciel Statistica 6, une ACP en utilisant les analyses faites en Juin 2016, avec 13 variables retenues (Fig. 42). Les résultats nous ont permis de détecter deux axes qui portent 100% de l’information contenue dans ces variables: L’axe 1 résume 75.81% de l’information et montre une corrélation positive entre le pH, l’oxygène dissous, ceci pourrait s’expliquer probablement par le processus de photosynthèse qui va provoquer l’augmentation du pH et de l’oxygène dans l’eau.



**Figure 42.** ACP des eaux d'irrigation (Juin 2016)

L'axe 2 résume 24.19 % de l'information et décrit les variables liés à la minéralisation (conductivité, Na, Cl, et Mg) ce sont essentiellement les ions Cl et Na qui sont responsables de la salinité de ces eaux d'où la bonne corrélation entre la conductivité électrique et ces deux ions avec un coefficient de corrélation  $r$  supérieur à 0.99 (Tab. 26).

Selon le même axe, on note que les nitrates sont bien corrélés au potassium (K), ( $r = 0.99$ ) traduisant la même origine essentiellement le lessivage des engrais chimiques.

**Tableau 26.** Matrice de corrélation de Pearson des paramètres physico-chimiques des eaux de surface, Juin 2016

Variable	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	NO3	OD	pH	T	Eh	EC
Ca	1.00												
Mg	-0.77	1.00											
Na	-0.77	1.00	1.00										
K	-0.90	0.97	0.97	1.00									
Cl	-0.70	1.00	1.00	0.94	1.00								
SO4	-1.00	0.70	0.70	0.85	0.63	1.00							
HCO3	-0.94	0.94	0.95	1.00	0.91	0.90	1.00						
NO3	-0.94	0.93	0.94	0.99	0.90	0.91	1.00	1.00					
OD	0.68	-0.05	-0.06	-0.29	0.04	-0.75	-0.38	-0.40	1.00				
pH	0.74	-0.14	-0.15	-0.38	-0.05	-0.81	-0.46	-0.49	1.00	1.00			
T	-0.63	0.98	0.98	0.91	1.00	0.55	0.87	0.85	0.14	0.05	1.00		
Eh	0.38	-0.89	-0.88	-0.75	-0.93	-0.29	-0.68	-0.66	-0.42	-0.33	-0.96	1.00	
EC	-0.78	1.00	1.00	0.98	0.99	0.72	0.95	0.94	-0.07	-0.17	0.98	-0.87	1.00

III.7. Degré de pollution des eaux de surface

Les résultats des analyses des eaux de surface de la plaine de Guelma concernent quatre sites le long de l’oued Seybouse et au niveau de son affluent permanent oued Maiz, qui est un collecteur des eaux usées (Fig. 43). Ces analyses ont été faites au mois de juillet 2004, dans le but d’évaluer le degré de pollution de ces eaux.

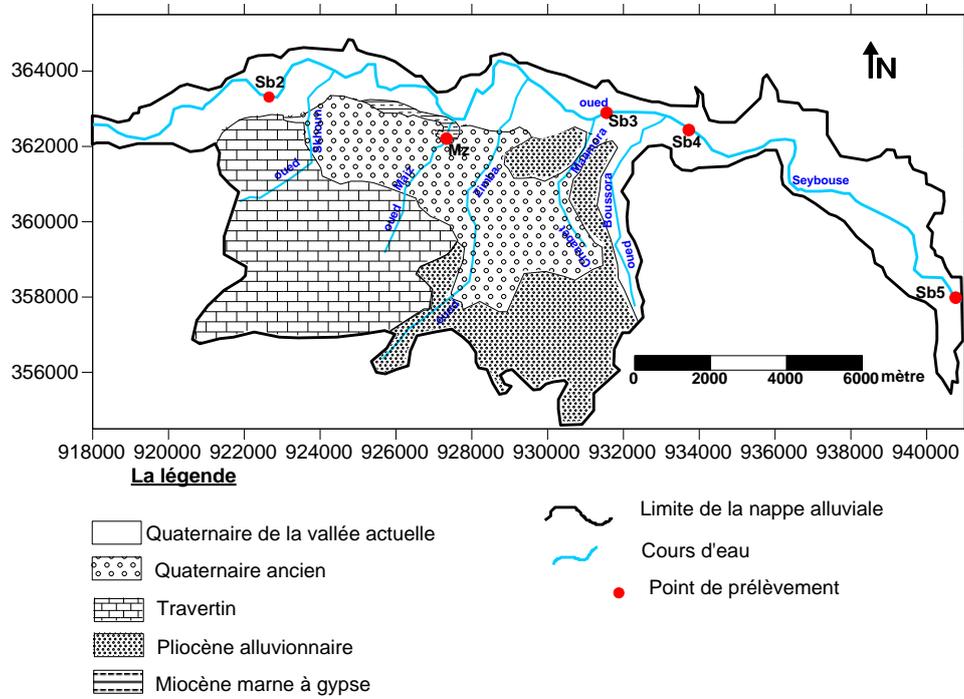


Figure 43. Stations de prélèvement des eaux de surface de la plaine de Guelma, Juillet 2004

Ces analyses ont pour but la détermination des éléments nutritifs et portent sur l’existence des 5 éléments chimiques (ammonium, nitrate, le phosphate total (Ptot) et les phosphates ( $PO_4^{3-}$ ), Chrome et phénol) qui se présentent avec des concentrations élevées et qui peuvent avoir un caractère polluant pour les eaux superficielles.

**Tableau 27.** Statistique des paramètres physico-chimique des eaux de surface de la plaine de Guelma pour le mois de Juillet 2004

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
<b>pH</b>	8.300	8.650	8.486	0.148
<b>CE (µS/cm)</b>	1478.000	1899.000	1616.000	166.042
<b>Eh(mv)</b>	43.000	66.000	54.960	9.894
<b>Oxygène dissous(mg/l)</b>	1.410	11.750	9.292	4.421
<b>MES</b>	10.000	100.000	44.000	35.071
<b>DBO5(mg/l)</b>	6.000	120.000	33.000	49.020
<b>DCO(mg/l)</b>	41.000	1510.000	379.000	637.727
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>(mg/l)</b>	0.150	0.400	0.228	0.099
<b>PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>(mg/l)</b>	0.310	49.000	11.046	21.310
<b>Phosphate total</b>	0.100	16.170	3.644	7.033
<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup>(mg/l)</b>	0.820	1.120	0.960	0.116
<b>Phénol(mg/l)</b>	1.540	4.410	3.456	1.190

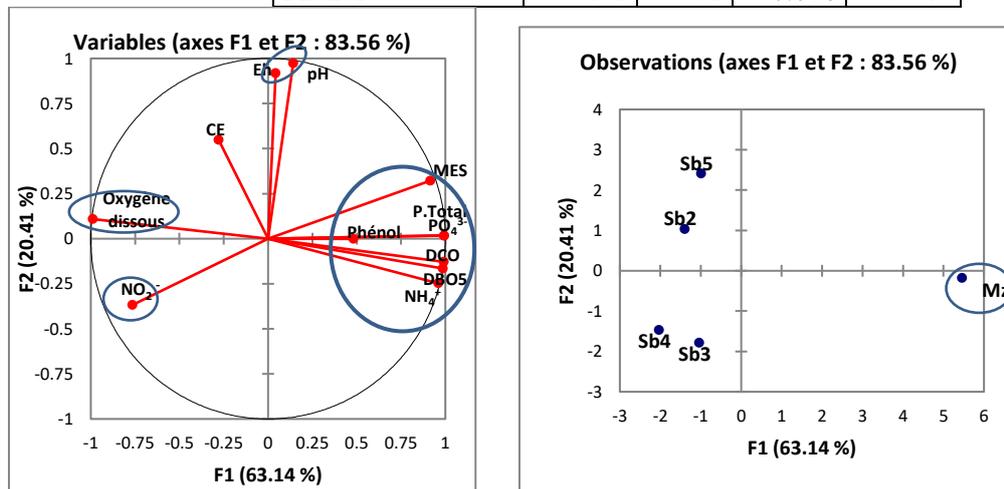
**Tableau 28.** Matrice de corrélation de Pearson des paramètres physico-chimiques des eaux de surface, Juillet 2004.

pH	1											
Conductivité électrique	0.200	1										
Eh(mv)	<u>0.970</u>	0.371	1									
Oxygène dissous	0.022	0.393	-0.052	1								
MES	0.422	-0.270	0.480	-0.886	1							
DBO5	-0.102	-0.365	-0.016	<u>-0.996</u>	0.846	1						
DCO	-0.075	-0.346	0.016	<u>-0.995</u>	0.865	<u>0.998</u>	1					
NH4+	-0.134	-0.501	-0.081	<u>-0.989</u>	0.827	<u>0.989</u>	<u>0.984</u>	1				
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0.065	-0.250	0.165	<u>-0.986</u>	<u>0.906</u>	<u>0.982</u>	<u>0.984</u>	<u>0.952</u>	1			
P. total	0.065	-0.250	0.165	<u>-0.986</u>	<u>0.906</u>	<u>0.981</u>	<u>0.984</u>	<u>0.952</u>	1.000	1		
NO2	-0.211	-0.203	-0.386	0.666	-0.762	-0.666	-0.707	-0.586	-0.721	-0.721	1	
Phénol	-0.318	0.549	-0.079	-0.403	0.232	0.466	0.477	0.347	0.482	0.482	-0.662	1
Variables	pH	CE	Eh(mv)	Oxygène dissous	MES	DBO5	DCO	NH4+	Phosphate	Phosphate total	NO2	Phénol

III.7.1 Analyse statistique multivariable

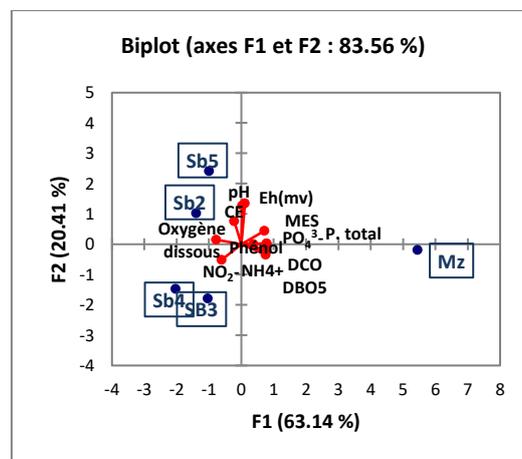
Tableau 29. Tableau des Corrélations entre les variables et les facteurs.

	F1	F2	F3	F4
pH	0.043	<b>0.919</b>	-0.388	0.054
CE	-0.279	0.548	<b>0.773</b>	0.156
Eh(mv)	0.142	<b>0.974</b>	-0.170	0.051
Oxygène dissous	<b>-0.989</b>	0.109	0.085	-0.053
MES	<b>0.915</b>	0.322	-0.233	-0.070
DBO5	<b>0.985</b>	-0.165	-0.011	0.057
DCO	<b>0.992</b>	-0.129	-0.001	0.011
NH4+	<b>0.960</b>	-0.248	-0.132	0.026
p-PO <sub>4</sub>	<b>0.993</b>	0.018	-0.001	0.116
Phosphate total	<b>0.993</b>	0.018	-0.001	0.116
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-0.765	-0.368	-0.357	0.390
Phénol	0.481	-0.001	<b>0.876</b>	0.046



A. Le cercle des corrélations des variables

B. Projection des observations sur le plan I-II



C. Projection sur le plan des variables et des observations

Figure 44. ACP des eaux de surface pour le mois de Juillet 2004

L'analyse en composantes principales des éléments nutritifs montre l'existence de deux axes principaux, présentant une variance totale de 83.56 %.

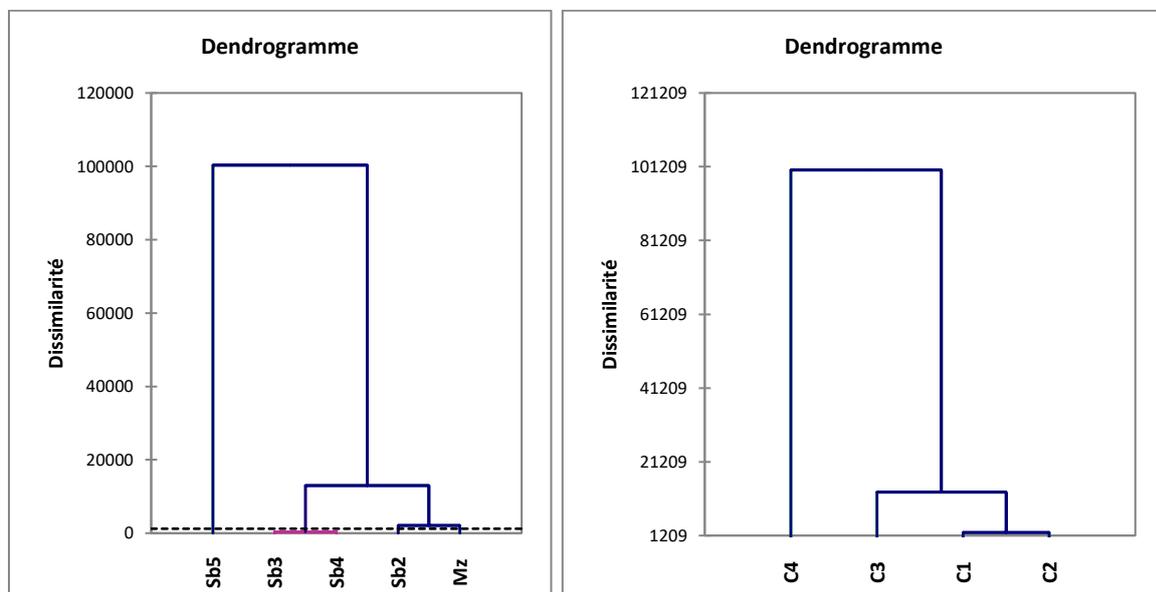
L'axe I explique 63.14 %, il est lié à la variation des phosphates totales, des orthophosphates, de l'ammonium et du phénol, et aux indicateurs de la pollution par la matière organique : DBO<sub>5</sub> et DCO. Donc cet axe indique le pôle de la pollution organique, due à l'apport des eaux usées domestiques. Cet axe présente donc le pôle de la pollution urbaine. Oued Maiz est un vecteur de cette pollution urbaine.

La projection des variables et des observations sur les plans I-II, montre trois populations qui se développent sur ces deux axes :

- La forte pollution par les nutriments (ammonium, orthophosphates) et par le phénol à la station de prélèvement de l'oued Maiz (Fig. 44).
- Les deux stations de prélèvement Ob3 et Ob4, présentent une pollution par les nitrites du probablement au lessivage des engrais chimiques, et aux rejets urbains (nitrification de l'ammonium). Les eaux de ces deux stations sont des milieux pauvres en oxygène.
- Les stations Sb2 et Sb5, sont bien corrélés avec la conductivité.

L'axe II représente 20.41 % de la variance, il présente une relation inverse entre l'évolution de l'oxygène dissous et les nitrites, la transformation de l'ammonium en nitrate, se fait par la consommation de l'oxygène par les bactéries nitrifiantes.

### III.7.2 Classification ascendante hiérarchique (CAH)



**Figure 45.** Classification ascendante hiérarchique des eaux de surface de la plaine de Guelma pour le mois de Juillet 2004

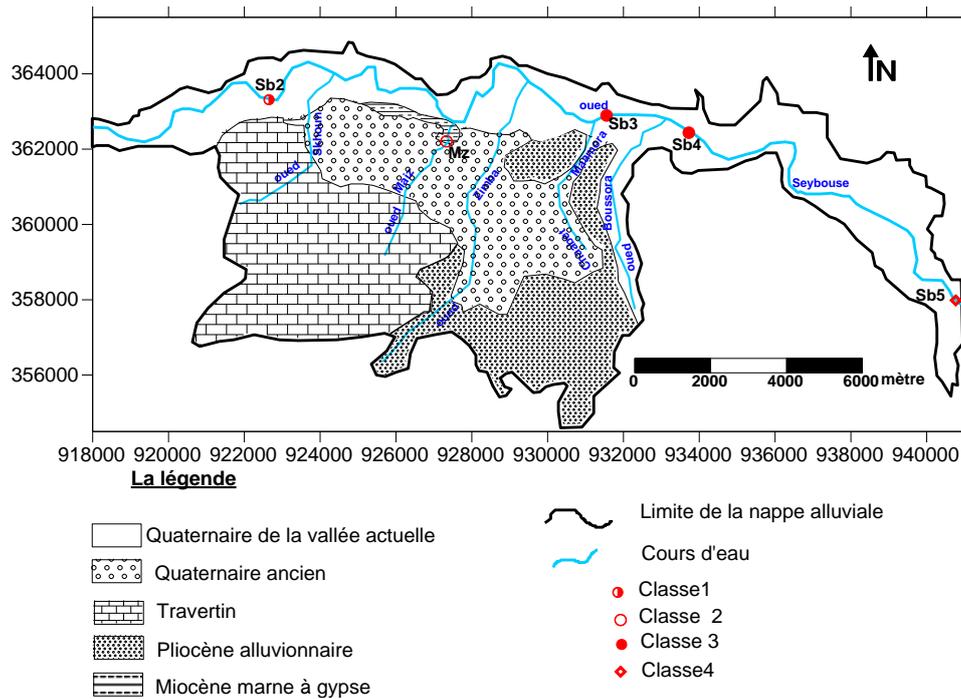


Figure 46. Carte des classes des eaux de surface pour le mois de Juillet 2004

### III.7.3. Evolution dans l'espace des polluants

Le tableau suivant traduit le degré de pollution des eaux de surface selon les normes françaises.

Tableau 30. Indicateurs chimiques de pollution des eaux de surface selon les normes françaises

	situation normale eau normale	situation douteuse eau polluée	situation anormale eau fortement polluée
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , mg/l	< 20	20 à 120	> 120
PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , mg/l		300 à 500	> 500
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , mg/l	< 0.01	0.01 à 0.1	> 1
NH <sub>4</sub> <sup>-</sup> , mg/l	< 0.01	0.01 à 0.1	> 1
Oxydabilité, mg/l O <sub>2</sub>	> 2	2 à 3	3 à 6
DBO <sub>5</sub> , mg/l O <sub>2</sub>	< 1	3 à 6	> 6

On a suivi l'évolution de ces éléments polluants dans l'espace représentée par les cinq stations de prélèvement.

### III.7.3.1 L'évolution de la conductivité électrique

La salinité des eaux de l'oued Seybouse, traduite par la conductivité électrique, augmente dans le sens de l'écoulement c'est à dire de l'amont vers l'aval. Ces eaux de surface sont salées, toutefois cette salinité atteint une valeur très élevée (1899  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) au niveau de Nador, ceci est dû au rejet urbain du village de Nador, chargé en sels de chlorure, et aussi au lessivage des formations géologiques. Ces eaux sont classées comme des eaux à salinité forte.

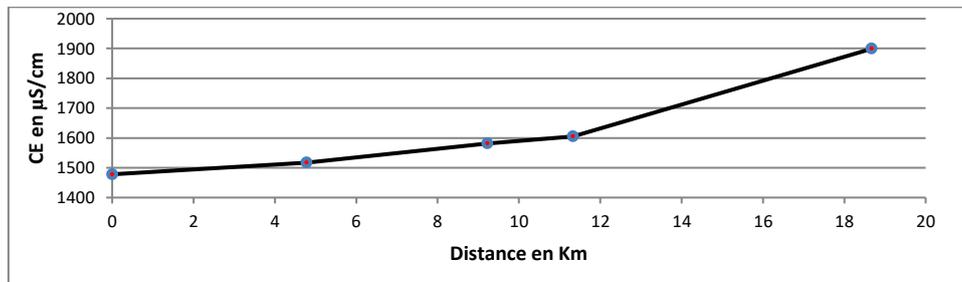


Figure 47. Evolution de la conductivité électrique des eaux de surface en juillet 2004.

### III.7.3.2 L'évolution du phénol

Le **phénol** est un solide incolore à blanc à l'état pur. Le phénol commercial est un liquide qui s'évapore plus lentement que l'eau. Il a une odeur distincte de goudron. Le phénol est aussi bien un produit chimique fabriqué et produit naturellement. Il est utilisé pour fabriquer des plastiques, utilisé comme désinfectant dans les produits d'entretien ménager et des produits de d'hygiène.

Pour le comportement du phénol dans les milieux aquatique, il est plus lourd que l'eau et tend à se déposer. Il se dissout lentement et, même dilué, continue de former des solutions toxiques.

Concernant sa toxicologie l'ingestion de liquide contenant du phénol concentrée peut entraîner de graves lésions gastro-intestinales et même la mort.

Sa dégradation dans les eaux de surface est de 90% en 7 jours environ (eaux stagnantes), et de 1 jour environ dans le sol sous l'effet de la microflore (**Rippen, 1989**)

Les valeurs limites de pollution dans les eaux de surface est de 0.005 mg/l.

### III.7.3.3 Evolution des Phosphates

L'origine des phosphates est liée à la matière organique (1 à 2 g/per/jour dans les sels), lessive et engrais.

Les matières organiques présentes dans les eaux usées sont constituées essentiellement de la gamme des glucides, protides, et lipides. L'oxydation de la matière organique nécessite la présence de l'oxygène. Si les sources d'oxygène sont suffisantes, l'oxydation de la matière organique peut être complète en donnant du gaz carbonique, de l'eau et des composés minéraux, c'est la biodégradation. Ainsi les bactéries dégradent les matières organiques

contenues dans les eaux usées et minéralisent les résidus de façon à ce qu'il ne reste que des nitrates, des phosphates, des sulfates,

Dans les eaux usées domestiques le phosphore est présent sous deux formes. Une forme minérale représentée par le phosphate ( $\text{PO}_4^{2-}$ ) provenant essentiellement des détergents et une forme organique d'origine biologique provenant essentiellement des excréments.

La teneur moyenne du phosphore dans les eaux usées domestiques est comprise entre 6 à 20 mg/l (**Coste et Loudet, 1987**).

Le phosphate est un polluant à effet d'eutrophisation lorsqu'il se trouve en abondance dans les eaux.

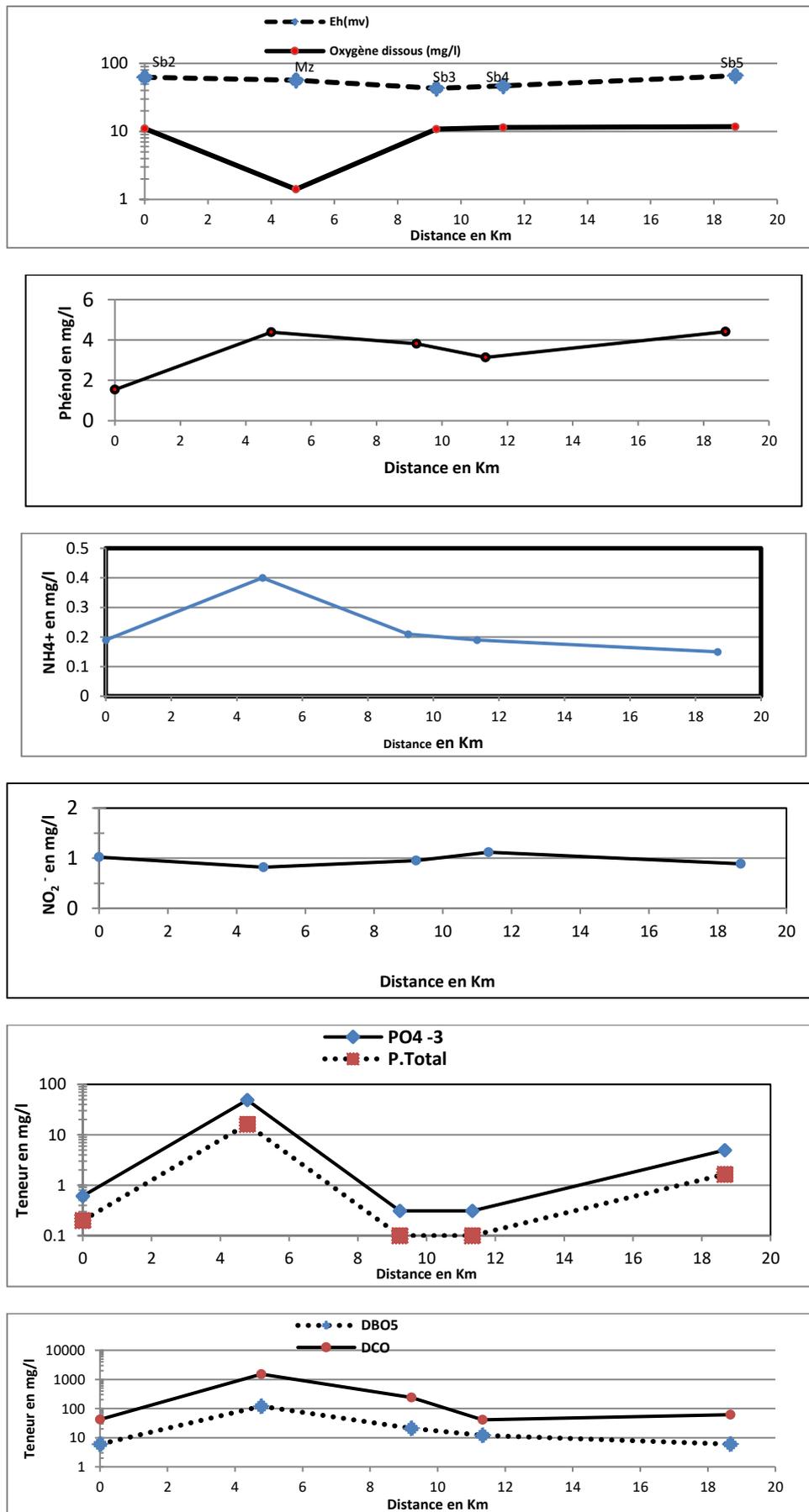


Figure 48. Evolution spatiale des éléments chimiques au niveau de l’oued Seybouse (Juillet, 2004).

### III.7.3.4 Evolution de la DCO et La DBO<sub>5</sub>

Le rapport **DCO/DBO<sub>5</sub>** renseigne sur la biodégradabilité de la matière organique. Plus ce rapport est grand plus l'effluent contient des matières difficilement dégradables.

La DBO ne concerne que la matière organique à l'exclusion des matières azotées (**Coste et Loudet, 1987**).

Les échelles de valeur de DBO<sub>5</sub> fréquemment rencontrées sont les suivantes:

**Tableau 31.** Indicateurs chimiques de pollution des eaux de surface (issue de norme françaises)

Situation	DBO <sub>5</sub> , en mg/l d'O <sub>2</sub>
eau naturelle pure et vive	< 1
rivière légèrement polluée	1 < c < 3
égout	100 < c < 400
rejet station d'épuration	20 < c < 40

La station de prélèvement au niveau de l'oued Maiz (Mz), présente une DBO<sub>5</sub> élevée (120 mg/l), ces eaux montrent les caractéristiques d'un égout. Pour les autres stations les teneurs correspondent à des eaux fortement polluées (DBO<sub>5</sub> > 6 mg/l)

### III.7.3.5 Evolution de l'oxygène dissous et du potentiel redox

La quantité d'oxygène en solution dans une eau régit les réactions d'oxydoréduction et présente une évolution identique à celle du Eh.

Les eaux de surface sont moins influencées par les variations de Eh, cela est dû au contact direct permanent avec l'air qui permet une oxygénation des eaux (**Debieche, 2002**).

Les valeurs d'Eh sont très faibles dans les eaux de l'oued Seybouse (66 – 43 mV), ceci est lié aux rejets organiques (urbains) qui font diminuer l'oxygénation de l'eau de l'oued en consommant l'oxygène.

### III.7.3.6 L'évolution de l'ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)

Dans les eaux usées, l'azote est présent essentiellement sous forme d'azote organique (urines et protéines) et d'azote ammoniacal NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Les teneurs en nitrate et nitrite sont très faibles dans les effluents bruts.

L'azote contenu dans les eaux usées domestiques provient essentiellement des excréctions humaines et principalement sous forme d'urée. En effet, il est apporté pour près des 3/4 par l'urée qui s'hydrolyse rapidement en ammoniacque (**Bechac et al, 1984**).

L'ammonium est la forme d'azote la plus toxique. Sa présence dans l'eau est liée aux rejets urbains et industriels.

Les cinq stations de prélèvement indiquent une contamination des eaux, car elles sont polluées par l'azote ammoniacal. La teneur la plus élevée est observée au niveau de l'oued Maiz où un volume important d'eau usée brute est déversé dans cet affluent.

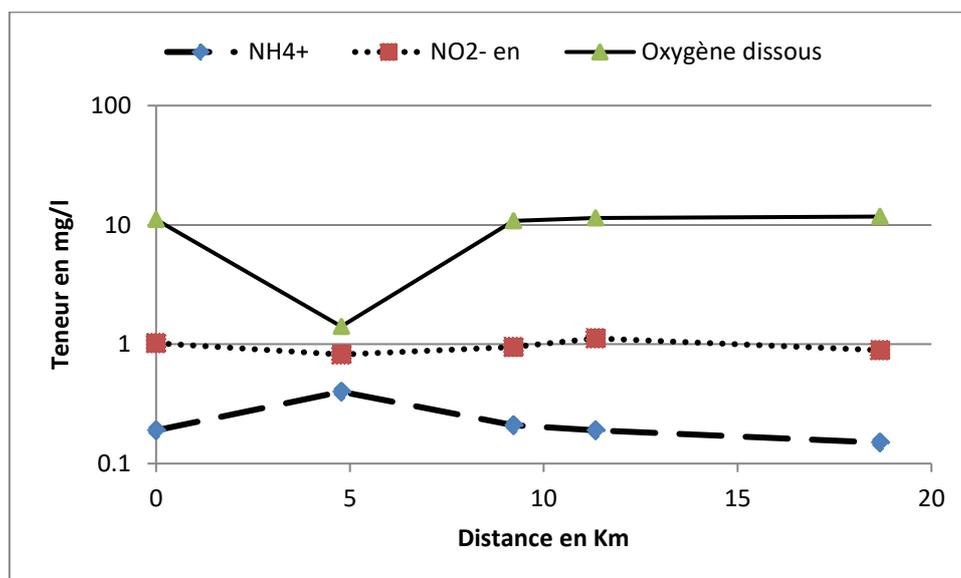
### III.7.3.7 Evolution des nitrites

Les nitrites  $\text{NO}_2^-$  ou azote nitreux, représentent une forme moins oxygénée et moins stable, c'est une forme toxique.

Les ions nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ) sont à un stade intermédiaire entre l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) et les ions nitrates  $^2$  ( $\text{NO}_3^-$ ). Les bactéries nitrifiantes (nitrosomonas) transforment l'ammonium en nitrites. Cette opération, qui nécessite une forte consommation d'oxygène, est la nitritation. Les nitrites proviennent de la réduction bactérienne des nitrates, appelée dénitrification.

Les stations Sb2 et Sb4 sont fortement polluées par les nitrites, les teneurs sont respectivement 1.02 et 1.12 mg/l. Le point de prélèvement Sb2 est situé à quelques mètres de la confluence de l'oued Skhoun avec l'oued Seybouse. Cet affluent est le milieu récepteur des eaux usées brutes. Pour la station Sb4, elle est située près de la commune de Djeballa Khemissi, ce qui suppose une pollution par les eaux usées urbaines de cette agglomération. Pour les stations Mz, Sb3 et Sb5, les teneurs en nitrites sont aussi inquiétantes, dépassant de loin les intervalles des eaux de surfaces polluées fixées entre 0.01 et 0.1 mg/l.

La réduction (manque d'oxygène) peut avoir comme cause un excès de nourriture et conduit à la transformation en ammonium et en nitrites. Une eau chargée en substances nutritives est toujours le siège d'un potentiel redox bas, alors qu'une eau propre est le siège d'un potentiel haut. Une mesure de potentiel redox positive indique qu'une substance est un agent oxydant. Plus la mesure est élevée, plus elle est oxydante.



**Figure 49.** Evolution de l'azote ammoniacal, des nitrites et de l'oxygène dissous dans les eaux de surface de la plaine de Guelma en Juillet 2004.

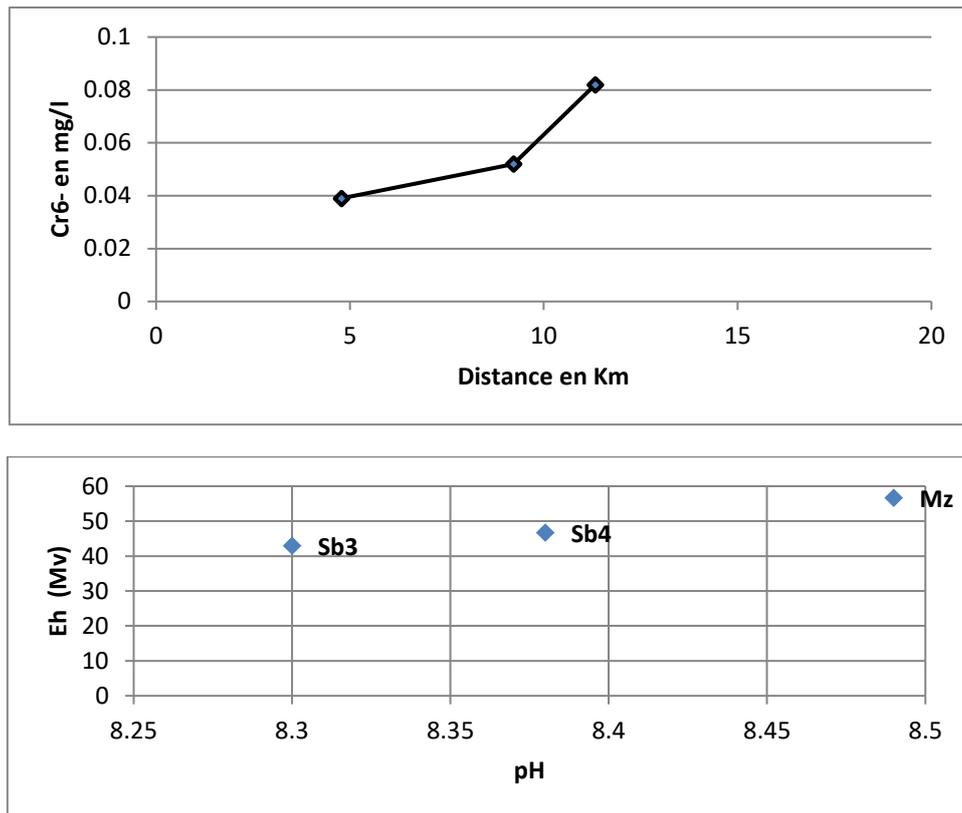
La figure 49 montre une évolution similaire des nitrites avec l'oxygène dissous, plus le milieu est pauvre en oxygène le milieu devient réducteur favorisant l'apparition de l'ammonium dont la teneur augmente. Une nette diminution de l'oxygène dissous provoque la diminution des nitrates qui se transforment en nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ) et pour enfin se réduire en  $\text{NH}_4^+$ . On assiste à un phénomène naturel : la dénitrification due probablement à la consommation de l' $\text{O}_2$  dissous par les micro-organismes présents dans l'oued. Les nitrites proviennent, soit d'une oxydation incomplète de l'ammoniaque (la nitrification n'est pas conduite à son terme), soit d'une réduction des nitrates sous l'influence d'une action dénitrifiante. Une eau qui renferme des nitrites est à considérer comme suspecte car une détérioration de la qualité biologique lui est souvent associée (Derradji, 2007).

La projection de l'azote dans le diagramme d'équilibre du potentiel redox en fonction du pH, montre qu'il se présente dans la plage de stabilité de l'ammonium  $\text{NH}_4^+$ , mais les résultats obtenus montrent que les teneurs en nitrites sont plus élevées que celles en  $\text{NH}_4^+$ . Ces présentations des espèces sur le diagramme d'équilibre (Eh, pH), ne coïncident pas avec l'état réel des espèces chimiques observées dans l'eau, surtout pour celles de l'azote qui apparaît dans l'oued par une totalité de nitrites (Fig.49), cette différence est sûrement liée à l'effet des rejets qui introduisent dans l'eau de l'oued des  $\text{NO}_2^-$  en solution dans des conditions initiales (Eh et pH) différentes à celles de l'oued. Ce qui permet à ces éléments d'apparaître dans l'eau de l'oued sous des conditions qui ne correspondent pas à l'état naturel de ces espèces chimiques.

Cela nous indique que le diagramme d'équilibre ne présente pas bien la répartition réelle des espèces chimiques dans le cas des eaux polluées sous l'effet des rejets urbains et industriels (Debieche, 2002).

### III.7.3.8 Evolution du chrome ( $\text{Cr}^{6-}$ )

L'analyse du chrome n'a concerné que seulement les trois stations de prélèvement indiquées dans la figure 50.



**Figure 50.** Evolution du chrome et du pH en fonction du potentiel redox dans les eaux de surface de la plaine de Guelma en Juillet 2004.

La projection des valeurs dans le diagramme d'équilibre du chrome (Eh en fonction du pH) indique que la diminution de l'Eh autorise une réduction totale du chrome vers la forme trivalente ( $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ), favorisant la précipitation du chrome sous la forme de  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  (Debieche, 2002).

### III.8 Pollution microbiologique

Nous avons fait une campagne de prélèvement bactériologique en juillet et Aout 2005, avant et après les lâchées du barrage de Bouhamdane, puis un deuxième prélèvement a été fait en Aout 2016, après la mise en marche de la STEP en 2008, pour voir l'amélioration apportée par cette dernière, mais malheureusement cette STEP ne traite que les eaux usées domestique de la ville de Guelma uniquement à l'exception de la cité Bourouaih. Il faut ajouter que toutes les eaux usées industrielles restent sans traitement et sont déversées actuellement à l'état brut. Aussi les eaux usées déversées en amont de la région d'étude, avant la station de pompage des eaux d'irrigation El Fedjouj, ne sont pas collectées pour traitement. Les rejets liquides des communes de Belkheir, Boumahra Ahmed et Djeballa Khemissi, située plus en aval du sous-bassin, sont aussi non traitées.

En 2005, Neuf points de prélèvement ont été choisis (Fig.55) ; au niveau des seuils d'irrigation (Charef ; située plus à l'amont de la plaine de Guelma, El fedjoudj, Guelma et la

Boumahra Ahmed), et au niveau des affluents qui sont les milieux récepteurs des rejets domestiques ; à savoir de l'amont à l'aval : oued Skhoûn, oued Maïz, oued Zimba, Chaabet Maamora et oued Boussora.

En Aout 2016, neuf points de prélèvement ont été choisis (Fig. 57). L'échantillonnage visait la détection de l'amélioration apportée par l'installation de la STEP.

Les prélèvements ont été faits dans des bouteilles en verre stérilisées, puis conservés dans une glacière portative. Les échantillons ont été acheminés directement au laboratoire de la Direction de la Santé de la ville de Guelma pour être analysés.

L'identification des coliformes totaux et des coliformes fécaux, a été faite par filtration par membrane et par fermentation en tube multiple, les streptocoques fécaux par fermentation en tube multiple.

### III.8.1. Calcul de l'indice de qualité microbiologique

Le calcul de l'indice de qualité microbiologique, se fait par le calcul de la moyenne des classes à partir du tableau des limites des classes, qui a été établi en 1980 par Bovesse et Depelchin. Cette moyenne une fois obtenue, indique les degrés de contamination microbiologique (IQM) (Djidel et al, 2008).

Les limites de classes (Tab. 32) ont été établies par BOVESSE and DEPELCHIN, 1980 (Leclercq, 2001).

**Tableau 32.** Limite des classes bactériologiques (Bovesse et Depelchin, 1980) et interprétation de la moyenne des classes

Classe n°	Bactérie tot/100ml	Coliformes fécaux/100ml	Streptocoques fécaux/100ml		
5	<200000	<10000	<500		
4	200000-900000	10000-50000	500-1000		
3	900000-4500000	50000-250000	1000-5000		
2	4500000-36000000	250000-2000000	5000-50000		
1	>36000000	>2000000	>50000		
<b>IQM</b>	<b>4,3-5,0</b>	<b>3,5-4,2</b>	<b>2,7-3,4</b>	<b>1,9-2,6</b>	<b>1,0-1,8</b>
<b>Contamination</b>	nulle	faible	modérée	forte	très forte

### III.8.2. Evolution de la charge bactérienne

En Juillet, avant les lâchées du barrage, le seuil d'irrigation d'El Fedjoudj est le plus chargé en coliformes thermo-tolérants et en coliformes fécaux (Fig. 51), ceci est dû aux apports des rejets des agglomérations en amont de cette station. A la station Guelma, on note l'absence totale de coliformes fécaux.

L'amélioration quantitative apportée aux eaux de l'oued Seybouse est accompagnée à la fois par une amélioration qualitative. On note la diminution des coliformes fécaux aux niveaux des stations d'irrigation situées à l'amont, la réduction des bactéries, indicatrice de pollution fécale, à savoir les coliformes fécaux et *Escherichia Coli*, est importante au niveau du seuil de El fedjoudj et Charef, où le taux d'abattement est très élevé, respectivement 97,77% et 97%. On n'observe aucune amélioration à la station de Boumahra qui ne semble pas être affectée par les lâchées des eaux du barrage de Hammam Debagh, à cause de l'important apport bactérien de l'oued Boussora (Fig. 52).

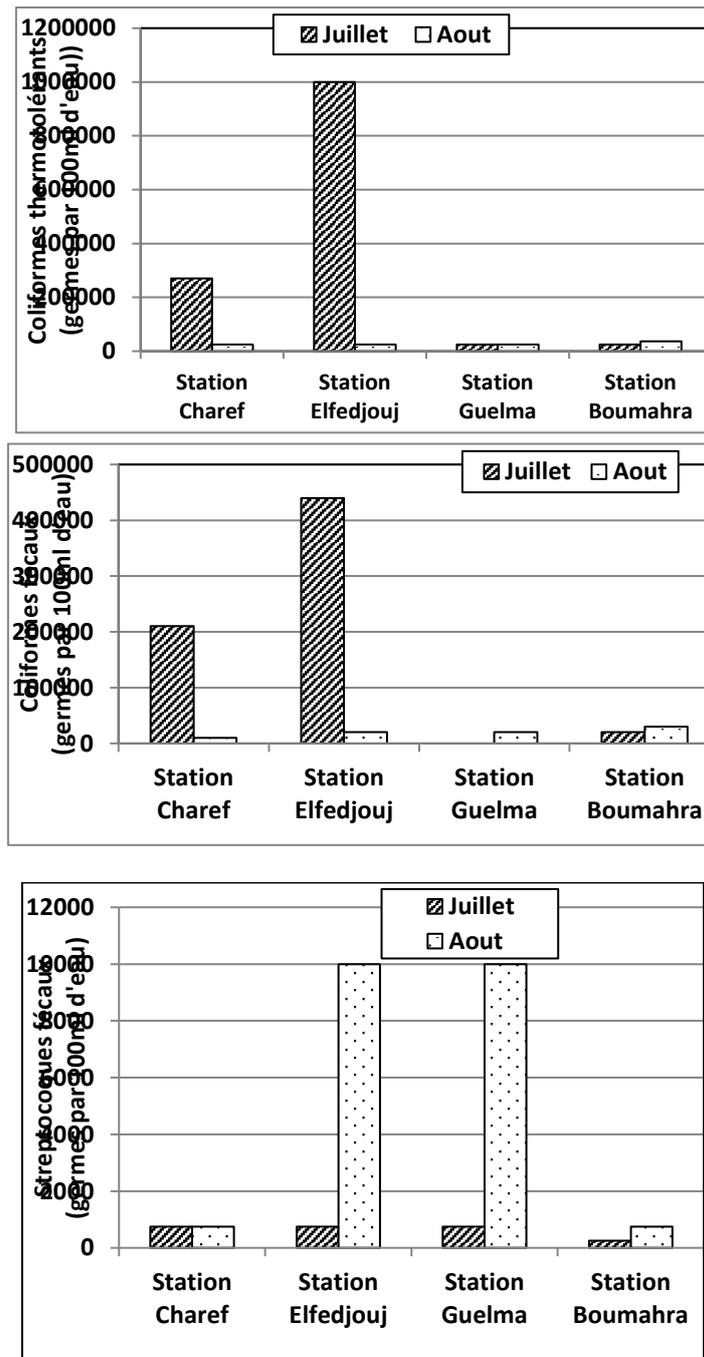


Figure 51. La charge bactérienne des stations d’irrigation (2005)

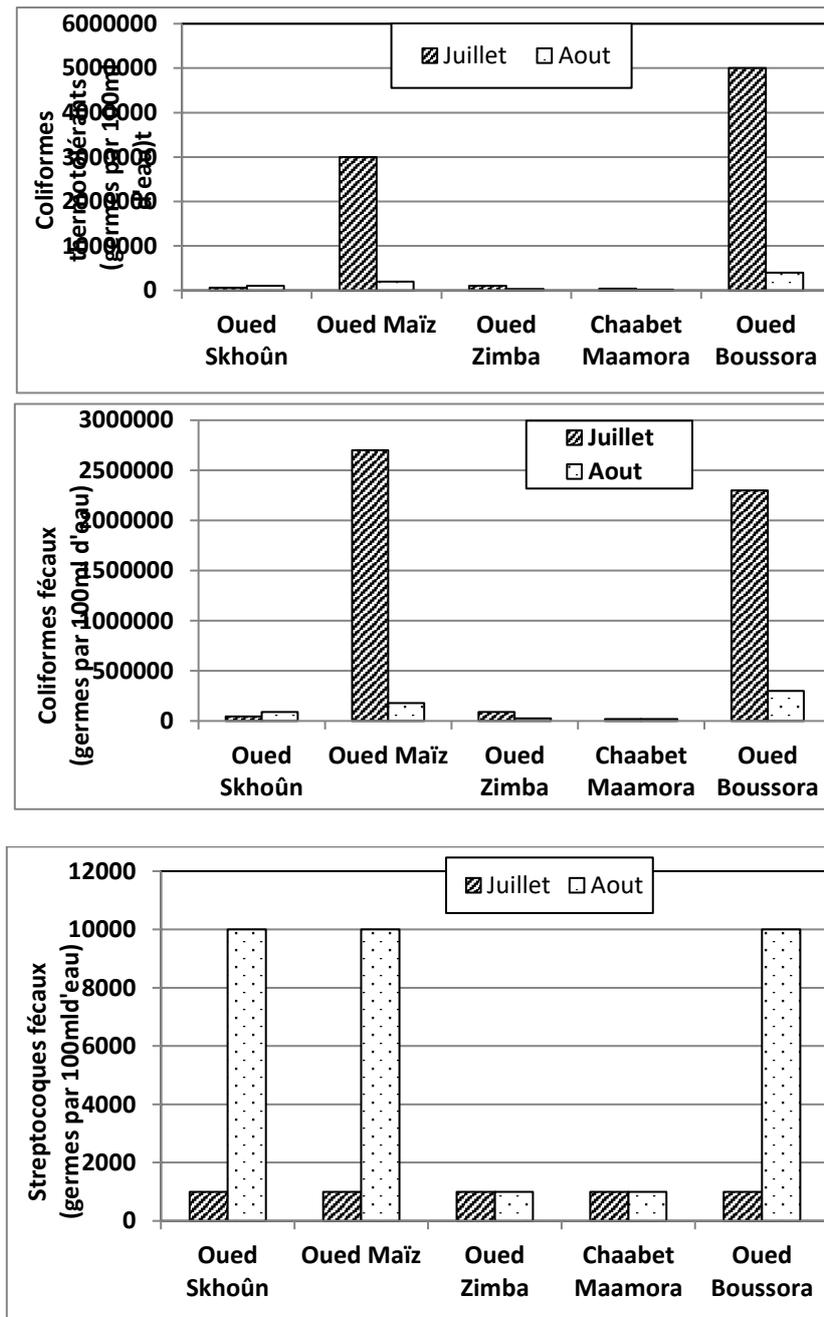


Figure 52. La charge bactérienne dans les eaux des affluents de l’oued Seybouse (2005).

En Aout 2016, c’est toujours la station d’irrigation El Fedjouj qui présente une charge fécale importante par rapport aux coliformes fécaux ( $3 \cdot 10^6$  germes/100 ml), suivi par la station de Boumahra ( $23 \cdot 10^2$  germes par 100 ml) puis par la station de Guelma ( $15 \cdot 10^2$  germes par 100 ml). Vu que la station d’épuration des eaux usées ne collecte que les eaux usées domestiques de la ville de Guelma, sans que la cité Bourouaih ne soit raccordée à ce réseau où les rejets sont déversés à l’état brut dans l’oued Skhoun, d’où la présence très élevée des coliformes fécaux ( $14 \cdot 10^6$ ) (Fig. 54). Plus en aval, au niveau de l’oued Maiz, une deuxième station de collecte des eaux usées urbaines est installée, toutefois

le prélèvement fait après cette station montre une importante pollution où les coliformes fécaux atteindraient  $45.10^4$  germes par 100 ml. Les rejets des agglomérations situées à l'Est de la ville de Guelma ne sont pas traités et déversés à l'état brut dans les affluents de l'oued Seybouse, à savoir oued Zimba ( $75.10^3$  germe/100 m l), Chaabet Mamora ( $2.10^3$  germe par 100 ml) (Fig. 54)

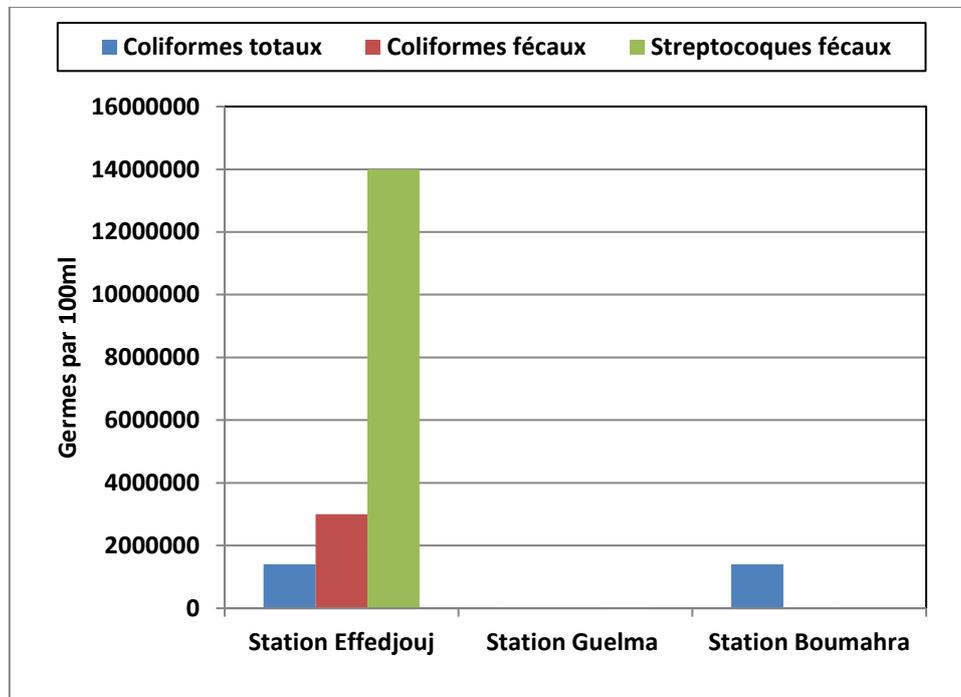


Figure 53. La charge bactérienne aux stations d'irrigation, Aout 2016

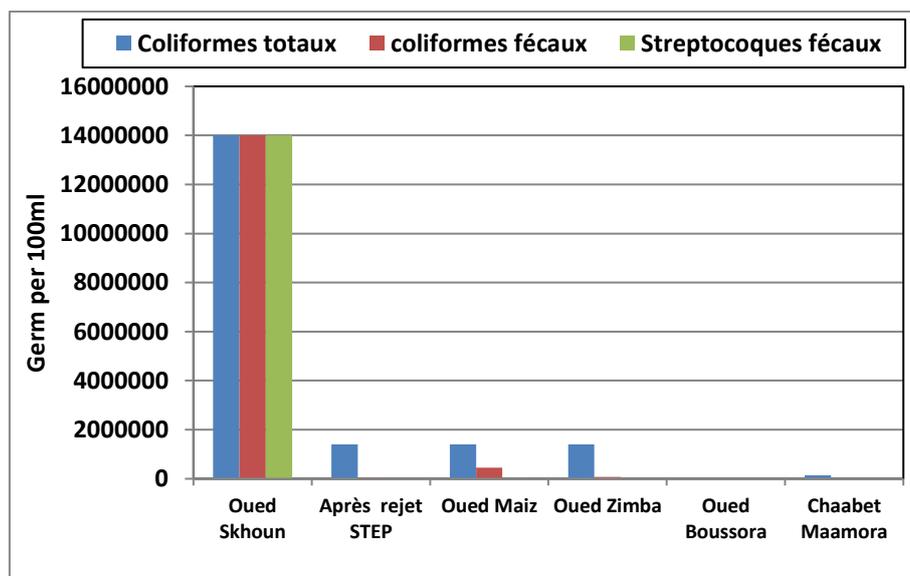


Figure 54. La charge bactérienne aux affluents de l'oued Seybouse et après le rejet de la STEP, Aout 2016.

### III.8.3. Degré de la pollution bactériologique et aptitude à l'irrigation

Nous avons comparé la charge fécale de ces eaux aux recommandations de l'OMS (1989) et à la réglementation californienne « Title 22 » ; il s'agit de deux grands groupes standards de normes des eaux usées épurées utilisées à l'irrigation (Baumont et al, 2000) et celles des Etats-Unis (Environmental Protection Agency), concernant les eaux de surface utilisées pour l'irrigation.

La réglementation de l'OMS (1989), pour la réutilisation des eaux usées épurées à l'irrigation, propose de retenir trois catégories de contraintes sanitaires C, B et A exprimant les risques croissant liés aux types d'utilisation projetés et aux modalités d'irrigation, elles ont été révisées en 2000 par Blumenthal et al. (Faby et al, 2000).

Selon les recommandations microbiologiques de l'OMS (1989), les eaux d'irrigation aux niveaux des seuils de pompage ne peuvent pas être utilisées pour l'irrigation des cultures maraîchères consommées crues, et cela pour les deux périodes de prélèvement (Juillet et Aout 2005 et en Aout 2016) étant donné que les teneurs en coliformes fécaux dans ces seuils de pompage, à l'exception de la station de Guelma au mois de juillet, sont supérieures à  $10^3$  germes pour 100 ml (Fig. 51). Si la technique d'irrigation envisagée est l'aspersion, comme c'est la pratique au niveau du périmètre d'irrigation de Guelma, elles peuvent être utilisées sans restriction pour l'irrigation des céréales, cultures industrielles, fourragères, pâturages et forêts.

La réglementation californienne, exprimée dans un document appelé « Title 22 » est une des plus sévères au monde. Elle est basée sur une approche de haute technologie. C'est également une référence mondiale. Elle a servi de modèle aux réglementations d'Israël (Faby et al, 2000). D'après cette réglementation, les eaux d'irrigation au niveau des stations de pompage, dépassent largement les normes en coliformes fécaux ou totaux ( $< 2,2$  et  $< 23$ ), et ne peuvent être utilisées que pour l'irrigation des arbres fruitiers et vignes, en utilisant la technique de l'irrigation de surface.

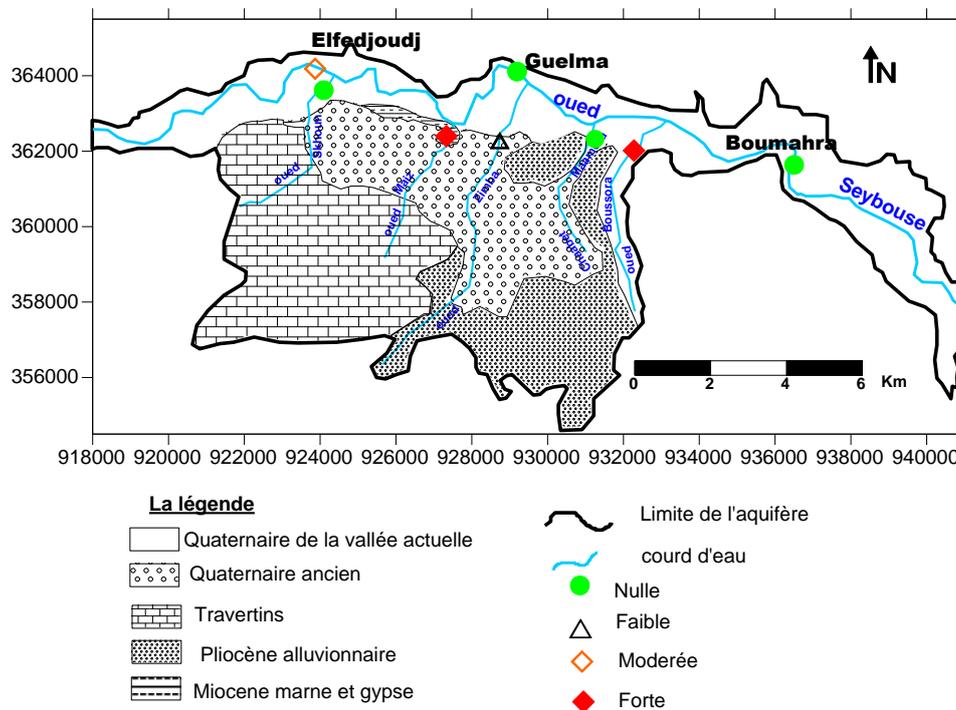
Aux Etats-Unis, Environmental Protection Agency et l'Académie des Sciences ont déterminé, en 1973, que les eaux naturelles de surface, y compris les eaux de rivières, utilisées pour l'irrigation, ne devraient pas contenir, au total, plus de  $10^3$  coliformes par 100 ml,

(Baumont et al, 2000), de ce fait, les eaux des stations d'irrigation de la plaine de Guelma ne peuvent être utilisées pour l'irrigation.

Il faut signaler qu'actuellement, les eaux de l'oued Seybouse sont utilisées pour l'irrigation de toutes les spéculations agricoles y compris les cultures maraichères consommées crues, ce qui met en danger la santé des consommateurs.

**III.8.3.1. Indice de qualité microbiologique**

En Aout 2005, les lâchées du barrage arrivent à améliorer la qualité bactériologique au niveau du seuil d'irrigation El Fedjoudj (Fig. 55) et (Fig. 56). Il est important de souligner la forte pollution des eaux de l'oued Maiz et de l'oued Boussora.



**Figure 55.** Degré de la contamination fécale en juillet 2005.

En juin 2016, la station d'irrigation El Fedjouj est très fortement polluée par les rejets domestiques des agglomérations urbaines situées en amont de cette station (Fig. 57). L'oued Skhoun montre une pollution fécale très élevée, car les eaux usées de la cité Bourouieh ne sont pas collectées par la STEP et se déversent toujours dans cette rivière. Cependant, une amélioration du degré de pollution fécale est à noter juste après les rejets des eaux usées épurées où la pollution reste modérée. Cette amélioration est remarquée au niveau de l'oued Maiz, au point de prélèvement situé juste après la collecte des eaux usées urbaines par la station de pompage de la STEP.

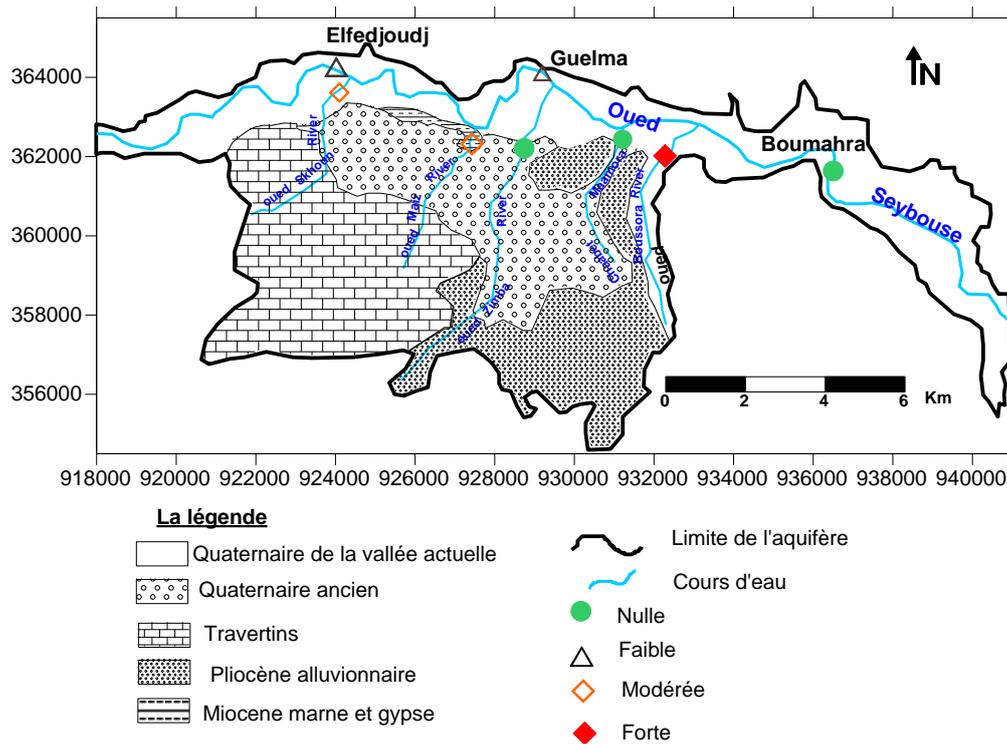


Figure 56. Degré de la contamination fécale en Aout 2005.

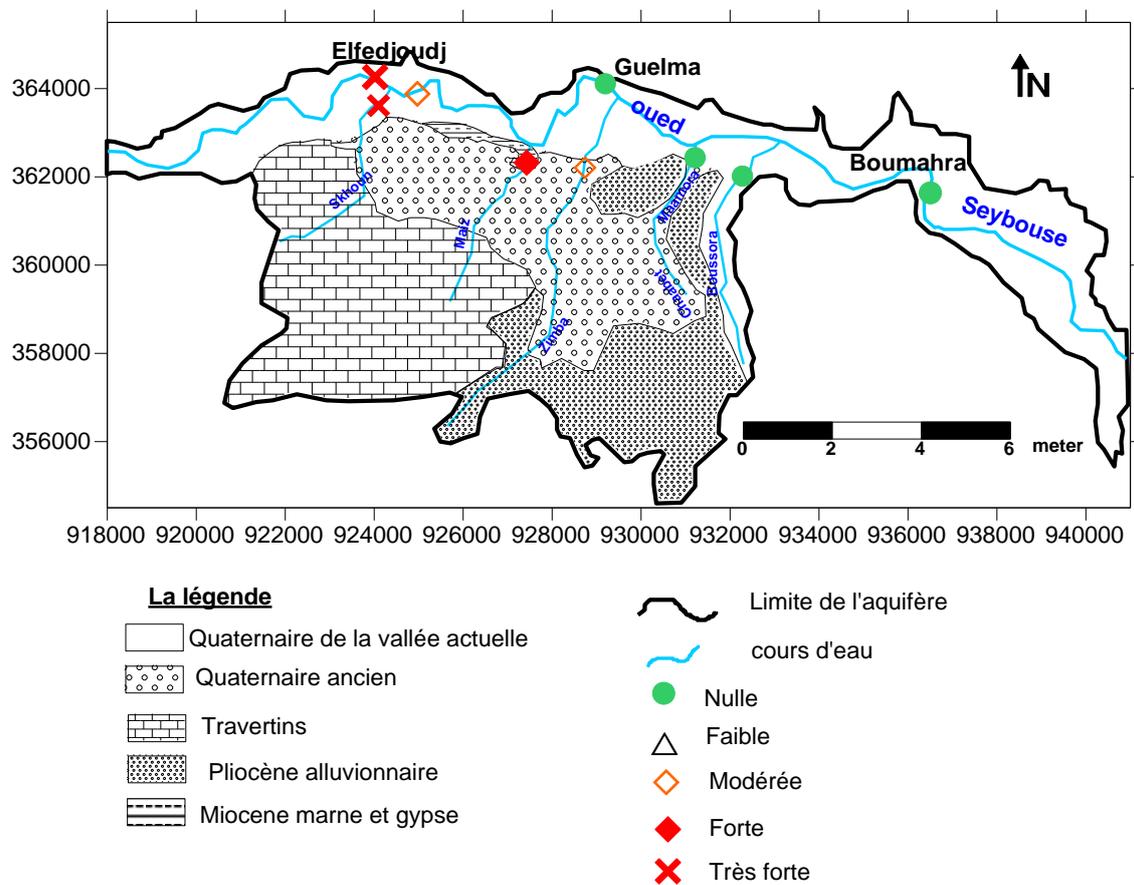


Figure 57. Degré de pollution fécale en Juin 2016

### III.9 Propriété isotopique des eaux de surface du bassin de la moyenne Seybouse

Au total 3 échantillons ont été prélevés au cours d'une campagne menée en juin 2016, l'échantillonnage a été fait au niveau des trois stations d'irrigation implantées dans l'oued Seybouse qui assurent l'irrigation des terres agricoles de la plaine.

Les variables physico-chimiques suivants : pH, température, conductivité électrique, oxygène dissous, potentiel d'oxydoréduction (Eh), pression du CO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub>) ont été mesurés *in situ* à l'aide d'un appareil multi paramètres HANNA (HI 9828). Les échantillons ont été prélevés à l'aide d'un flacon en polypropylène préalablement rincé à l'eau de l'échantillon et bien fermé pour éviter toute évaporation, puis ces échantillons sont conservés dans une glacière à une température inférieure à 4°C et transférés au laboratoire du département de datation et traçage isotopique du Centre National de Recherche Nucléaire d'Alger (CRNA). L'analyse des isotopes (<sup>18</sup>O, 2H) ont été faite par spectromètre de masse.

#### III.9.1. Oxygène-18 et deutérium (2H)

Les teneurs en <sup>18</sup>O et en deutérium présentent une étroite gamme de variation (écart type 0.12‰ pour l'oxygène-18 et 1.436 ‰ pour le deutérium), ceci est dû à la faible superficie du bassin.

La valeur moyenne est de -5.44‰ pour l'oxygène 18 et de -36.46‰ pour le deutérium.

La région nord orientale de l'Algérie est relativement pauvre en données isotopiques sur les précipitations. En l'absence de stations de mesure des compositions isotopiques des précipitations dans notre région d'étude nous avons considéré les teneurs isotopiques de la station de la ville Annaba située à 65 km de la région d'étude, si on compare les teneurs moyennes en <sup>18</sup>O des eaux de surface dans la zone d'étude avec la teneur moyenne des précipitations pondérées recueillies à la station de Annaba, située à 5 m d'altitude, pendant la période 1989–1990 (Moulla et Gendouz, 1996) pour les évènements pluvieux supérieurs à 5 mm (Yermani, 2003), est de -3.5 ‰ vs SMOW. On remarque que les eaux de surface du bassin de la moyenne Seybouse sont appauvries de 1.94‰ pour <sup>18</sup>O. La différence d'altitude entre Annaba (au niveau de la mer) et la région de Guelma est d'environ 300 m. Si l'on considère un gradient "classique" de teneur en <sup>18</sup>O avec l'altitude de 0.3‰ par 100 m (voir par exemple Clark & Fritz, 1997), il est très vraisemblable que la teneur mesurée dans les eaux de surface corresponde à celle des précipitations de la région.

En considérant le diagramme  $\delta 2H-\delta 18O$  (Fig. 58), l'ensemble des points prélevés des stations d'irrigation se répartit autour de la droite des précipitations mondiales qui a comme

équation :  $\delta 2H = 8\delta 18O + 10$ ; (Craig, 1961). Les stations Boumahra et El Fedjouj présentent une très légère évaporation (excès en deutérium <10) (Yermani et al, 2003). Cependant, il n’y a pas de dépendance nette entre les teneurs en chlorures et celles en 18O, ce qui prouve que, même si l’évaporation existe, son effet sur la salinisation des eaux est très limité (Fig.59).

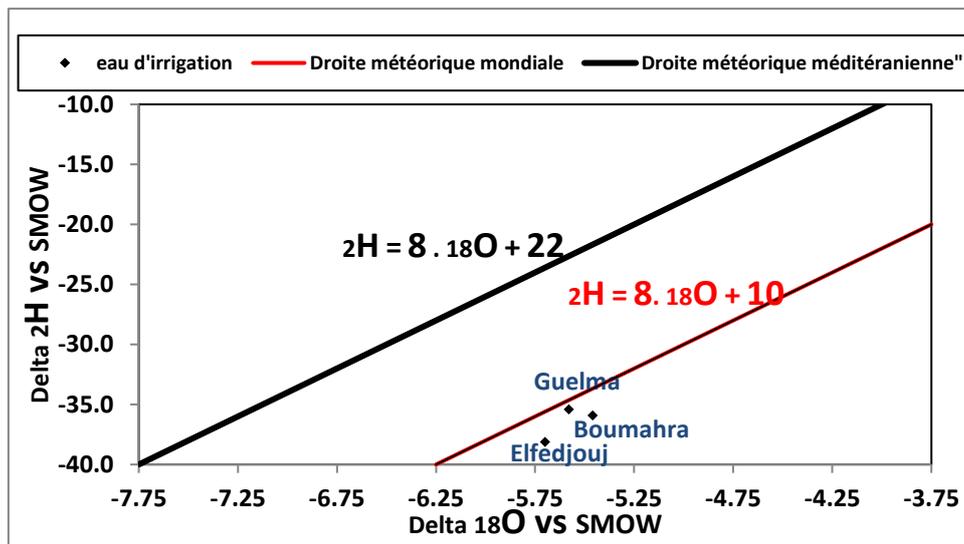


Figure 58. Relation 18O/deutérium dans les eaux de surface du bassin de la moyenne Seybouse.

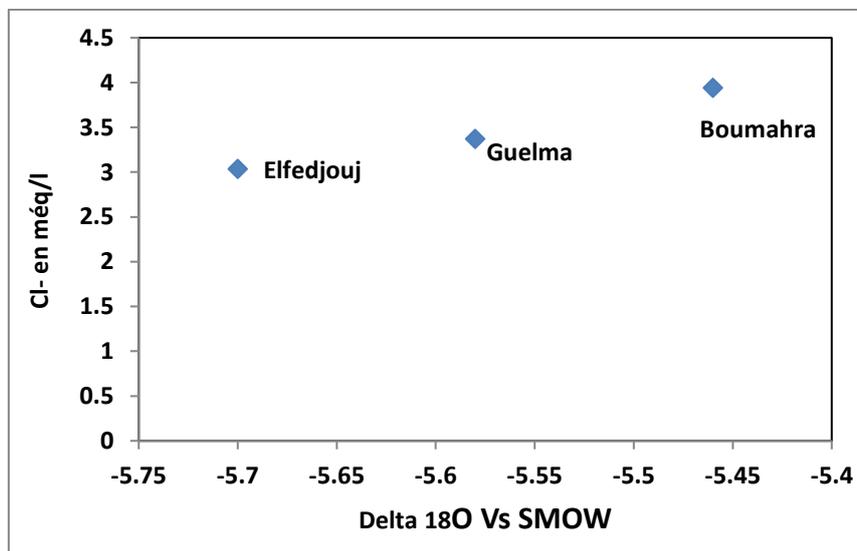


Figure 59. Relation entre teneurs en chlorures et en 18O dans les eaux de surface du bassin de la moyenne Seybouse.

### III.10. Conclusion

L'étude de l'origine des principaux éléments majeurs présents dans les eaux de la plaine de Guelma est conduite en utilisant les graphes binaires et l'analyse des indices de saturation vis-à-vis des minéraux potentiellement existants dans les eaux de surface.

Les ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  proviennent majoritairement de la dissolution de l'halite. Cependant, un enrichissement en ion  $\text{Cl}^-$  provient d'une contamination anthropique provoquée par le rejet des eaux usées urbaines et probablement avec un échange de base avec la matrice argileuse où  $\text{Na}^+$  de ces eaux, qui caractérise le faciès chloruré sodique, est remplacé par les ions  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Ca}^{2+}$  des formations encaissantes, nous aboutissons ainsi à un faciès chloruré calcique et magnésien.

L'indice de saturation montre que les eaux de surface de la plaine de Guelma sont pour la plupart sous-saturées en Halite et gypse mais sursaturées en calcite et dolomite, favorisant la précipitation de ces minéraux carbonatés calcaires et dolomitiques et la dissolution des formations évaporitiques salifères et gypsifères.

Le calcul de l'indice d'échange de base, indique que les eaux de l'oued Skhoun ont un indice d'échange de base négatif, traduisant un échange de  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  de l'eau par le  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  de la matrice argileuse, cependant les formations dolomitiques procurent à cette eau une concentration assez importante de  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ , ce qui masque cet échange de base.

Pour les eaux de l'oued Seybouse et de l'oued Boussora, on note un enrichissement en  $\text{Na}^+$  et en  $\text{K}^+$ , malgré le fait que l'indice d'échange de base traduit la fixation de ces deux éléments par les argiles et la libération des alcalino-terreux ( $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ ), ceci laisse supposer que ce phénomène d'échange de base n'est assez important par rapport à l'apport en  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  dû au lessivage des formations gypsifères et carbonatées ou bien attribué à une précipitation secondaire de calcite.

La pollution organique est soulignée par la présence de teneurs élevées en nitrites, surtout au niveau des stations de prélèvement proche des points de rejets des eaux usées, comme c'est le cas pour la station Sb2 et Sb4.

Les cinq stations de prélèvement indiquent une contamination des eaux par l'azote ammoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ), la teneur la plus élevée est observée au niveau de l'oued Maiz où un volume important d'eau usée brute est déversé dans cet affluent.

La projection de l'azote dans le diagramme d'équilibre du potentiel redox en fonction du pH, montre qu'il se présente dans la plage de stabilité de l'ammonium  $\text{NH}_4^+$ , mais les résultats obtenus montrent que les teneurs en nitrites sont plus élevées que celles en  $\text{NH}_4^+$ , cette différence est sûrement liée à l'effet des rejets qui introduisent dans l'eau de l'oued des  $\text{NO}_2^-$  en solution dans des conditions initiales (Eh et pH) différentes à celles de l'oued. Ce qui permet à ces éléments d'apparaître dans l'eau de l'oued sous des conditions qui ne correspondent pas à l'état naturel de ces espèces chimiques.

La comparaison de la qualité bactériologique de l'eau d'irrigation, par rapport aux recommandations de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) (1989), révèle que cette eau ne peut pas être utilisée pour l'irrigation des cultures maraichères consommées crues, cela avant et même après les lâchées du barrage de Bouhamdane. En 2016, même après la mise en marche de la STEP, qui malheureusement ne collecte pas toutes les eaux usées de la région d'étude). Il apparaît que la pollution fécale est très forte au niveau de la station El Fedjoug, exposant ainsi la santé des consommateurs des cultures maraichères à un vrai danger.

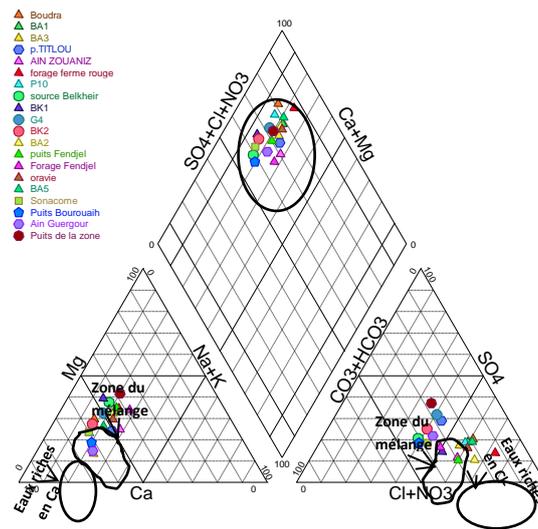
Les teneurs en  $^{18}\text{O}$  et en deutérium présentent une étroite gamme de variation (écart type - 0.27‰ pour l'oxygène-18 et -1.43 ‰ pour le deutérium), ceci est dû à la faible superficie du bassin.

La valeur moyenne est de -5.44‰ pour l'oxygène 18 et de -36.46‰ pour le deutérium. Les stations Boumahra et El Fedjoug présentent une très légère évaporation. Cependant, il n'y a pas de dépendance nette entre les teneurs en chlorures et celles en  $^{18}\text{O}$ , ce qui prouve que, même si l'évaporation existe, son effet sur la salinisation des eaux est très limitée.



La **Figure 61**, montre la représentation des résultats d'analyse d'échantillons sur le diagramme de Piper, qui donne une vision générale des types d'eaux rencontrés dans l'aquifère.

Cependant, on remarque sur les triangles des cations et des anions, une zone de mélange où aucun ion ne prédomine. Un enrichissement en chlorures est observé dans les forages : BA2, BA3, BA4, BK1 et dans les puits (P10) et Puits Fendjel (**Fig. 61**).



**Figure 61.** Faciès chimique des eaux de la nappe alluviale de Guelma (basses eaux, 2005)

#### IV.2. Statistique descriptive des concentrations des éléments majeurs et qualité des eaux de la nappe alluviale de Guelma.

**Tableau 33.** Statistiques descriptives des principaux paramètres physico-chimiques analysés dans les eaux souterraines de la nappe alluviale de Guelma (Basses eaux, 2005)

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
<b>Ca</b>	81.760	160.320	121.298	23.188
<b>Mg</b>	18.120	76.200	42.018	13.788
<b>Na</b>	32.200	92.100	56.135	14.898
<b>K</b>	0.100	8.300	2.620	2.169
<b>Cl</b>	113.600	390.500	217.615	78.398
<b>SO4</b>	56.000	290.000	108.280	52.237
<b>HCO3</b>	122.000	292.800	194.100	47.653
<b>TDS</b>	910.000	1779.000	1261.200	245.411
<b>CE</b>	955.000	1861.000	1323.300	257.302

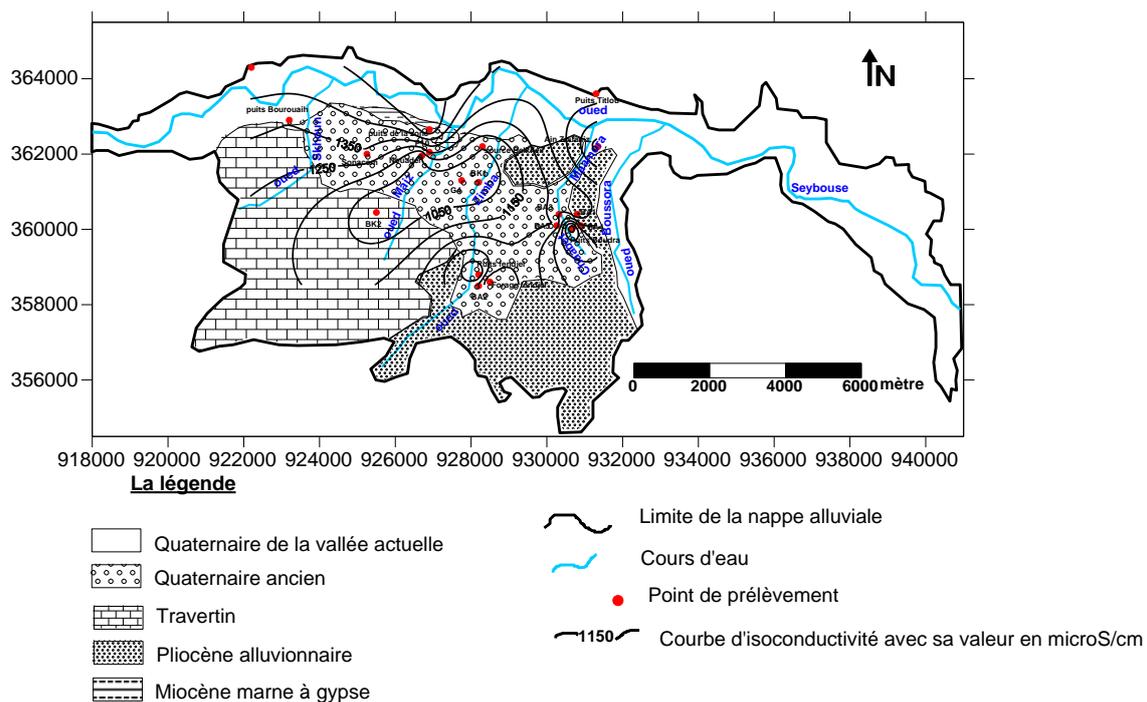
### IV.3 Répartition spatiale des teneurs

Pour mieux comprendre le chimisme des eaux souterraines et superficielles et approcher l'origine des différents composants chimiques et leur répartition spatiale, nous avons reporté les résultats obtenus sur des cartes d'isoteneurs permettant de suivre l'évolution des teneurs, de visualiser les zones de forte concentration et d'interpréter les anomalies rencontrées.

#### IV.3.1 Carte de la salinité

La salinité est mesurée à partir de la conductivité électrique de l'eau à une certaine température.

Les valeurs de la salinité des eaux sont traduites par la conductivité électrique en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Elmokhtar et al, 2008). Les faibles valeurs de salinité (entre 950 et 1450  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) sont localisées dans la partie centrale de la nappe et dans la moyenne Seybouse et même dans la nappe des travertins, alors que les fortes minéralisations sont observées dans l'actuelle terrasse et dans la partie extrême Est de la nappe (plus de 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), dépassant de loin la valeur moyenne qui est de 1323.3  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Tableau.37), ceci est probablement dû à la faible profondeur de la nappe qui l'expose plus à l'évaporation, vu le remplissage grossier favorisant ce phénomène.



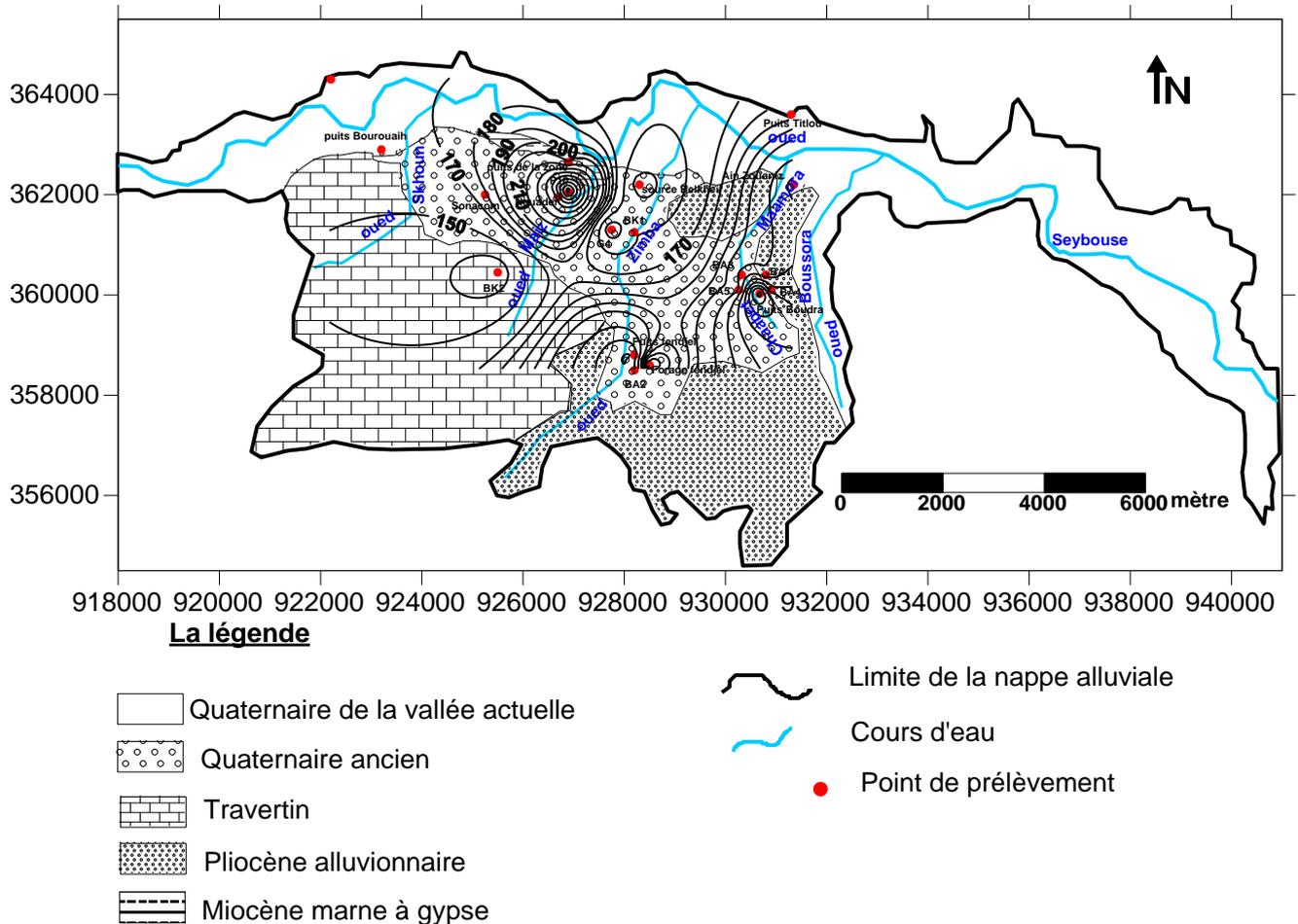
**Figure 62.** Carte de la conductivité électrique des eaux souterraines de la nappe aquifère de Guelma (Basses eaux, 2005)

#### IV.3.2 Carte des chlorures

La teneur en chlorure augmente généralement avec le degré de minéralisation de l'eau (Fig. 63). Les plus fortes valeurs, se localisent à la bordure sud-est de la vallée ancienne de l'oued Seybouse, au niveau de Chaabet Maamora, et aussi dans la moyenne terrasse, au niveau de l'oued Maiz. L'origine anthropique de ces teneurs est à soupçonner, vu que ces affluents

récepteurs d'eau usée, peuvent alimenter la nappe et lui transmettre ces concentrations élevées en chlorures.

Les valeurs inférieures à la norme fixée pour l'eau potable, qui est de 200 mg/l, se localisent dans la partie centrale de la nappe et tout au long de l'oued Seybouse.



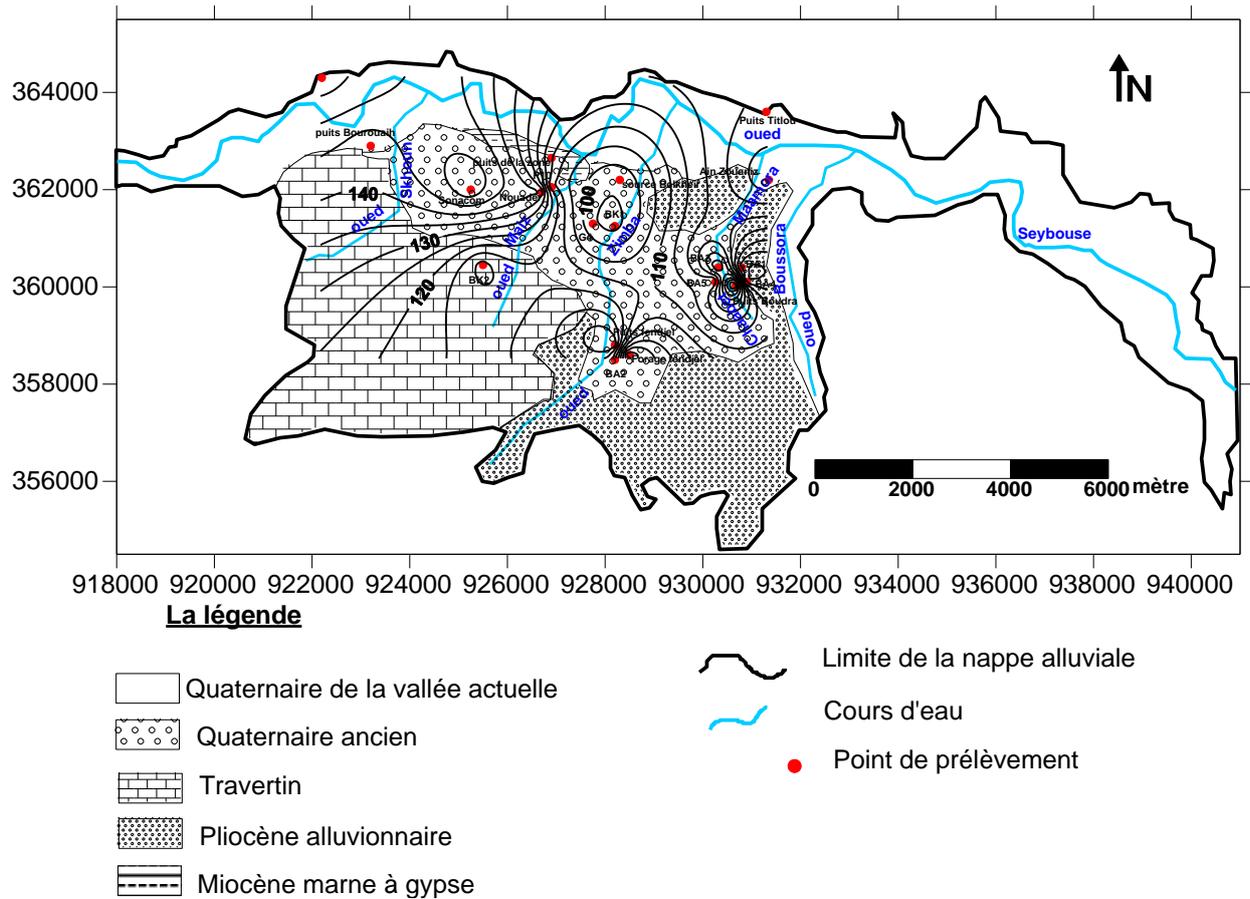
**Figure 63.** Carte de chlorures des eaux souterraines de la nappe aquifère de Guelma (Basses eaux, 2005)

### IV.3.3 Carte du calcium

La présence des ions  $\text{Ca}^{2+}$  dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles : Soit la dissolution des formations carbonatées ( $\text{CaCO}_3$ ), soit la dissolution des formations gypseuses ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) (**Debieche, 2002**).

Les valeurs les plus élevées, supérieures à la norme des eaux potables (100 mg/l), sont observées au niveau de la nappe des travertins (135 à 160 mg/l) (Fig. 64), à cause des formations calcaires existantes dans le réservoir aquifère, et au Sud dans la haute terrasse au voisinage du forage BA2, provenant probablement du lessivage des formations évaporitiques et l'apport de l'alimentation latérale ouest à partir de la nappe des travertins.

On note aussi des teneurs élevées, qui dépassent 150 mg/l, et qui sont observées dans la partie ouest de l'actuelle terrasse.



**Figure 64.** Carte des teneurs du calcium des eaux souterraines de la nappe aquifère de Guelma (Basses eaux, 2005)

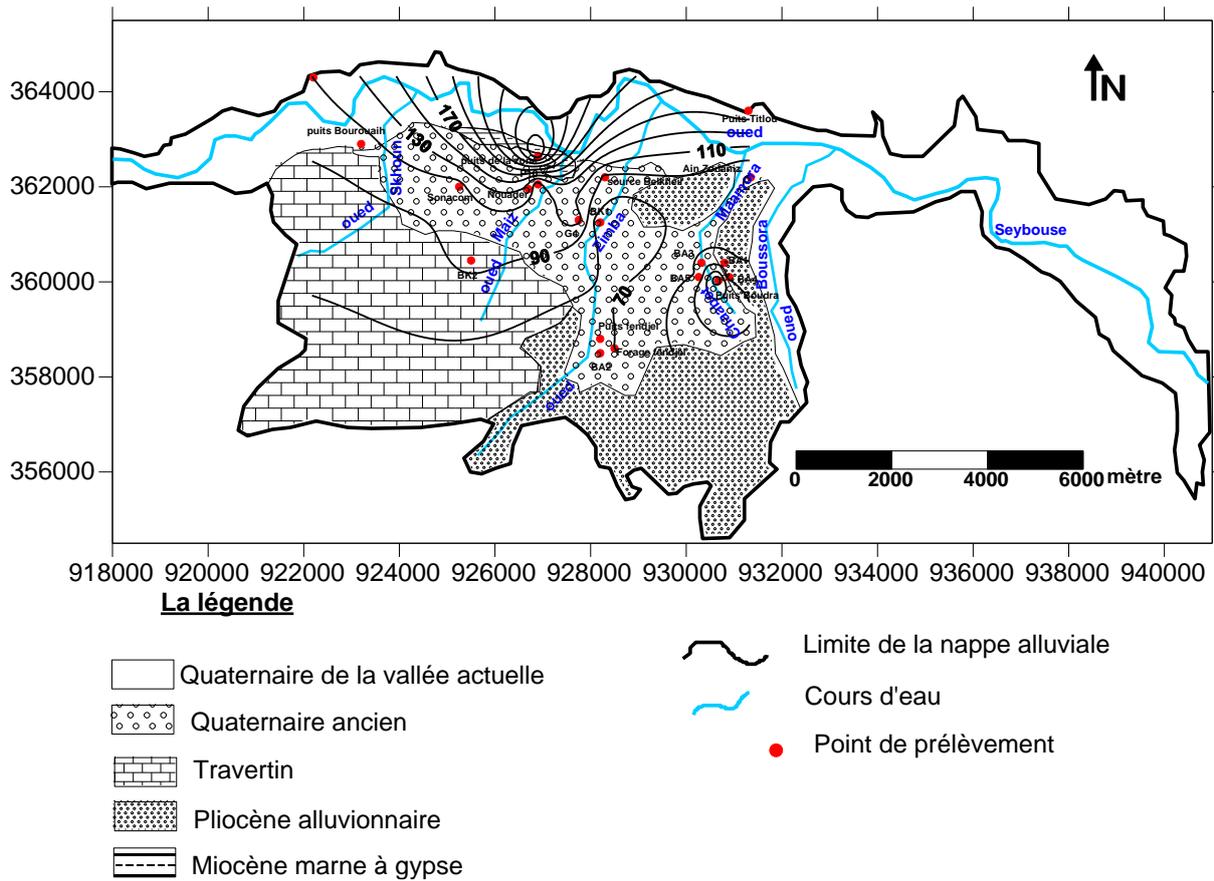
#### IV.3.4 Carte du magnésium

Les origines du magnésium sont comparables à celle du calcium, car il provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium (magnésite et dolomite).

Les fortes valeurs entre 58 et 73mg/l, dépassent la norme pour les eaux potables, fixée à 50 mg/l, se localisent à l'extrême Nord de la nappe dans l'actuelle terrasse aux alentours des puits P10 et des puits, situés du côté ouest de l'oued Maiz (Fig. 65).

Des teneurs élevées (plus de 50 mg/l) sont aussi observées plus au Sud (puits Fendjel), dont l'origine ne peut être que la dissolution des formations carbonatées dolomitiques.





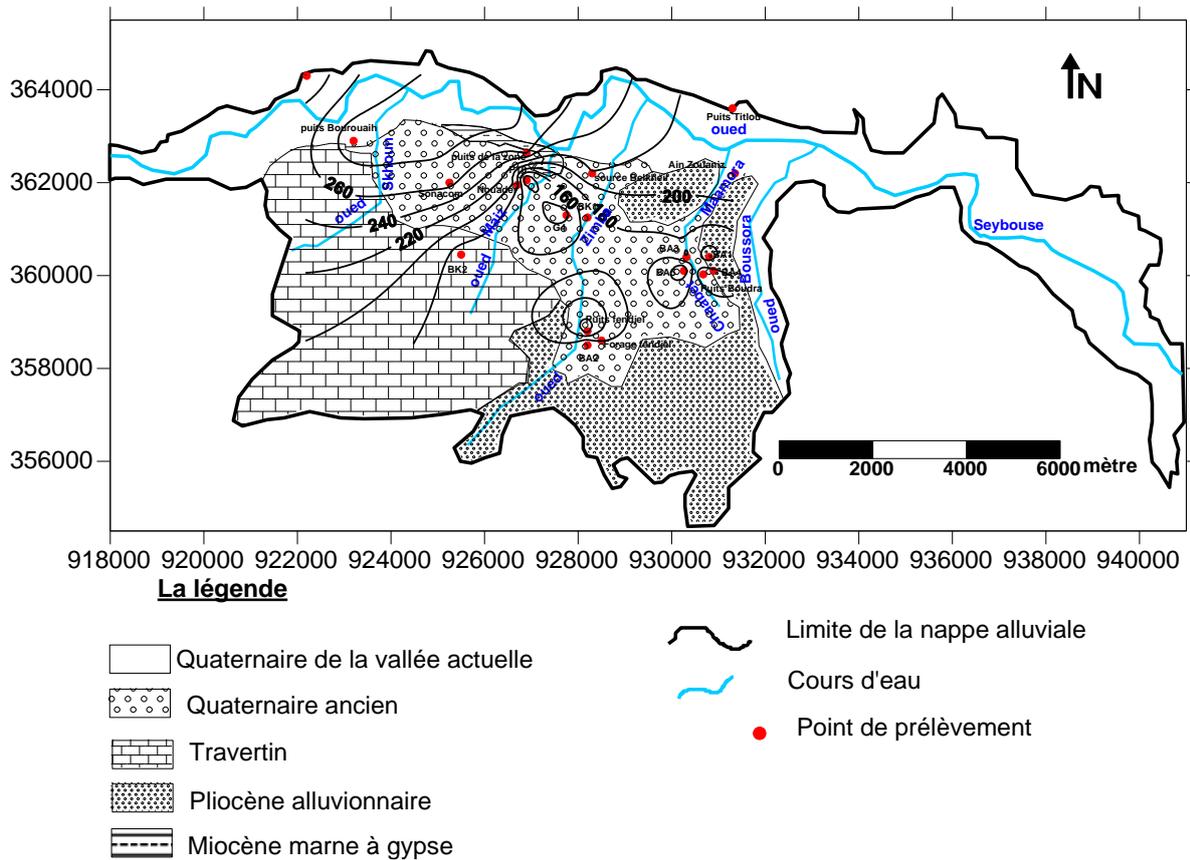
**Figure 66.** Carte des sulfates des eaux souterraines de la nappe aquifère de Guelma (Basses eaux, 2005)

**IV. 3.6 Carte des bicarbonates**

La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées calcaires par des eaux chargées en gaz carbonique (**Debieche, 2002**).

Les teneurs les plus élevées (plus de 240 mg/l), se localisent dans la partie nord-ouest de la nappe, dans l'actuelle terrasse et dans la partie nord-est de la nappe des travertins.

Les valeurs qui oscillent entre 120 et 220 mg/l, sont localisées dans les moyenne et ancienne terrasses (Fig. 67).



**Figure 67.** Carte des bicarbonates des eaux souterraines de la nappe aquifère de Guelma (Basses eaux, 2005)

#### IV.4 L'acquisition de la salinité des eaux souterraines

L'objectif de cette étude est de déterminer l'origine de chaque élément chimique, son comportement par rapport aux autres, son évolution dans le temps et dans l'espace, les différents phénomènes hydrogéochimiques qui peuvent se développer au niveau de la plaine. Et enfin la tendance des formes chimiques dans le système d'équilibre thermodynamique entre la phase dissoute et la phase minérale sera également examinée.

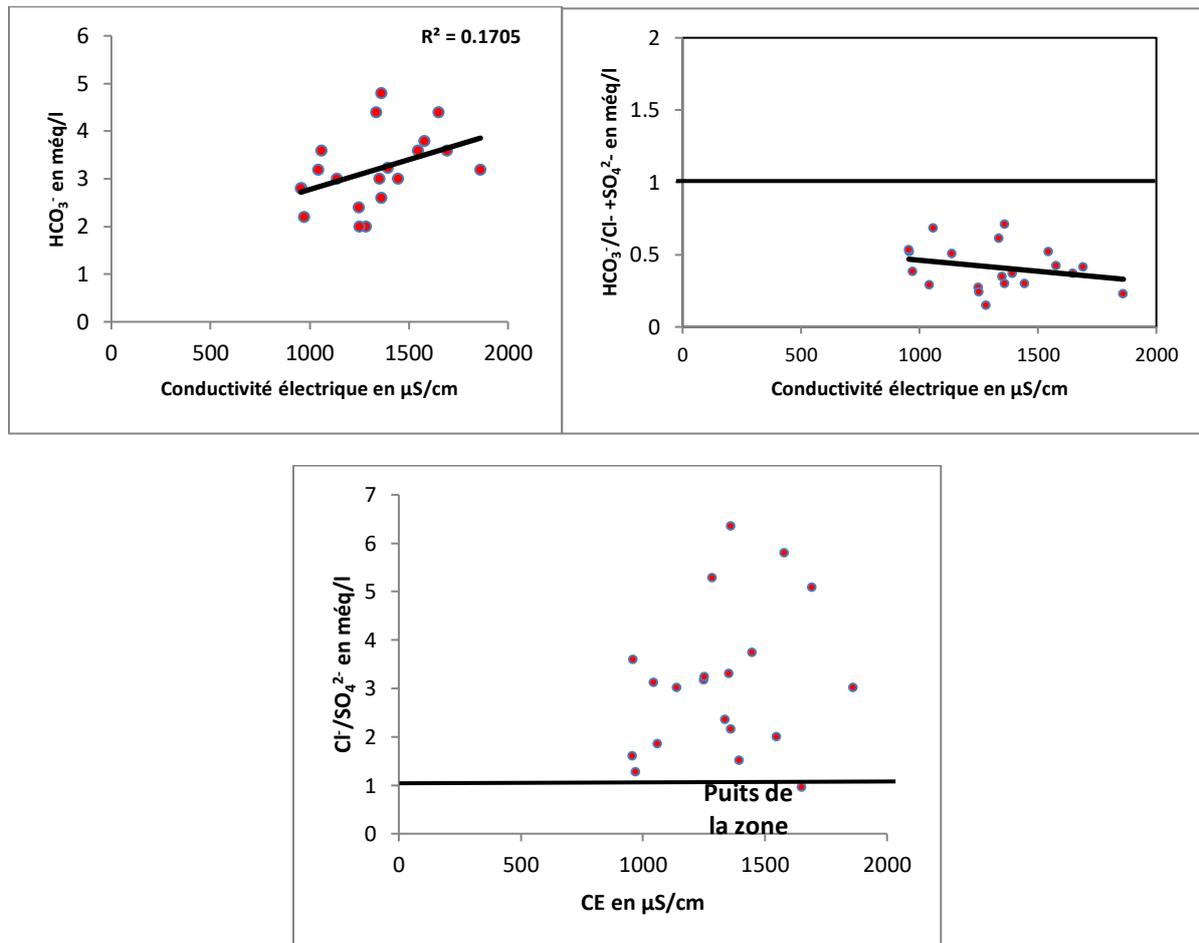
##### IV.4.1 Origine de la Salinité

###### IV.4.1.1 Relation de la salinité avec les carbonates et les évaporites

L'évolution de la conductivité électrique, en fonction des bicarbonates, peut donner une idée sur la contribution de ces formations géologiques dans la minéralisation des eaux de la nappe de Guelma.

Les carbonates ne contribuent pas beaucoup à l'augmentation de la salinité des eaux souterraines de la nappe, vu le faible coefficient de corrélation ( $R= 0.14$ ). Par contre l'évolution de la salinité en fonction du rapport  $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ , met en relief les évaporites qui participent en grande partie dans la minéralisation de ces eaux et ce sont en particulier les

formations évaporitiques salifères qui soulignent cette minéralisation plus que les évaporites gypsifères (Fig. 68).



**Figure 68.** Evolution de la conductivité électrique (CE) en fonction des bicarbonates, du rapport Carbonates/Evaporites et du rapport Cl<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (Basses eaux, 2005)

Un seul échantillon prélevé d'un puits, implanté dans les formations marno-gypseuses (Fig. 68) qui affleurent au niveau de l'oued Maiz à la commune de Belkheir, présente une minéralisation due au gypse.

#### IV.5. Origine des éléments majeurs

Vu la prédominance des ions (Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> et Mg<sup>2+</sup>) dans l'eau de la nappe on a réalisé une représentation des faciès chimiques dans un diagramme Ca<sup>2+</sup> / Mg<sup>2+</sup> et Cl<sup>-</sup> / SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (Fig. 69).

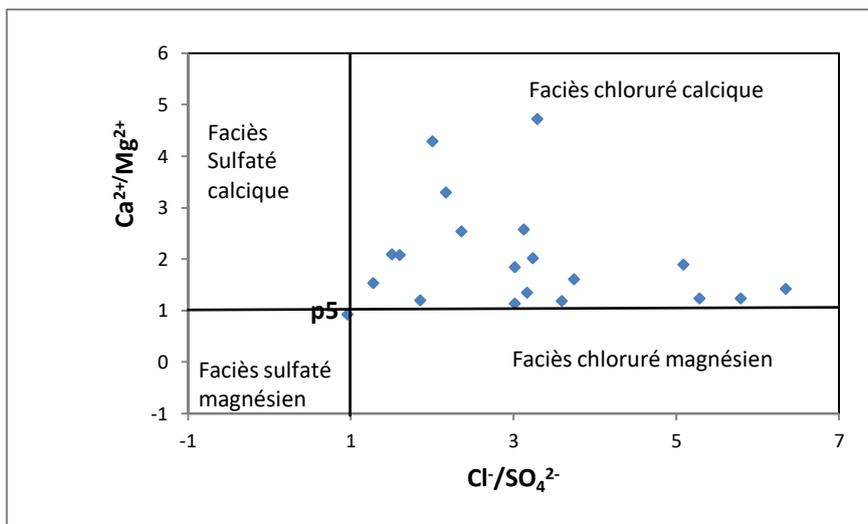


Figure 69. Faciès chimique des eaux par les rapports  $Cl^-/SO_4^{2-}$  et  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$

La projection des différents points sur le diagramme ( $Cl^-/SO_4^{2-}$  et  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$ ), nous donne une vue d'ensemble sur la répartition spatiale des faciès géochimiques au niveau de la nappe, où le faciès chloruré calcique représente l'ensemble des échantillons.

#### IV.5.1 Le rapport $Na^+/Cl^-$

Les teneurs en chlorures ne sont pas bien corrélées avec celles du sodium ( $r = 0,41$ ), d'après le graphe de la figure 70, la plupart des échantillons prélevés des eaux de la nappe s'enrichissent en chlorures, d'autres sont en excès (puits Boudra, Forage Nouader, BA4 et P10)

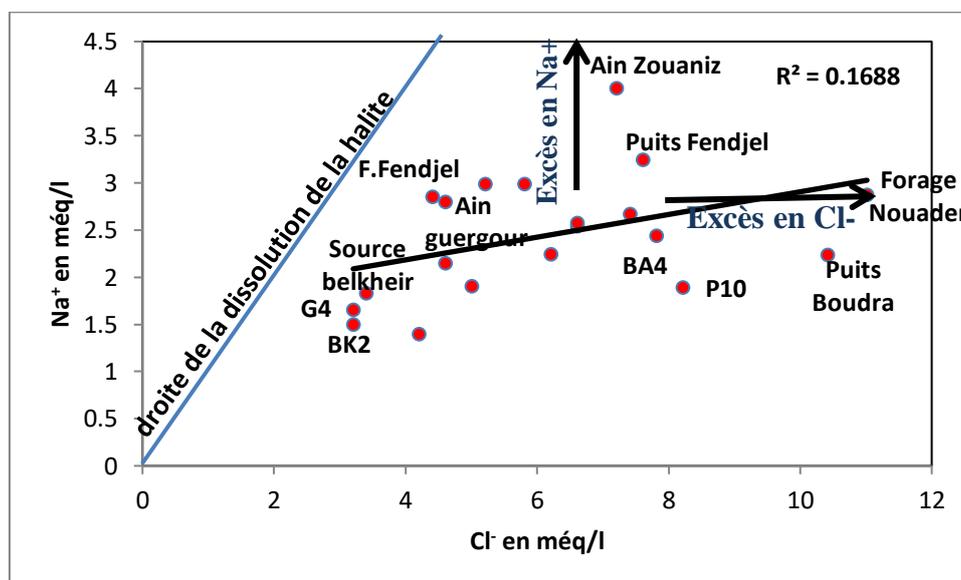


Figure 70. Relation entre  $Cl^-$  et  $Na^+$  pour l'ensemble des échantillons prélevés dans la période des basses eaux 2005

Les teneurs en chlorures présentent des valeurs importantes à celles du sodium, à cause des caractéristiques particulières de cet élément qui ne rentre pas dans les phénomènes de

précipitation chimique, ne s'adsorbe pas par les formations géologiques et qui est très mobile (Debieche, 2002).

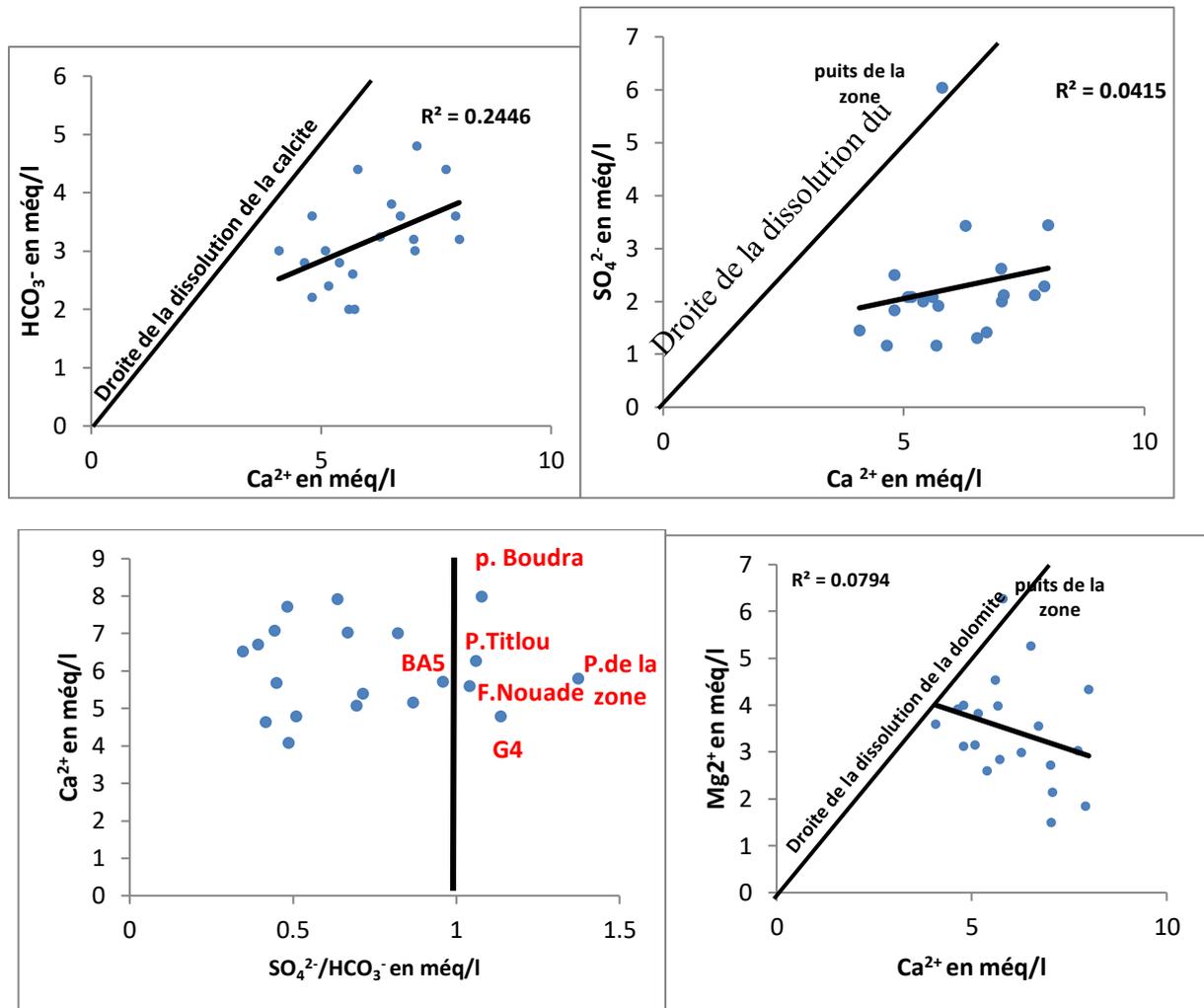
Aussi le phénomène d'échange de base entre la matrice argileuse et l'eau, fait que le  $\text{Na}^+$ , peut se fixer à la place du  $\text{Ca}^{2+}$ , d'où l'appauvrissement en cet ion et la prédominance des ions  $\text{Cl}^-$  dans les eaux souterraines.

#### IV.5.2 Les rapports $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$ , $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ et $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}+\text{HCO}_3^-$

Le calcium et le magnésium interviennent dans plusieurs processus géochimiques tels que la dissolution et la précipitation secondaire des carbonates, l'échange cationique avec les minéraux argileux et la dissolution des minéraux gypseux (Edmunds et al., 2003).

Les graphes de la figure 71, indiquent la mauvaise corrélation entre le  $\text{Ca}^{2+}$  et les  $\text{HCO}_3^-$  ( $R=0.49$ ), les échantillons prélevés s'éloignent de la droite de dissolution de la calcite et s'enrichissent en calcium par rapport aux ions bicarbonates, car l'indice de saturation vis à vis de la calcite, traduit une précipitation de ce minéral.

L'évolution du  $\text{Ca}^{2+}$  en fonction des  $\text{SO}_4^{2-}$ , met en évidence l'enrichissement des eaux en  $\text{Ca}^{2+}$ , à l'exception de l'échantillon puits de la zone, qui se positionne sur la droite de dissolution du gypse, car ce puits est implanté dans les formations marno-gypseuses. Donc le calcium et les sulfates ont la même origine, à savoir la dissolution des formations évaporitiques.



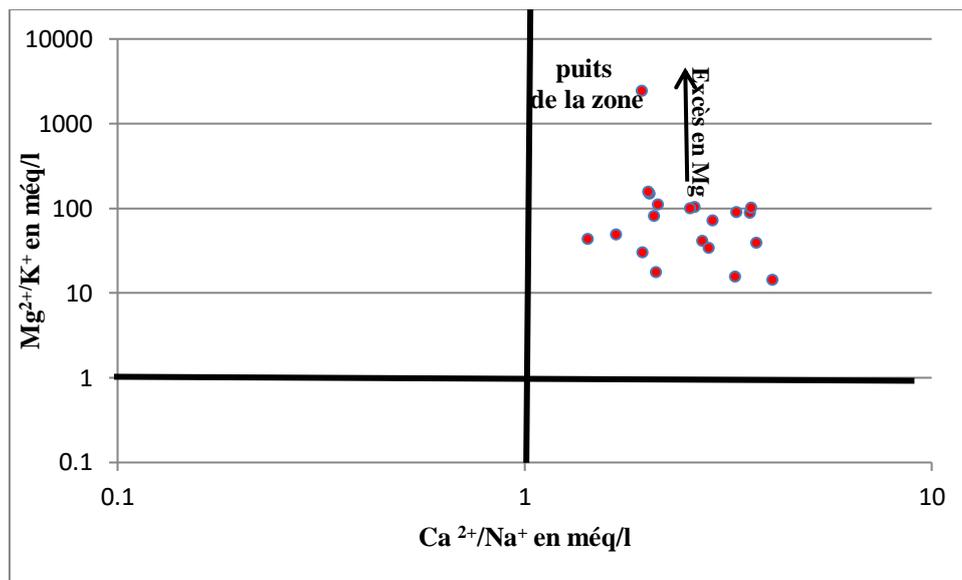
**Figure 71.** Relation entre  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+} + \text{HCO}_3^-$  pour l'ensemble des échantillons prélevés durant la période de basses eaux 2005.

Mais cet excès en  $\text{Ca}^{2+}$ , semble indiquer que la concentration en calcium est affectée par d'autres processus géochimiques. On peut citer notamment les processus d'échange mais aussi l'équilibre avec les phases carbonatées : en effet, en raison des différences de solubilité des deux minéraux ( $K_s$  Calcite =  $10^{-8.48}$  ;  $K_s$  Gypse =  $10^{-4.58}$  à 25 °C (Parkhurst et Appelo, 1999), la mise en solution de gypse dans une solution à l'équilibre avec la calcite entraîne une précipitation de calcite (Andre, 2002).

Le graphe qui représente l'évolution du rapport  $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$  avec le  $\text{Ca}^{2+}$  (Fig.71), montre que les forages G4, Nouader et les puits Titlou, Boudra et celui de la zone, sont plus riches en sulfates qu'en bicarbonates. Le  $\text{Ca}^{2+}$  de ces points d'eau provient d'une grande partie de la dissolution des formations gypsifères.

La composition chimique des eaux semble donc dépendre pour beaucoup des processus de dissolution congruente. Cependant, la dissolution d'une phase unique de gypse entraîne un rapport  $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$  dans les eaux égal à 1 (Andre, 2002). Or, dans les eaux de l'aquifère de Guelma ce rapport n'est pas respecté pour l'ensemble des échantillons prélevés.

### IV.5.3 Les rapports $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ en fonction de $\text{Mg}^{2+}/\text{K}^+$



**Figure 72.** Les rapports  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$  en fonction de  $\text{Mg}^{2+}/\text{K}^+$

L'ensemble des échantillons prélevés montrent un enrichissement en  $\text{Ca}^{2+}$  par rapport au  $\text{Na}^+$ , et un enrichissement en  $\text{Mg}^{2+}$  par rapport au  $\text{K}^+$  (Fig. 72). Ceci aussi laisse soupçonner la présence d'échange de base entre les ions de l'eau ( $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$ ) et le  $\text{Ca}^{2+}$  et le  $\text{Mg}^{2+}$  de la matrice argileuse.

### IV.5.4 Equilibre thermodynamique

L'étude générale de la composition chimique des eaux de l'aquifère de Guelma telle qu'elle a été précédemment évoquée et rend compte de la distribution des différentes espèces en solution et des différents facteurs géochimiques correspondants. Cette première approche a permis de noter des variations parfois importantes de la concentration de certains éléments majeurs.

Mais cette partie de ce chapitre sera consacrée à une recherche de l'origine des espèces et de l'évolution de leurs concentrations au sein du milieu poreux. L'application des principes de la thermodynamique des équilibres permettra de réaliser des diagnostics d'état, c'est à dire de détecter les phases solides stables susceptibles de se former au dépend des solutions et des minéraux en présence, et de phases solides instables susceptibles de s'y dissoudre (**Andre, 2002**)

#### IV.5.4.1 L'Indice de Saturation

L'indice de saturation d'un minéral donné est défini dans l'équation:  $\text{SI} = \lg (\text{IAP}/\text{Ksp})$ ,

Où IAP est le produit de l'activité ionique de la solution et Ksp est le produit de solubilité à un moment et à une température donnée (constante thermodynamique d'un échantillon à l'équilibre et à une température donnée).

Un indice IS inférieur à zéro indique que l'eau souterraine est sous-saturée par rapport à ce minéral. Une telle valeur pourrait refléter le caractère de l'eau provenant d'une formation avec une quantité insuffisante de minéraux pour la solution où le temps de séjour est court. Un

indice IS supérieur à zéro précise que l'eau souterraine est sursaturée par rapport à la matière minérale particulière et elle est donc incapable de dissoudre plusieurs minéraux.

C'est le rapport de l'activité ionique IAP au produit de solubilité à une température donnée. Cet indice indique les tendances des phases à se dissoudre ou précipiter, et permet de suivre l'évolution géochimique de l'eau dans l'aquifère, en traduisant les différents processus réactionnels, dont le siège est l'interaction de l'eau avec les matériaux aquifères.

Quand il est positif (SI), il signifie que la solution est saturée ou sursaturée à l'égard du minéral qui a tendance à la précipitation. Par contre, quand (SI) est négatif, la solution est sous-saturée vis à vis du minéral qui a tendance à la dissolution (**Ammary, 2007**).

Sur la base des équilibres thermodynamiques, il est possible de définir une évolution chimique dans l'aquifère de la région d'étude. Pour cela la tendance des formes chimiques, entre les phases dissoute et minérale, a été examinée.

Le logiciel Diagramme (**Simler, 2006**) a été utilisé pour le calcul des indices de saturation à partir des activités ioniques.

**Tableau 34.** Paramètres statistiques de l'indice de saturation des eaux souterraines de la nappe de Guelma (Basses eaux, 2005)

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
<b>IS Anhydrite</b>	-2.060	-1.380	-1.742	0.187
<b>IS Aragonite</b>	-0.570	-0.080	-0.345	0.151
<b>IS Calcite</b>	-0.430	0.060	-0.203	0.152
<b>IS Dolomite</b>	-0.960	-0.090	-0.532	0.257
<b>IS Gypse</b>	-1.840	-1.160	-1.523	0.187
<b>IS Halite</b>	-7.000	-6.200	-6.560	0.236

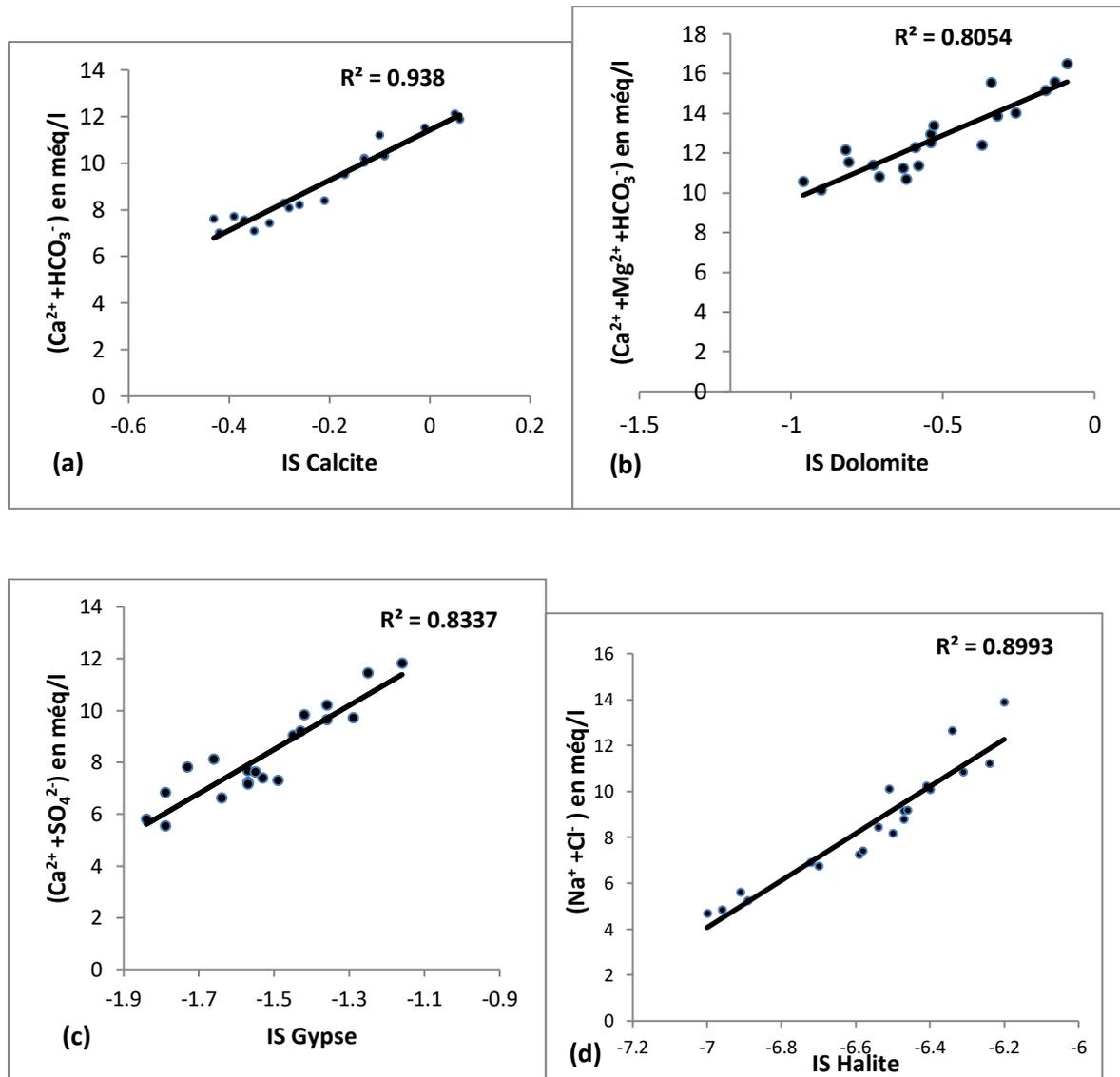
L'indice de saturation calculé exprime le degré d'équilibre chimique entre l'eau et le minéral dans la matrice de l'aquifère et peut être considéré comme une mesure du processus de dissolution et/ou précipitation concernant l'interaction eau-roche (**Maas et al, 1976**).

D'après les valeurs obtenues, les eaux de la nappe alluviale de Guelma, sont sous-saturées par rapport à la halite, à la calcite, au gypse et à la dolomite, favorisant la dissolution de ces minéraux évaporitiques et carbonatés, donc les minéraux carbonatés tendent à se dissoudre et enrichissent les eaux souterraines en  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{HCO}_3^-$  et les formations évaporitiques gypsifères vont enrichir ces eaux en  $\text{SO}_4^{2-}$  et en  $\text{Ca}^{2+}$ , ceci traduit en grande partie l'apport important en calcium.

Mais il faut signaler que c'est seulement les deux points d'eau (*forage Sonacom* et le *puits Bourouaih*) qui montrent un indice de saturation positive en calcite, donc ces eaux sont sursaturées par rapport à ce minéral, qui aura tendance à précipiter.

Des valeurs positives de l'indice de saturation reflètent des eaux souterraines de décharge d'un aquifère contenant une quantité suffisante de matière minérale avec suffisamment de temps de séjour pour atteindre l'équilibre. Néanmoins, la sursaturation peut également être produite par d'autres facteurs qui comprennent la dissolution incongruante, l'effet d'ion

commun, l'évaporation, l'augmentation rapide de la température et du  $\text{CO}_2$  en solution (Langmuir, 1997 ; Ako et al, 2010). (Mouncherou et al, 2011).



**Figure 73.** Corrélation des indices de saturation des eaux vis-à-vis, de la calcite, de la dolomite et du gypse en fonction de  $\text{Ca} + \text{HCO}_3$  (a),  $\text{Ca} + \text{Mg} + \text{HCO}_3$  (b) et  $\text{Ca} + \text{SO}_4$  (c), et respectivement, dans la période de basses eaux, 2005

Les graphes de la figure 74 attestent de l'existence d'une très bonne corrélation positive entre l'indice de saturation de la calcite et les ions  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , une assez bonne corrélation du gypse avec les ions  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , de la dolomite et les ions  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , et de celui de la halite et les ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$ . Cette bonne corrélation reflète un état de sous-saturation des eaux souterraines de la nappe aquifère de Guelma en ces quatre minéraux. Ceci donne une idée sur le temps de séjour de ces eaux. Si nous prenons le temps de contact des eaux souterraines de la nappe avec les dolomites, ce dernier ne peut être que court, car la cinétique de la dissolution de la dolomite est plus lente que la dissolution de la calcite (Malcuit, 2012).

#### IV.6 L'échange ionique

L'utilisation de l'indice d'échange de base (i.e.b.) permet de mettre en évidence les modifications du chimisme de l'eau au cours de son trajet. Par définition, l'i.e.b est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existants dans l'eau. Il est obtenu par la relation suivante (Hamzaoui, 2012):

$$i.e.b = \frac{rCl - r(Na + K)}{rCl}$$

Pour l'ensemble des échantillons prélevés, l'indice d'échange de base (i.e.b) est positif alors les ions  $Na^+$  et  $K^+$  de l'eau sont remplacés par les ions  $Mg^{2+}$  et  $Ca^{2+}$  des formations encaissantes. Ceci explique l'enrichissement des eaux de la nappe aquifère de Guelma par les cations  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$ , donc à la base le faciès chimique de ces eaux est chloruré sodique, mais l'étendu de l'échange de base avec les argiles a donné naissance au faciès chloruré calcique et magnésien.

**Tableau 35.** Paramètres statistiques de l'indice d'échange de base pour les eaux de la nappe alluviale de Guelma (basses eaux 2005)

Paramètres statistiques	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Indice d'échange de base	0.334	0.761	0.549	0.121

#### IV.7 Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est l'une des méthodes d'analyse de données multivariées les plus utilisées. Dès lors que l'on dispose d'un tableau de données quantitatives (continues ou discrètes) dans lequel  $n$  observations sont décrites par  $p$  variables (des descripteurs, attributs, mesures, ...), si  $p$  est assez élevé, il est impossible d'appréhender la structure des données et la proximité entre les observations en se contentant d'analyser des statistiques descriptives univariées ou même une matrice de corrélation.

Il existe plusieurs applications pour l'ACP, parmi lesquelles :

- l'étude et la visualisation des corrélations entre les variables, afin d'éventuellement limiter le nombre de variables à mesurer par la suite ;
- l'obtention de facteurs non corrélés qui sont des combinaisons linéaires des variables de départ, afin d'utiliser ces facteurs dans des méthodes de modélisation telles que la régression linéaire, la régression logistique ou l'analyse discriminante ;
- la visualisation des observations dans un espace à deux ou trois dimensions, afin d'identifier des groupes homogènes d'observations, ou au contraire des observations atypiques (XLSTAT, 2013).

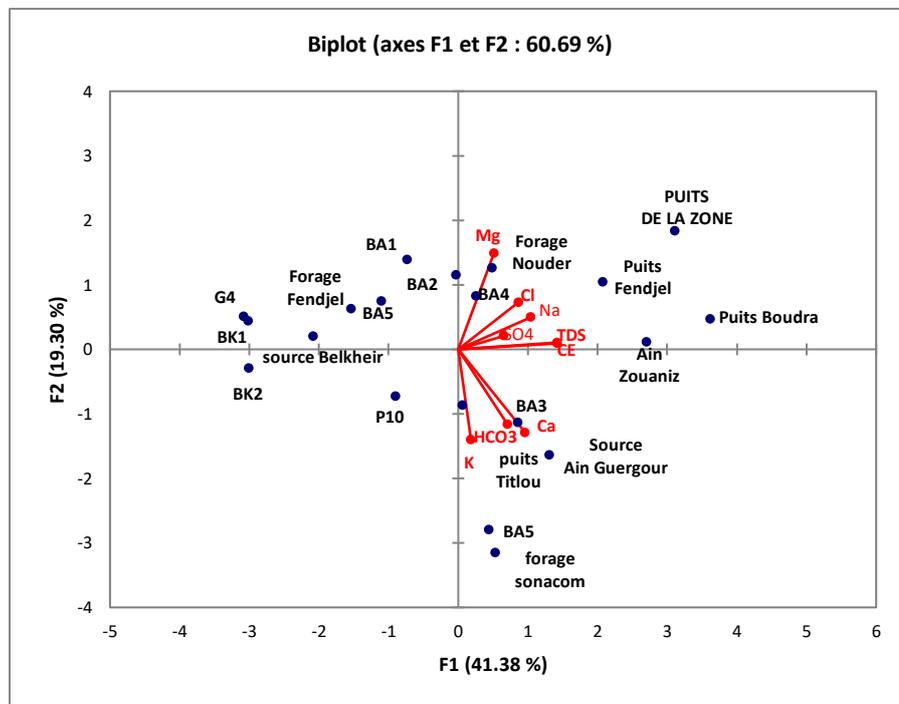
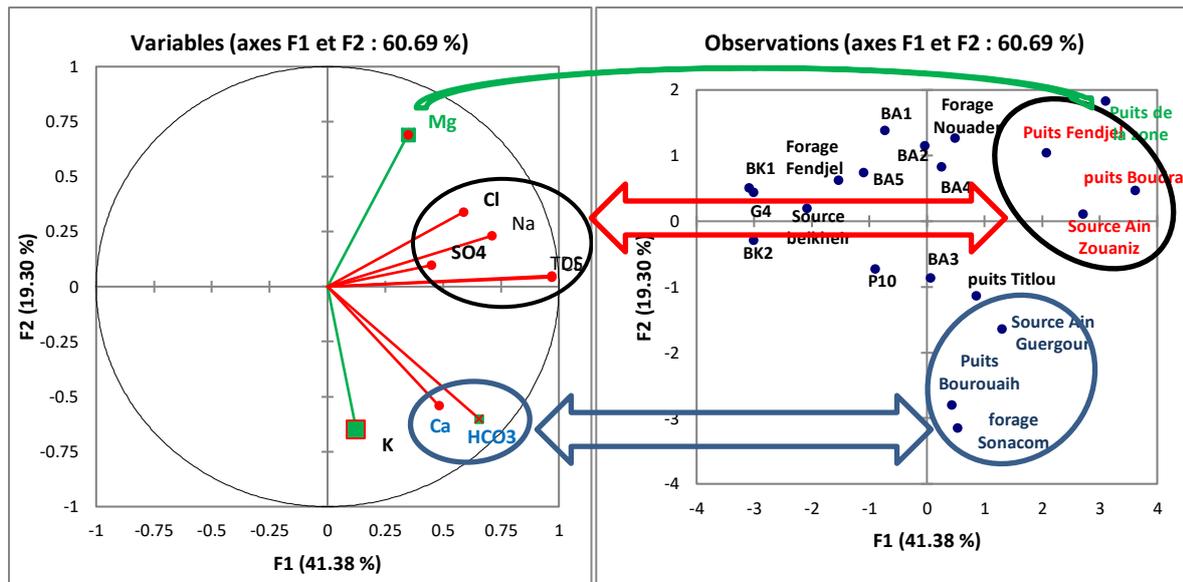
Pour l'ensemble des eaux, les deux premiers axes expliquent 60.69% de la variance. L'axe F1 représente 41.38% de la variance et montre une bonne corrélation entre les sulfates (Fig.74),

les chlorures, le sodium et la salinité, indiquant que ce sont ces ions principalement qui contrôlent la salinisation des eaux. Cependant l'halite est beaucoup plus soluble que le gypse et très peu d'halite drainée suffit pour donner à une eau une signature en NaCl typique. Néanmoins des travaux comme ceux de Hodge (1996) montrent une corrélation entre  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  importante due à l'influence directe de la dissolution de l'halite, mais aussi due aux apports de sulfates provenant de la dissolution du gypse conjointement à la dissolution de l'halite (Malcuit, 2012).

Pour le même axe (F1), les ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{HCO}_3^-$  semblent très bien corrélés (Fig.74), traduisant leur origine commune, qui est la dissolution des formations d'évaporites calcaires. Les points prélevés en relation avec ces deux ions sont ceux localisés dans la nappe des travertins (Puits Bourouaih, source Ain Guergour, forage Sonacom) (Fig. 74).

Pour les observations, on note la bonne relation entre le *puits Boudra*, *puits Fendjel* et la source *Ain Zouaniz* avec la salinité et les ions  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ . La figure 74, montrent que ces points de prélèvement sont en excès en  $\text{Na}^+$  (Ain Zouaniz et puits Fendjel) et en  $\text{Cl}^-$  (Puits Boudra).

L'axe 2, qui traduit 19.30% de la variance, prend en compte le  $\text{Mg}^{2+}$  particulièrement anti corrélé avec les ions  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{K}^+$ . L'échantillon qui en relation avec le Mg est le *puits de la zone* (Fig. 74).



C. Projection sur le plan I-II des observations et des variables

Figure 74. ACP des eaux souterraines de la nappe aquifère de Guelma (Basses eaux, 2005)

#### IV.8 La classification ascendante hiérarchique (CAH)

Le dendrogramme représente de manière claire la façon dont l'algorithme procède pour regrouper les individus puis les sous-groupes.

Ces regroupements successifs produisent un arbre binaire de classification (dendrogramme) dont la racine correspond à la classe regroupant l'ensemble des individus. Ce dendrogramme représente une hiérarchie de partitions.

On peut alors choisir une partition en tronquant l'arbre à un niveau donné, le niveau dépendant, soit des contraintes de l'utilisateur (l'utilisateur sait combien de classes il veut obtenir), soit de critères plus objectifs (XLSTAT, 2013).

#### IV.8.1 La classification ascendante hiérarchique des observations

La ligne en pointillé représente la troncature et permet de visualiser que trois groupes homogènes ont été identifiés. Le troisième groupe est plus homogène que le premier et le deuxième groupe (le dendrogramme est plus plat pour le troisième groupe) (fig. 75).

La carte des classes des observations, montre la prédominance de la classe 2 qui inclue 45% des échantillons.

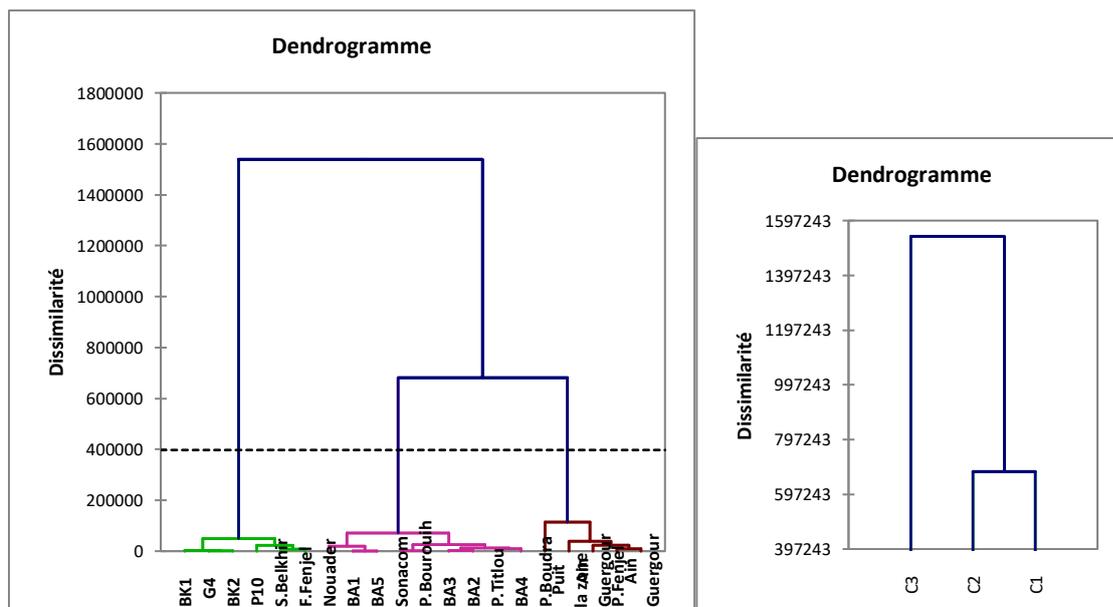
#### IV.8.2 La classification ascendante hiérarchique des variables

Les classes des variables, traduisent la relation qui existe entre ces paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe alluviale de Guelma (fig. 75).

La classe 3, lie le  $\text{Cl}^-$  et la salinité, puisque cet ion contribue largement à l'augmentation de la minéralisation des eaux, vu que l'halite est très soluble et aussi une fois que cet élément est dissous dans l'eau, il n'entre pas en réaction avec la roche réservoir, donc il est plus conservatif.

La classe 1 lie le  $\text{Ca}^{2+}$  aux ions  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ , cela traduit probablement l'origine évaporitique calcaire et gypsifère du calcium.

La classe 2, lie les cations alcalinoterreux ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{Mg}^{2+}$ ), qui participent dans l'échange de base entre l'eau et la roche (fig. 76 & 77).



**Figure 75.** Classification ascendante hiérarchique des observations des eaux de la nappe alluviale de Guelma (Basses eaux, 2005)



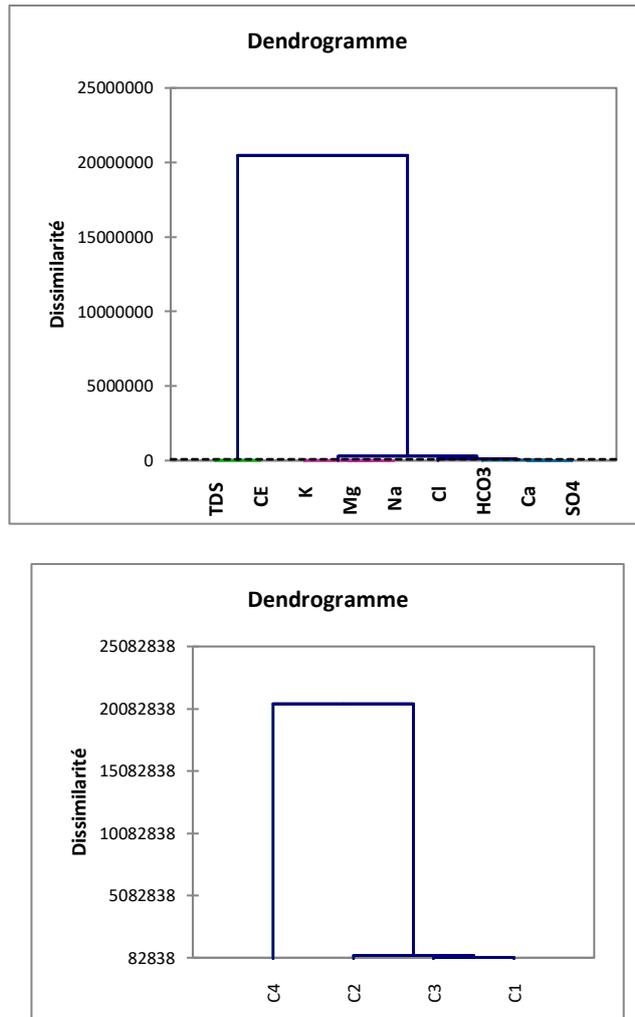


Figure 77. Classification ascendante hiérarchique des variables dans les eaux de la nappe alluviale de Guelma (Basses eaux, 2005).

Tableau 36. Classes des variables dans les eaux souterraines de l’aquifère de Guelma (Basses eaux, 2005)

Observation	Classe
Ca <sup>2+</sup>	1
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	
Mg <sup>2+</sup>	2
Na <sup>+</sup>	
K <sup>+</sup>	3
Cl <sup>-</sup>	4
TDS	
CE	

#### IV.9 Conclusion

Nous retiendrons de ce chapitre les points suivants :

En somme, un seul faciès chimique d'eau apparait, c'est le faciès chloruré calcique, qui est à la base chloruré sodique, ceci est confirmé par les indices d'échange de base qui sont en faveur de la fixation du sodium et la libération du calcium par les formations argilo-marneuses miocènes.

L'évolution de la salinité en fonction du rapport  $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ , met en relief que ce sont les évaporites qui participent en grande partie dans la minéralisation de ces eaux, en particulier les formations évaporitiques salifères qui soulignent plus cette minéralisation que les évaporites gypsifères.

Concernant l'origine des éléments majeurs, les teneurs en chlorures présentent des valeurs importantes à celle du sodium, à cause des caractéristiques particulières de cet élément qui est conservé, toutefois l'appauvrissement en sodium est traduit par le phénomène d'échange de base entre la matrice argileuse et l'eau, qui fait que le  $\text{Na}^+$ , peut se fixer à la place du  $\text{Ca}^{2+}$ , d'où l'appauvrissement en cet ion et la prédominance des ions  $\text{Cl}^-$  dans les eaux souterraines.

L'indice de saturation calculé exprime le degré d'équilibre chimique entre l'eau et le minéral dans la matrice de l'aquifère et peut être considéré comme une mesure du processus de dissolution et/ou précipitation concernant l'interaction eau-roche

D'après les valeurs obtenues, les eaux de la nappe alluviale de Guelma, sont sursaturées par rapport à la calcite, au gypse et à la dolomite, favorisant la précipitation de ces minéraux évaporitiques et carbonatés, donc les minéraux carbonatés tendent à précipiter sous la forme de calcite et dolomite.

L'analyse en composantes principales, montre selon l'axe (F1) une bonne corrélation entre les sulfates et les chlorures, le sodium et la salinité. Pour le même axe (F1), les ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{HCO}_3^-$  semblent très bien corrélés, traduisant leur origine commune, qui est la dissolution des formations d'évaporites calcaires. Les points prélevés en relation avec ces deux ions sont ceux localisés dans la nappe des travertins (Puits Bourouaih, source Ain Guergour, forage Sonacom).

Pour les observations, on note la bonne relation entre le *puits Boudra*, *puits Fendjel* et l'axe 2, qui traduit 19.30% de la variance, prend en compte le  $\text{Mg}^{2+}$  particulièrement anti corrélé avec les ions  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{K}^+$ .

La classification ascendante hiérarchique (CAH) des observations a permis de visualiser l'existence de trois groupes homogènes. Le troisième groupe est plus homogène que les deux autres.

La carte des classes des observations montre la prédominance de la classe 2 qui inclue 45% des échantillons.

Concernant la classification ascendante hiérarchique des variables, les classes des variables, traduisent la relation qui existe entre les paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe alluviale de Guelma.

La classe 3, lie le Cl<sup>-</sup> et la salinité, puisque cet ion contribue largement à l'augmentation de la minéralisation des eaux. La classe 1 lie le Ca<sup>2+</sup> aux ions HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, cela traduit probablement l'origine évaporitique calcaire et gypsifère du calcium.

La classe 2, lie les cations alcalinoterreux (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> et Mg<sup>2+</sup>), qui participent dans l'échange de base entre l'eau et la roche.

## Introduction

La méthodologie consiste à synthétiser toutes les informations hydrogéologiques, lithologiques, géophysiques, hydroclimatologiques et hydrodynamiques relatives à la nappe aquifère et à établir un modèle numérique représentatif et simplifié sur la base du Logiciel Visual Modflow. Dans une première phase toutes les données collectées sont introduites sous une forme discrétisée, et après calage, dans seconde phase procéder à son exploitation.

## V.1 Etablissement du modèle

### V.1.1 Les conditions aux limites

Les limites sont concrétisées par des conditions mixtes de Fourier au niveau de l'Oued Seybouse et de ses affluents, ainsi qu'au niveau des sources. Les limites étanches sont matérialisées : au Nord-Ouest par les argiles gypseuses et marnes gypseuses du Miocène, au Nord-Est par les argiles numidiennes, au Sud-Est par les argiles du Médjanien, au Sud-Ouest par les argiles gypseuses et marnes gypseuses et plus à l'ouest par les argiles du Médjanien.

Les limites du modèle sont fixées par les contraintes hydrogéologiques et n'incluent que la zone où l'information hydrogéologique est disponible surtout pour les relevés piézométriques.

### V.1.2 Schéma du modèle

La grille que nous avons réalisée est composée de 2600 mailles carrées de 200 m de coté. Le nombre de mailles représentant la nappe est de 1198. (fig. 78).

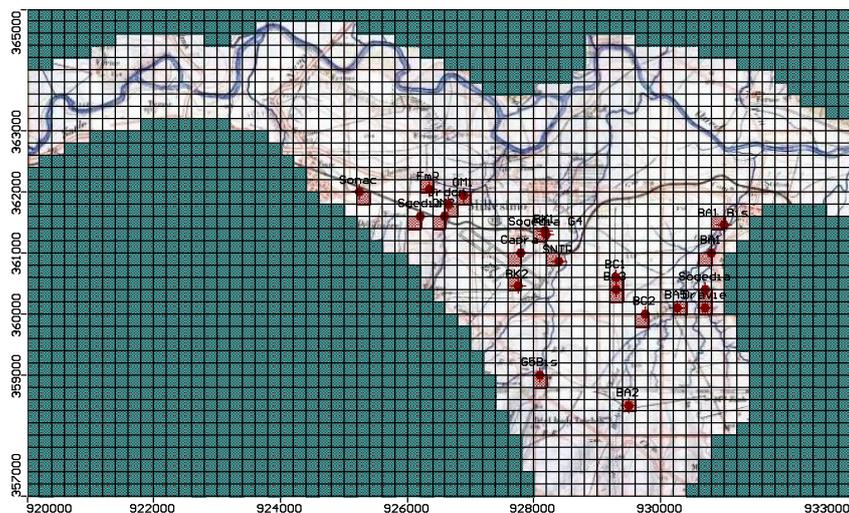


Figure 78. Schéma du modèle

### V.1.3 Piézométrie

Nous avons intégré dans le modèle les données piézométriques de la période de hautes eaux de l'année 2009 grâce aux mesures du niveau piézométrique dans les forages et des piézomètres nouvellement implantés (DHW de Guelma). Les courbes représentent les équipotentielles de la surface piézométrique de la nappe et servent de conditions initiales de l'état hydrodynamique de l'aquifère (fig. 79).

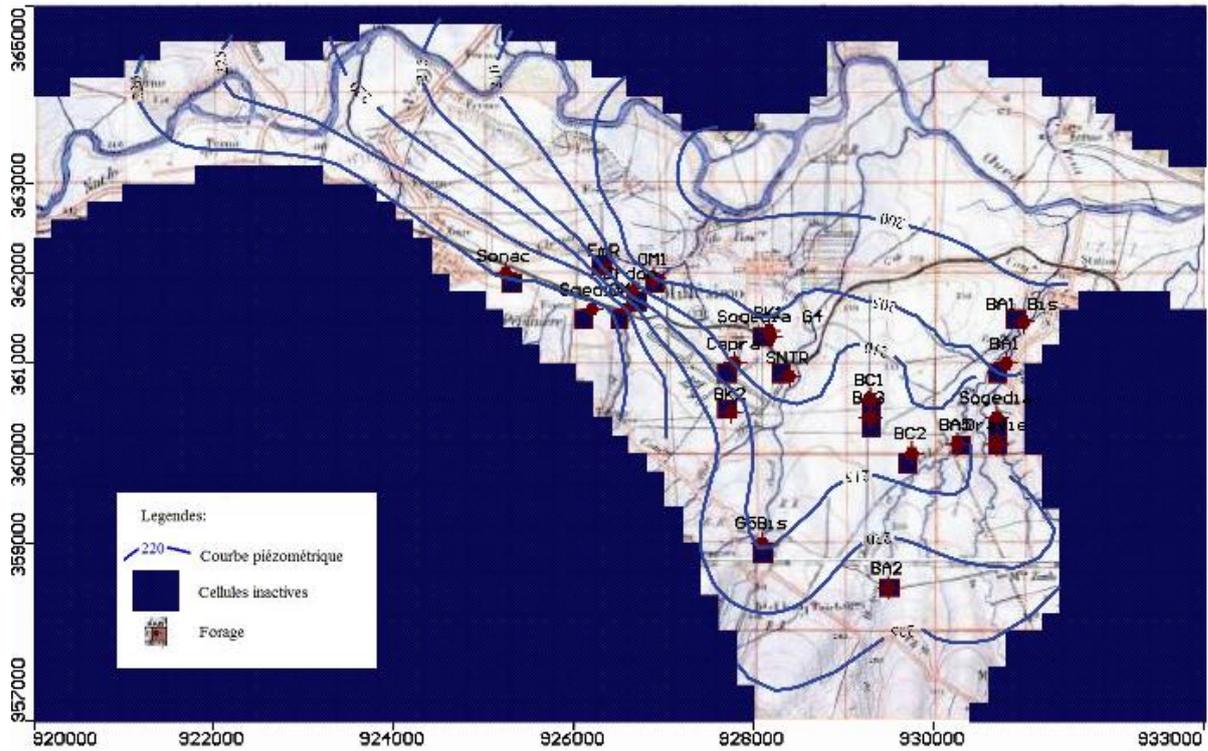


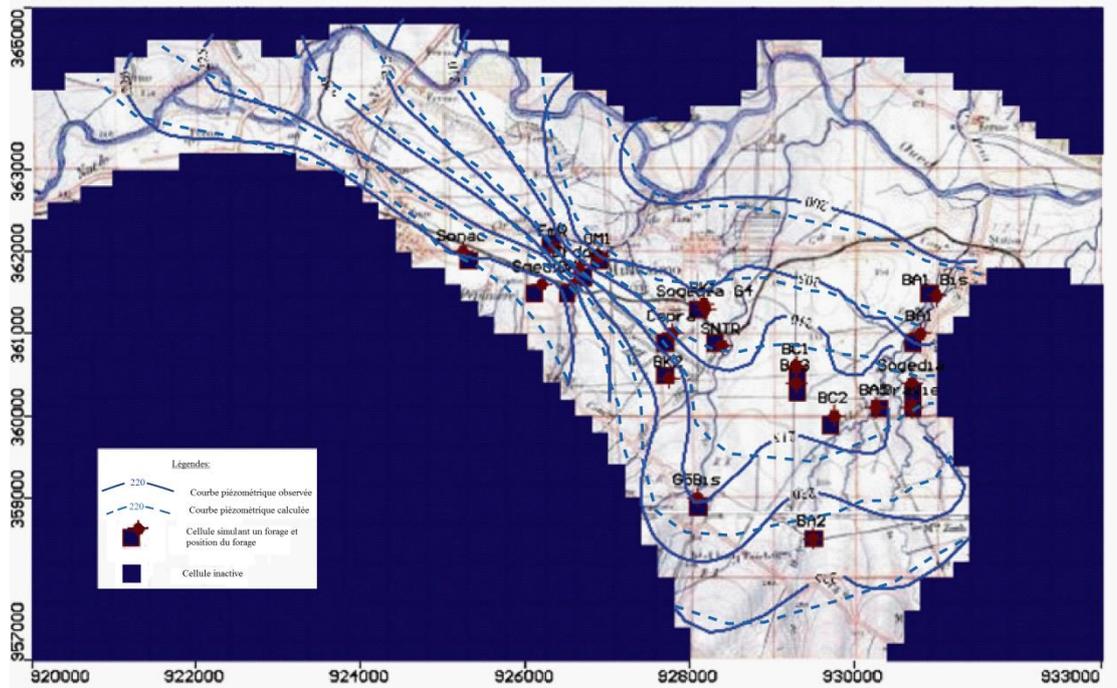
Figure 79. Piézométrie de la nappe intégrée dans les modèles hautes eaux 2009.

### V.1.4 Les paramètres hydrogéologiques

Le coefficient de perméabilité varie de entre  $10^{-2}$  et  $10^{-4}$  m/s pour la nappe de la vallée actuelle de l'Oued Seybouse, alors que celui de la nappe de la haute terrasse est compris entre  $10^{-3}$  et  $10^{-5}$  m/s. Dans la plaine de la haute terrasse la valeur du coefficient de perméabilité la plus importante se localisent au centre avec des valeurs de  $10^{-3}$  m/s (fig. 81) Le coefficient d'emmagasinement est évalué par essai de pompage à 0.01.

La procédure de calage n'a pu être réalisée qu'en régime permanent avec la piézométrie d'Avril 2009, données fournies par la DHW de Guelma où les mesures ont été faites dans les forages et les piézomètres nouvellement implantés, et qui ne couvrent pas la totalité de l'aquifère.

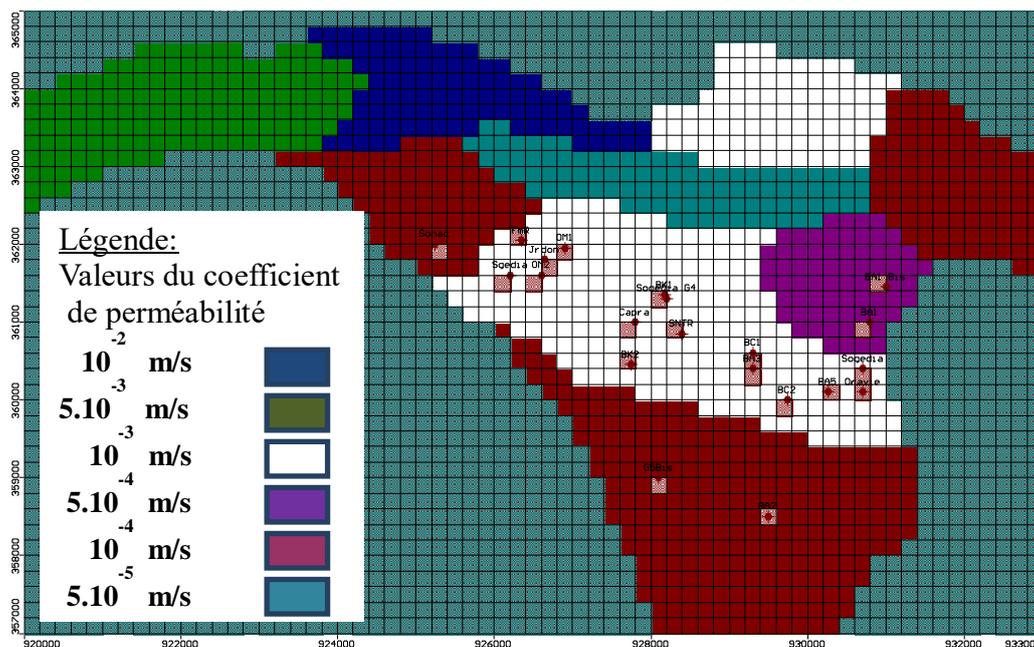
Selon le schéma d'attribution des conditions aux limites en régime permanent. Les résultats du modèle numérique révèlent une acceptable reconstitution des niveaux piézométriques pour la période de hautes eaux (Avril 2009) avec des écarts absolus compris entre 0 et 2 m (fig. 80).



**Figure 80** : Piézométrie observée et calculée en régime permanent (période de hautes eaux Avril 2009)

Nous avons pu dégager des zones de valeurs du coefficient de perméabilité (fig. 82). Les valeurs obtenues par essai de pompage ont servi de référence et n'ont pas été changées au cours de la procédure de calage.

Cette procédure de calage n'est qu'une première approche, il serait nécessaire pour la représentativité du modèle de pouvoir réaliser un calage en régime transitoire, avec des données piézométriques à différentes périodes, afin de définir les conditions aux limites surtout dans la partie sud de l'aquifère où les entrées sont relativement importantes et d'ajuster plus finement la carte du coefficient de perméabilité..



**Figure 81 :** Carte des valeurs du coefficient de perméabilité

Le débit des eaux souterraines a été évalué dans la zone d'alimentation et de vidange de l'aquifère.

**V.1.5 Les conditions aux limites**

Les conditions aux limites sont introduites sous forme de recharge pour l'infiltration efficace avec une valeur de 25.4 mm, déterminée par la méthode de Thorntwaite. Les flux souterrains entrants sont à l'Ouest de la vallée actuelle (12 l/s) et au Sud de la nappe de la haute terrasse (219 l/s) et par les travertins (110 l/s). Par contre le flux sortant (50 l/s) est situé à l'Est de nappe de la vallée actuelle de l'Oued Seybouse. Les débits ont été calculés sur la base de la piézométrie d'Avril 2009 selon la méthode de Darcy (fig. 83).

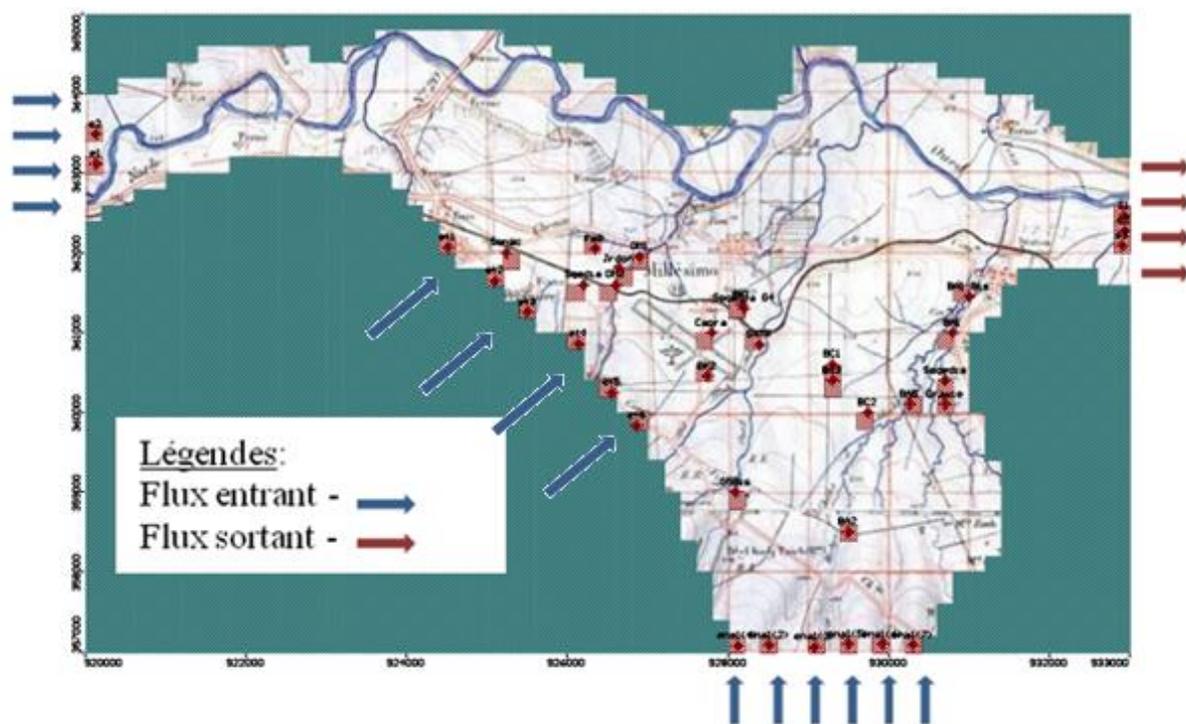
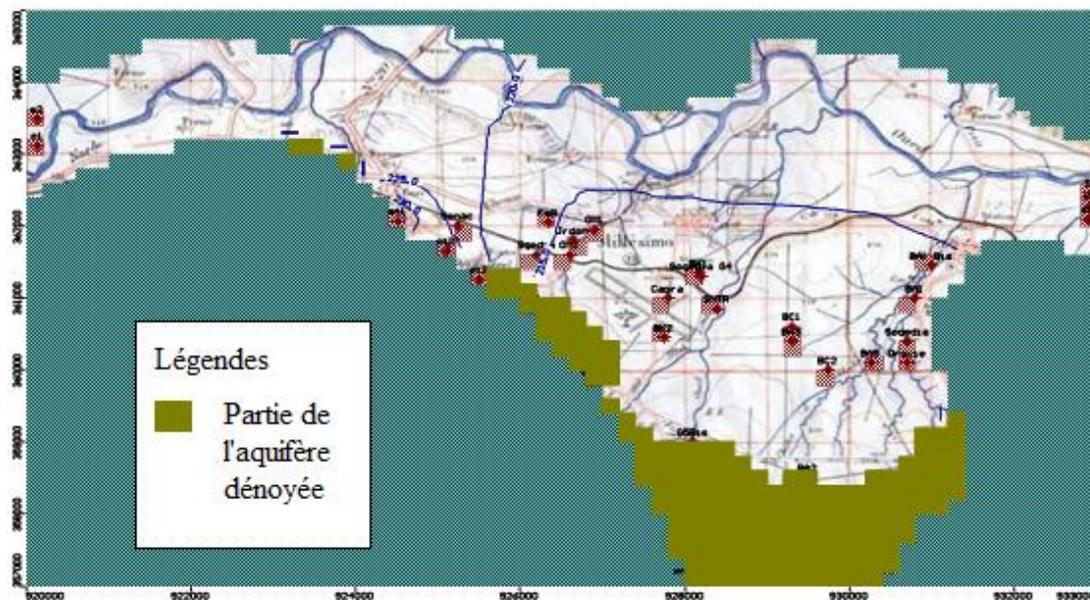


Figure 82. Conditions aux limites de la nappe alluviale

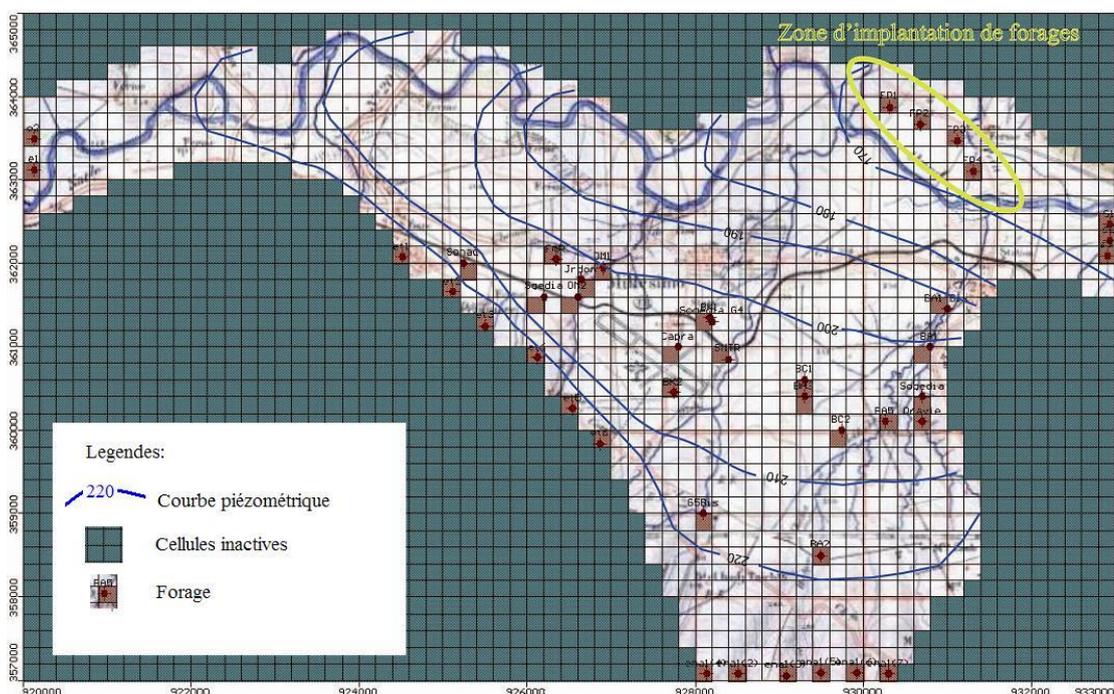
## V.2 Exploitation du modèle

Le schéma d'exploitation actuel, sur le long terme avec un pompage ininterrompu et concentré dans une zone restreinte avec un débit global de 323 l/s, pourrait provoquer un abaissement du niveau piézométrique et conduire à l'épuisement de la partie sud de la nappe aquifère (fig. 84). Cette situation est due également au fait que l'épaisseur des formations alluvionnaires deviennent de plus en plus minces et se termine en biseau en allant vers le Sud.



**Figure 83.** Résultat de la situation hydrodynamique de la nappe aquifère, simulée selon le schéma d’exploitation actuel.

Une zone proposée à l’implantation de forages pourrait être favorable, car elle se caractérise par une bonne transmissivité, grâce à l’épaisseur effective importante de l’aquifère, et par sa bordure avec les formations pliocènes perméables du Djebel Zemzouma, qui peut constituer un réservoir en eaux souterraines (fig. 85).



**Figure 84.** Schéma d’une exploitation avec des forages fictifs.

Les résultats de la simulation ont montré une baisse sensible du niveau piézométrique surtout dans la zone où sont concentrés les forages. Cependant dans la zone, où des forages fictifs ont été implantés avec un débit global de 80 l/s, le niveau piézométrique a légèrement baissé, ceci s'explique par le fait qu'il y a eu appel des eaux de surface de l'oued Seybouse vers la nappe et aussi parce que tout le flux souterrain de la haute terrasse se dirige vers la nappe alluviale de l'oued Seybouse.

### Conclusion

Les travaux de recherche sur les conditions hydrogéologiques des aquifères de la plaine de Guelma permettent d'aboutir aux conclusions suivantes :

✓ Le bassin hydrogéologique de Guelma est constitué de deux nappes principales : celle de la vallée actuelle et celle de la haute terrasse. Elles forment un ensemble hydrodynamique cohérent ayant des échanges hydrauliques complexes. Les travertins ont des coefficients de perméabilité très faibles et sont plutôt considérés comme semi perméables.

✓ Il apparaît, selon les considérations hydrogéologiques et hydrodynamiques que l'Oued Seybouse et ses affluents drainent les eaux souterraines du système, car tout le flux souterrain se dirige vers la nappe alluviale de l'oued Seybouse.

✓ L'exploitation actuelle des forages qui sont concentrés dans une zone très réduite peut provoquer une baisse sensible du niveau piézométrique et même une surexploitation de la nappe de la haute terrasse avec son épuisement dans sa partie sud.

✓ La zone se situant au Nord du village de Boumahra Ahmed pourrait faire l'objet d'une étude détaillée et approfondie, car l'étude géophysique montre une importante épaisseur d'alluvions perméables, favorisée par sa limite avec le djebel Zemzouma, qui est constitué de formations pliocènes perméables. Cette zone pourrait être, sur un plan hydrodynamique, intéressante et favorable à l'implantation de forages d'exploitation.

✓ Le modèle numérique, établi sur la base de toutes les données hydrogéologiques, géophysiques et hydro-climatologiques, après calage en régime permanent, propose une variante d'exploitation susceptible de mieux gérer les ressources en eau dans les aquifères dans la région de Guelma et

n'est qu'une première approche de la situation hydrogéologique. Cependant le modèle doit être amélioré et perfectionné avec de nouvelles données et des observations hydrogéologiques et hydroclimatologiques périodiques dans le temps pour que sa représentativité soit la plus fidèle possible.

## Conclusion générale

La nappe alluviale de Guelma est une partie intégrante du bassin versant de l'Oued Seybouse. Elle fait partie de la moyenne Seybouse. Elle couvre une superficie de l'ordre de 122 km<sup>2</sup> avec environ 25 km d'Est en Ouest et entre 3 et 10 km de largeur

L'étude des cadres physique, climatique et géologique nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

L'examen de la géologie a permis la détermination des surfaces occupées par la couverture quaternaire et celles où dominant les autres formations détritiques du Mio-Pliocène. Le tout est situé dans un cadre régional très compliqué marqué par la superposition de plusieurs nappes de charriage de la chaîne alpine.

Ce bassin est caractérisé par la présence d'une des plus grandes rivières de l'Algérie (oued Seybouse) qui coule d'Ouest en Est réagissant ainsi avec la nappe alluviale tout le long de son parcours.

Le climat de la région est semi aride tempéré, caractérisé par deux saisons : la première humide et froide (d'octobre à mai), la deuxième est sèche et chaude (de juin à décembre).

Les précipitations moyennes annuelles sont de 598.8 mm/an, l'évapotranspiration réelle est de 427.3 mm/an, représentant 71.36 % des pluies. La région révèle un déficit agricole de 541.7 mm/an qu'il faudrait compenser avec l'irrigation. Le déficit agricole commence à partir du mois d'Octobre avec un maximum au mois de Juillet (180.3 mm). La reconstitution de la réserve utile commence en Novembre et s'épuise au mois de Juin. L'écoulement se produit après que la RFU soit satisfaite (RFU=100 mm) et dure cinq mois (du mois de Décembre jusqu'à fin Avril) avec un maximum au mois de Janvier (79,6 mm).

La cuvette de Guelma se localise dans un contexte structural complexe et est entourée par diverses nappes, d'origine différente avec une histoire paléogéographique distincte, formant les hauteurs des différentes montagnes.

La géologie de la région est caractérisée par des formations allant du Quaternaire au Trias, présentant ainsi une lithologie très variée et qui comprend essentiellement : les

## Conclusion générale

alluvions (sable, gravier, cailloutis...), les grès, les marnes, les argiles, les flyschs et les calcaires

La dépression qui forme le réservoir aquifère de la vallée de Guelma est remplie par les alluvions plio-quaternaires. Ce remplissage constitue l'ancienne et l'actuelle terrasse de la vallée de la Seybouse.

La naissance de cet édifice est le résultat d'un enchaînement de différentes phases tectoniques accompagnées de plusieurs stades de régression et de transgression de la mer qui ont affecté la région.

Dans le cadre de notre étude nous avons essayé d'apporter une contribution à la mise en valeur des ressources de la plaine alluviale de Guelma et de cerner les potentialités qu'offrent le milieu et les contraintes naturelles de cette région.

La nappe alluviale de Guelma est constituée de trois unités différentes par leur stratigraphie et leur lithologie :

- L'unité de la vallée actuelle de l'oued Seybouse (basse terrasse);
- L'unité de la vallée ancienne (haute terrasse), dominant la première par une altitude variant entre 230 m à 280 m, et s'étend vers le Sud. L'épaisseur moyenne de cette nappe est de l'ordre de 100 m, la plupart des forages sont implantés dans cette terrasse ;
- L'unité des travertins, constituée sur la bordure sud-est de la haute terrasse, est profondément drainé par les petits oueds.

Les résultats des essais par pompage ont permis d'obtenir des valeurs de transmissivité comprises entre  $10^{-3} \text{ m}^2 / \text{s}$  et  $5. 10^{-3} \text{ m}^2 / \text{s}$  qui diminuent d'Ouest en Est et du Nord au Sud. Les valeurs du coefficient de perméabilité sont de l'ordre de  $10^{-5} \text{ m/s}$ . La transmissivité est importante, au niveau de la nappe des basses terrasses, où les plus fortes valeurs sont observées au voisinage du lit actuel de l'oued Seybouse. Dans la haute terrasse, les valeurs de transmissivité augmentent du Sud vers le Nord, où les alluvions deviennent plus grossières. On note les plus grandes valeurs de transmissivité ( $4,2.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ), au niveau de Chaabet Maamora

L'interprétation de la carte piézométrique a montré que l'allure des courbes isopièzes et le tracé des lignes de courant déterminent un sens de l'écoulement convergeant vers l'oued

## Conclusion générale

Seybouse (du Sud vers le Nord). A l'ouest, la nappe des hautes terrasses se fait alimentée latéralement par les travertins. La nappe des hautes terrasses, alimente la nappe des basses terrasses, suivant un axe de drainage d'orientation sud-ouest/ nord-est.

La carte des conditions aux limites présente une idée sur les différents sens de circulation souterraine des eaux et de leur provenance.

L'étude de l'origine des principaux éléments majeurs présents dans les eaux de la plaine de Guelma est conduite en utilisant les graphes binaires et l'analyse des indices de saturation vis-à-vis des minéraux potentiellement existant dans les eaux de surface.

Les ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  proviennent majoritairement de la dissolution de l'halite. Cependant, un enrichissement en ion  $\text{Cl}^-$  provient d'une contamination anthropique provoquée par le rejet des eaux usées urbaines et probablement avec un échange de base avec la matrice argileuse où  $\text{Na}^+$  de ces eaux, qui caractérise le faciès chloruré sodique, est remplacé par les ions  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Ca}^{2+}$  des formations encaissantes, nous aboutissons ainsi à un faciès chloruré calcique et magnésien.

L'indice de saturation montre que les eaux de surface de la plaine de Guelma sont pour la plupart sous-saturées en Halite et gypse mais sursaturées en calcite et dolomite, favorisant la précipitation de ces minéraux carbonatés calcaires et dolomitiques et la dissolution des formations évaporitiques salifères et gypsifères.

Le calcul de l'indice d'échange de base, indique que les eaux de l'oued Skhoun ont un indice d'échange de base négatif, traduisant un échange de  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  de l'eau par le  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  de la matrice argileuse, cependant les formations dolomitiques procurent à cette eau une concentration assez importante de  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ , ce qui masque cet échange de base.

Pour les eaux de l'oued Seybouse et de l'oued Boussora, on note un enrichissement en  $\text{Na}^+$  et en  $\text{K}^+$ , malgré le fait que l'indice d'échange de base traduit la fixation de ces deux éléments par les argiles et la libération des alcalino-terreux ( $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ ), ceci laisse supposer que ce phénomène d'échange de base n'est pas assez important par rapport à l'apport en  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ , dû au lessivage des formations gypsifères et carbonatées ou bien attribué à une précipitation secondaire de calcite.

La pollution organique est soulignée par la présence de teneurs élevées en nitrites, surtout au niveau des stations de prélèvement proche des points de rejets des eaux usées, comme c'est le cas pour la station Sb2 et Sb4.

Les cinq stations de prélèvement indiquent une contamination des eaux par l'azote ammoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ), la teneur la plus élevée est observée au niveau de l'oued Maiz où un volume important d'eau usée brute est déversé dans cet affluent.

La projection de l'azote dans le diagramme d'équilibre du potentiel redox en fonction du pH, montre qu'il se présente dans la plage de stabilité de l'ammonium  $\text{NH}_4^+$ , mais les résultats obtenus montrent que les teneurs en nitrites sont plus élevées que celles en  $\text{NH}_4^+$ , cette

## Conclusion générale

différence est sûrement liée à l'effet des rejets qui introduisent dans l'eau de l'oued des  $\text{NO}_2^-$  en solution dans des conditions initiales (Eh et pH) différentes à celles de l'oued. Ce qui permet à ces éléments d'apparaître dans l'eau de l'oued sous des conditions qui ne correspondent pas à l'état naturel de ces espèces chimiques.

Pour l'hydrochimie des eaux souterraines, nous retiendrons les points suivants :

En somme, un seul faciès chimique d'eau apparaît, c'est le faciès chloruré calcique, qui est étai à la base chloruré sodique, ceci est confirmé par les indices d'échange de base qui sont en faveur de la fixation du sodium et la libération du calcium par les formations argilo-marneuses miocènes.

L'évolution de la salinité en fonction du rapport  $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ , met en relief que les évaporites qui participent en grande partie dans la minéralisation de ces eaux, en particulier les formations évaporitiques salifères qui soulignent plus cette minéralisation que les évaporites gypsifères.

Concernant l'origine des éléments majeurs, les teneurs en chlorures présentent des valeurs importantes à celle du sodium, à cause des caractéristiques particulières de cet élément qui est conservé, toutefois l'appauvrissement en sodium est traduit par le phénomène d'échange de base entre la matrice argileuse et l'eau, qui fait que le  $\text{Na}^+$ , peut se fixer à la place du  $\text{Ca}^{2+}$ , d'où l'appauvrissement en cet ion et la prédominance des ions  $\text{Cl}^-$  dans les eaux souterraines.

L'indice de saturation calculé exprime le degré d'équilibre chimique entre l'eau et le minéral dans la matrice de l'aquifère et peut être considéré comme une mesure du processus de dissolution et/ou précipitation concernant l'interaction eau-roche

D'après les valeurs obtenues, les eaux de la nappe alluviale de Guelma, sont sursaturées par rapport à la calcite, au gypse et à la dolomite, favorisant la précipitation de ces minéraux évaporitiques et carbonatés, donc les minéraux carbonatés tendent à précipiter sous la forme de calcite et dolomite.

L'analyse en composantes principales montre, selon l'axe F1, une bonne corrélation entre les sulfates et les chlorures, le sodium et la salinité. Pour le même axe F1, les ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{HCO}_3^-$  semblent très bien corrélés, traduisant leur origine commune, qui est la dissolution des formations d'évaporites calcaires. Les points prélevés en relation avec ces deux ions sont ceux localisés dans la nappe des travertins (Puits Bourouaih, source Ain Guergour, forage Sonacom).

La classification ascendante hiérarchique (CAH) des observations a permis de visualiser l'existence de trois groupes homogènes. Le troisième groupe est plus homogène que les deux autres.

La carte des classes des observations, montre la prédominance de la classe 2 qui inclue 45% des échantillons.

## Conclusion générale

Concernant la classification ascendante hiérarchique des variables, les classes des variables, traduisent la relation qui existe entre ces paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe alluviale de Guelma.

La classe 3, lie le  $\text{Cl}^-$  et la salinité, puisque cet ion contribue largement à l'augmentation de la minéralisation des eaux. La classe 1 lie le  $\text{Ca}^{2+}$  aux ions  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ , cela traduit probablement l'origine évaporitique calcaire et gypsifère du calcium.

La classe 2, lie les cations alcalinoterreux ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{Mg}^{2+}$ ), qui participent dans l'échange de base entre l'eau et la roche.

Les travaux de recherche sur les conditions hydrogéologiques des aquifères de la plaine de Guelma permettent d'aboutir aux conclusions suivantes :

✓ Le bassin hydrogéologique de Guelma est constitué de deux nappes principales : celle de la vallée actuelle et celle de la haute terrasse. Elles forment un ensemble hydrodynamique cohérent ayant des échanges hydrauliques complexes. Les travertins ont des coefficients de perméabilité très faibles et sont plutôt considérés comme semi perméables.

✓ Il apparaît, selon les considérations hydrogéologiques et hydrodynamiques que l'Oued Seybouse et ses affluents drainent les eaux souterraines du système, car tout le flux souterrain se dirige vers la nappe alluviale de l'oued Seybouse.

✓ L'exploitation actuelle des forages qui sont concentrés dans une zone très réduite peut provoquer une baisse sensible du niveau piézométrique et même une surexploitation de la nappe de la haute terrasse avec son épuisement dans sa partie sud.

✓ La zone se situant au Nord du village de Boumahra Ahmed pourrait faire l'objet d'une étude détaillée et approfondie, car l'étude géophysique montre une importante épaisseur d'alluvions perméables, favorisée par sa limite avec le djebel Zemzouma, qui est constitué de formations pliocènes perméables. Cette zone pourrait être, sur un plan hydrodynamique, intéressante et favorable à l'implantation de forages d'exploitation.

✓ Le modèle numérique établi, n'est qu'une première approche de la situation hydrogéologique des aquifères dans la région de Guelma et qu'il doit être amélioré et perfectionné pour que sa représentativité soit la plus fidèle possible.

## Bibliographie

### Références bibliographiques

**Ammary B. (2007).** Etude géochimique et isotopique des principaux aquifères du bassin Crétacé d'Errachidia et de la plaine de Tafilalet. Thèse de Doctorat, université de Mohamed V Agdal, Rabat. 134 page

**Anderson MP, Woessner WW (1992)** Applied groundwater modeling: simulations of flow and advective transport. Academic Press Inc, San Diego, CA.

**Andre L. (2002).** Contribution de la géochimie à la connaissance des écoulements souterrains profonds. Application à l'aquifère des Sables Infra-Molassiques du Bassin Aquitain. Thèse de Doctorat. Université Michel de Montaigne – Bordeaux 3. France. 209 page

**Blum A., Chery L., Barbier J., Baudry D. & Petelet-Giraud E. (2002).** Contribution à la caractérisation des états de référence géochimique des eaux souterraines. Outils et méthodologies. Rapport final, rapport BRGM RP-51549-FR, 5 vol.

**Banton O. et Banguoy L. M. (1999)** Hydrogéologie, Multiscience environnementale des eaux souterraines. Presse de l'université du Québec.

**Baumont S., Camard J.P., Lefranc A. & Franconi A., (2000).** Réutilisation des eaux usées épurées : risques sanitaires et faisabilité en Île-de-France. Etude de l'Observatoire régional de santé d'Ile-de-France. Ed. Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région Ile-de-France, pp : 222

**Bear J. & Verruijt A. (1990).** Modeling groundwater flow and pollution, D. Reidel Publishing Company. 414 p.

**Bechac J.P. ; Boutin P. ; Mercier B., et Nuer P., (1984)** – Traitement des eaux usées. Edition Eyrolles. Paris. 281p.

**Bekoussa. B (2009) :** Modélisation du transfert et de la propagation des nitrates dans les eaux souterraines de la plaine de Ghriss (Mascara). Thèse de Doctorat, université d'Oran. 179 p.

**Castany G. (1968).** Prospection et exploitation des eaux souterraines. Edition Dunod, Paris, 711 p.

**Chaib N. et Samraoui B. (2011).** Evaluation de la qualité physicochimique des eaux de l'oued Kebir-Est et de ses principaux affluents (Nord-Est algérien). Sècheresse vol. 22, n<sup>o</sup>3, 2011. pp 171-177.

**Clark, I. & Fritz, P., (1997).** Environmental Isotopes in Hydrogeology. Lewis, New York, USA.

**Cornaton F. et Perrochet P. (2007) :** Travaux Pratiques de Simulation Numérique des Ecoulements Souterrains et du Transport de Masse CHYN, Université de Neuchâtel.

## Bibliographie

**Coste C., Loudet M., (1987)** – L’assainissement en milieu urbain ou rural. Tome II : L’épuration et le traitement. Edition Moniteur. Paris, 271p.

**Craig, H.,(1961).** Isotopic variations in meteoric waters. *Science* **133**, 1702–1703.

**Darest de la Chavane (1910)** Etude spéciale des terrains tertiaires de la région de Guelma. Cartes géologiques au 1/50000 de Guelma et de la Mahouna Algérie.

**Debieche, T. H., (2002).** Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et minéraux lourds) sous l’effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Application à la basse plaine de la Seybouse- Nord-Est Algérien. Thèse de doctorat, U. F. R. des Sciences et Techniques de l’Université de Franche-Comté, France (199 p).

**Derradji F., Bousnoubra H., Kherici N., Romeo M. et Caruba R., (2007).** Impact de la pollution organique sur la qualité des eaux superficielles dans le Nord-Est algérien. *Sécheresse* 2007; volume 18 n°1, p 23-27

**Djidel M., Bousnoubra-Kherici H., Kherici N. et Nezli, I. E., (2008).** Alteration of the Aquifer Water in Hyperarid Climate, by Wastewater: Cases of Groundwater from Ouargla (Northern Sahara, Algeria). *American Journal of Environmental Sciences* 4 (6): 569-575

**Douagui A.G., Kouame I.K., Kouadio K., DibiB., Konan F.K. et Savane I. (2009).** Origines et modélisation de la minéralisation des eaux du Quaternaire d’Abidjan (Sud de la Côte d’Ivoire). *International journal of Biologie et Chemical Sciences*. octobre3(5): p856-869

**Edmunds W.M., Guendouz A.H., Mamou A., Moulla A., Shand P, & Zouari K., (2003).** Groundwater evolution in the continental intercalaire aquifer of southern Algeria and Tunisia: trace element and isotopic indicator. *Applied Geochemistry* 18. 805-822.

**El Mokhtar M., Fakir Y., El Mandour A., Benavente J., Meyer H., Stigter T., (2012),** Salinisation des eaux souterraines aux alentours des sebkhas de Sad Al Majnoun et Zima (plaine de la Bahira, Maroc). *Sécheresse* vol. 23, n°1, : pp 48–56.

**Faby J. A., (1997).** L’utilisation des eaux usées épurées en irrigation, Document technique. Ed. Office International de l’Eau, 76 p.

**Favreau G., (2000).** Caractérisation et modélisation d’une nappe phréatique en hausse au Sahel : dynamique et géochimie de la dépression piézométrique naturelle du Kori de Dantiandou (Sud-Ouest du Niger). Thèse de doctorat, université de paris XI, Orsay, France (258 p).

**Fidelibus M.D. et Tulipano L. (1996).** Regional flow of intruding sea water in the carbonate aquifers of Apulia (Southern Italy) .Proceedings 14th Salt Water Intrusion Meeting. Malmo, Sweden.

**Fedrigoni. L, Krimissa,M, , Kamel Zouari. K, Ahmed Maliki. A, Zuppi.G.M, (2001).** Origine de la minéralisation et comportement hydrogéochimique d’une nappe phréatique soumise à des contraintes naturelles et anthropiques sévères : exemple de la nappe de Djebeniana (Tunisie).*Earth and Planetary Sciences* 332.pp 665–671

## Bibliographie

**Gaud B. (1974)** Rapport sur l'étude hydrogéologique de la vallée de l'oued Seybouse (plaine de Guelma). DMRH Alger.

**Gaud B. (1976)** Etude hydrogéologique du système aquifère Annaba-Bouteldja. Système de reconnaissance et recherche des conditions de modélisation. (Rapport d'étude I.N.R.H. d'Annaba).

**Hamzaoui Z. F., Bouhlila R. et Gueddari M. (2012).** Caractérisation de la minéralisation des eaux de la nappe des grès du Trias (Sud-Est Tunisien) par les méthodes géochimiques et statistiques. *Geo-Eco-Trop.*, n 36, page 49-62

**Harbaugh AW (1990)** A computer program for calculating subregional water budgets using results from the U.S. Geological Survey modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. US GeolSurv Open File Rep 90-392

**Harbaugh AW, Banta ER, Hill MC, McDonald MG (2000)** MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model: user guide to modularization concepts and the ground-water flow process. US Geol Surv Open File Rep 00-92

**Kloppmann W., Bourhan A., Schomburgk (2011):** Salinisation des masses d'eau en France : Du constat au diagnostic. Partenariat Savoir 2010 action n°3. Rapport final. 41 p. Aout 2011.

**Kouzana L., Abdallah Ben Mammou A. Gaaloul N. (2007).** Intrusion marine et salinisation des eaux d'une nappe phréatique côtière (Korba, Cap-Bon, Tunisie). *Geo-Eco-Trop*, 2007, 31: 57-70

**Lahlou M., Badraoui M. et Souidi B (2000) :** Modélisation de l'évolution de la salinité et de l'alcalinité dans les sols irrigués. Séminaire 'Intensification agricole et qualité des sols et des eaux', Rabat, 2-3 Novembre 2000.

**Lalbat, F., (2006).** Fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère du miocène du bassin de Carpentras. Thèse de doctorat, université d'Avignon et des pays du Vaucluse, France (231 p).

**Leclercq L., (2001).** L'aridité intérêt et limites des méthodes d'estimation de la qualité de l'eau. Station scientifique des Hautes-Fagnes, Belgique, Document de travail, pp: 44.

**Maas E. V. et Homan. G.B. (1976).** Tolérance des cultures au sel ». Riverside, USA.

**Malcuit A. (2012).** Origine de la minéralisation des eaux dans un aquifère multicouche profond. Exemple de la zone minéralisée de l'Entre-Deux-Mers (Bassin aquitain, France). Thèse de Doctorat, Université Michel Montaigne Bordeaux3, France. 456p.

**McDonald M.G. & Harbaugh A.W., (1988).** A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. *Techniques of Water-Resources Investigations*, United States Geological Survey, Washington, DC, USA.

## Bibliographie

**Moulla, A.S. et Gendouz, A., (1996).** A survey of rainwater chemical and isotopic composition in north Algeria. Séminaire International sur l'Application des Techniques Isotopiques dans le Domaine des Ressources en Eau et en Sol. Mahdia, Tunisia (14-18 June 1996).

**Mouchrouf O.F., Amidou Moundi, Jules Remy, Ndam Ngoupayou, Andrew A. Ako, Pierre Wandji (2011).** Paramètres chimiques et source lithologique de la minéralisation des eaux souterraines des aquifères du Plateau Bamoun, Ligne Volcanique du Cameroun (LVC). Review of the Bulgarian geological Society, vol. 72, part 1–3, pp 67–78.

**Nezli I.E., Achour S., Djabri L. (2007).** Approche géochimique des processus d'acquisition de la salinité des eaux de la nappe phréatique de la basse vallée de l'oued M'ya (Ourgla). Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°06, Décembre 2007, 121-134 pp.

**Piper A. M. (1944).** A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. American Geophysical Union, Trans. 914-923.

**Ribolzi O., Valles V., Barbiéro L. (1993) :** Contrôle géochimique des eaux par la formation de calcite en milieu méditerranéen et en milieu tropical : arguments d'équilibre et argument de bilan. *Science du Sol*, 1993, 31 (1/2), 77-95 pp.

**Richards L.A., (1954).** Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. USDA Agricultural Handbook 60, Washington, 160 pp.

**Saidati Bouhlassa , Charifa Alechcheikh et Lahcen Kabiri (2008).** Origine de la minéralisation et de la détérioration de la qualité des eaux souterraines de la nappe phréatique du Quaternaire du bassin-versant de Rheris (Errachidia, Maroc). *Sécheresse vol. 19, n° 1, janvier-février-mars 2008 ; page 67-75*

**Schoeller H., (1956).** Géochimie des eaux souterraines : Application aux eaux de gisement de pétrole. Paris, 213p.

**Thangarajan M., (2007).** Groundwater Resource Evaluation, Augmentation, Contamination, Restoration, Modeling and Management. Edition Springer, Germany. 357 p.

**Tremblay P., (2005).** Etude hydrogéologique de l'aquifère de Saint-Honoré avec emphase sur son bilan hydrique. Mémoire pour l'obtention d'une maîtrise en science de la terre, Université du Québec, Canada (188 p).

**Tutoriel XLSTAT (2013) :** <http://www.xlstat.com>

**Vila J. M. 1980** La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens. Thèse docteur es sciences, Université de Pierre et Marie Curie. Paris VI France, 665 p.

**WHS (2008)** Visual MODFLOW v.4.3.0.154 user's manual. Schlumberger Water Services, Waterloo, Ontario, Canada.

## **Bibliographie**

**Yermani. M., Zouari K., Michelot J. L., Mamou A. et Moumni L. (2003):** Approche géochimique du fonctionnement de la nappe profonde de Gafsa Nord (Tunisie centrale). *Hydrological Sciences – Journal des Sciences Hydrologiques*, **48**(1) février 2003.14 page. p 95-108

**Zouggari H., (1996).** Modélisation des interactions ioniques dans les solutions concentrées d'électrolytes à partir de l'étude expérimentale de la solubilité des sulfates de sodium et de magnésium. Application aux saumures et aux sols salés en zone aride. Thèse de Doc. ENSA, Rennes (France). 184p.