

République Algérienne Démocratique et Populaire

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Université Constantine 1

N° d'ordre :

N° de série :

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département de Biologie et Ecologie

Mémoire de Magister en Ecologie et Environnement

Option : Gestion des déchets : Evaluation et Solutions Environnementales

Thème

**Niveaux de contamination par les Eléments Traces
Métalliques (Cd, Pb, Cu et Zn) de l'eau de production et
des sédiments des champs pétroliers du complexe G.E.A –
Hassi Messaoud**

Présenté par: KECHEBAR Mohamed Mehdi

Devant le jury :

Présidente :	Mme MECHAKRA Aicha	Prof	Université Constantine 1
Rapporteur:	Mme AFRI-MEHENNAOUI F. Zohra	M.C	Université Constantine 1
Examineurs:	Mme RACHED Oualida	Prof	Université Constantine 1
	Mr SAHEB Menaouar	M.C	Université d'Oum El Bouaghi

Soutenu le :

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes parents et mes frères.

Une dédicace spéciale à ma chère femme qui m'a été d'un grand soutien et n'a cessé de m'épauler.

Je dédie ce travail à tous mes enseignants

Je dédie ce travail à tous mes amis et proches, spécialement Chaker.

Remerciements

Tout d'abord je remercie Dieu tout puissant qui nous béni chaque jour par le savoir, la santé et le bien être.

*Je tiens à remercier particulièrement **Mme Afri-Mehennaoui F. Z.** Maitre de Conférences à l'Université de Constantine. Elle n'a cessé de m'apporter support et enseignement. Sa disponibilité, sa patience et sa claire voyance ont été des éléments clés à l'aboutissement de ce modeste travail. Qu'elle trouve dans ces quelques mots, le témoignage de ma profonde gratitude et ma plus haute considération.*

*Mes sincères remerciements vont à **Mme. Mechakra Aïcha**, Professeur à l'Université de Constantine, qui m'honore en présidant le jury de ce mémoire. Qu'elle trouve ici l'expression de ma reconnaissance*

*Mes sincères remerciements vont également à **Mme. Rached-Mosbah Oualida**, Professeur à l'Université de Constantine, qui m'honore en acceptant de bien vouloir juger ce travail. Je la remercie aussi de nous avoir fournie la logistique nécessaire au sein du laboratoire Biologie et Environnement.*

*Mes sincères remerciements vont également à **Mr Saheb Menaouar**, Maitre de Conférences à l'Université d'Oum El-Bouaghi, qui m'honore en acceptant de bien vouloir jugé ce travail.*

*Je n'oublierai pas de remercier également **Mr Mehennaoui Smaïl**, Professeur à l'université de Batna, pour sa disponibilité, ses conseils et son assistance tout au long de la durée de réalisation de ce travail.*

*Je remercie aussi **Mme Ouahrani Ghania** Professeur à l'Université de Constantine qui a œuvré pour la création et la mise en place de la Post-Graduation « Gestion des déchets – Diagnostic et Solutions environnementales » Oh combien importante pour l'Algérie, notamment dans la stratégie de développement actuelle orientée par les fondements du Développement Durable.*

Il me tient à cœur d'exprimer ma sincère gratitude à Mr Meraihia Djamel Responsable de la Post-Graduation au niveau du Département de Biologie et Ecologie Végétale, pour être à l'écoute des étudiants et pour n'avoir ménagé aucun effort pour faciliter les démarches administratives et permettre à ce travail d'aboutir. Je le remercie du fond du cœur.

Enfin, un remerciement spécial à tout le staff de SONAHESS GEA qui a contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Illustrations

Liste des figures

Figure 01	schéma d'un séparateur tri-phasique	09
Figure 02	Options de gestion de l'eau de production	11
Figure 03	coupe d'un forage illustrant un « cône d'eau »	12
Figure 04	coupe illustrant une double complétion	13
Figure 05	coupe illustrant une séparation de fond par hydro-cyclone	14
Figure 06	Coupe illustrant une séparation de fond par gravité	15
Figure 07	Localisation du complexe GEA	62
Figure 08	Résumé de la géomorphologie le long du tracé des pipelines (Source : RBA, 2005)	64
Figure 09	Etendue et écoulement général des aquifères du Sahara septentrional	69
Figure 10	température et ensoleillement du Sahara septentrional (Cloudsley-Thompson, 1984)	72
Figure 11	Tracé de la carte des vents à 10 mètres d'altitude en Algérie (source : ATLAS Vent ONM)	73
Figure 12	Sens et direction du vent (par vitesse et par fréquence)	73
Figure 13	Flore observée au niveau du complexe GEA	76
Figure 14	Localisation de GEA par rapport aux principales aires protégées (Source : UNEP-WDPA, 2005)	86
Figure 15	schéma simplifié du procédé de séparation	89
Figure 16	Gisement et installations du complexe GEA	90
Figure 17	Schéma général du flux des procédés de production à GEA	92
Figure 18	Schéma du flux de procédé de l'eau de production	96
Figure 19	hydro-cyclone type	97
Figure 20	Encapsulation des bulles de gaz par les gouttelettes d'huile	100
Figure 21	Représentation du scénario d'un évènement redouté selon le modèle « Nœud Papillon »	103
Figure 22	Déroulement de l'analyse des risques par la méthode	105

« Nœud papillon »

Figure 23	Matrice qualitative du risque (Source : SONAHESS, 2009)	110
Figure 24	localisation des points d'échantillonnage de l'eau de production	113
Figure 25	localisation des points de prélèvement des échantillons de sédiments associés à l'eau de production au niveau des bassins d'évaporation	114
Figure 26	localisation du point de prélèvement des échantillons de sédiment dans le puisard d'eau de production à GS-01	115
Figure 27	location du point de prélèvement des échantillons de sol dans la zone exposée aux déversements d'eau de production (El-Gassi)	115
Figure 28	localisation du point de prélèvement de l'échantillon du sol témoin	116
Figure 29	localisation des points de prélèvement de la végétation	117
Figure 30	Analyse minéralogique par DRX d'un dépôt au niveau du puits GS-15 (Source : TRICAN, 2009)	127
Figure 31	Menaces, barrières proactive	130
Figure 32	coûts opérationnels estimés des technologies disponibles pour la réhabilitation des sites contaminés par les métaux (Source : USEPA, 1996c)	139
Figure 33	individus d' <i>Oudneya africana</i> (site contaminé par les débordements d'eau de production des anciens bourbiers d'El-Gassi)	141
Figure 34	Distribution des concentrations en Zn dans les différents organes d' <i>Oudneya africana</i> en zone exposée et non exposée aux déversements d'eau de production	146
Figure 35	Distribution des concentrations en Pb dans les différents organes d' <i>Oudneya africana</i> en zone exposée et non	148

exposée aux déversements d'eau de production

Figure 36	Distribution des concentrations en Cd dans les différents organes d' <i>Oudneya africana</i> en zone exposée et non exposée aux déversements d'eau de production	150
Figure 37	Distribution des concentrations en Cu dans les différents organes d' <i>Oudneya africana</i> en zone exposée et non exposée aux déversements d'eau de production	152
Figure 38	Digramme Nœud papillon relative à l'évènement « débordement d'eau de production dans les bassins d'évaporation d'El-Gassi »	163
Figure 39	diagramme nœud papillon relative à l'évènement redouté « débordement d'eau de production des bassins d'El-Gassi	165

Liste des tableaux

Tableau 01	Affinité des ETMs pour le sol et les constituants du sol (source : Mc Llean et Bledose, 1992)	44
Tableau 02	Données pluviométriques pour Hassi Messaoud 1993-2003 (ONM, 2005)	66
Tableau 03	Avifaune se reproduisant régulièrement dans le désert (Source RBA, 2005)	80
Tableau 04	Avifaune observée à GEA (Source : RBA, 2005)	81
Tableau 05	seuils définis pour les éléments traces métalliques dans l'eau de production (Source : JORADP 26, 2006)	108
Tableau 06	seuils définis pour les éléments traces métallique dans les sédiments associés à l'eau de production	109
Tableau 07	Comparaison entre les concentrations moyennes des ETM dans l'eau de production affluent vers El-Gassi et les limites de rejet d'effluents liquides industriels	120
Tableau 08	Comparaison entre les concentrations moyennes des ETM dans l'eau de production affluent vers El-Agreb et les limites de rejet d'effluents liquides industriels	121
Tableau 09	Comparaison entre les concentrations moyennes des ETM dans les sédiments associés à l'eau de production et les valeurs limites dans les déchets	122
Tableau 10	spécifications du tube des conduites de production type ASTM A 106-95 (Source : Trouvay& Cauvin, 1998)	124
Tableau 11	spécifications du tube des conduites d'injection type API 5L (Source : Trouvay& Cauvin, 1998)	124
Tableau 12	Composition chimique des additifs utilisé dans le flux de procédé « eau de production »	125
Tableau 13	composition chimique l'eau de formation dans les gisements de GEA (Source : Sonahess, 2002)	126
Tableau 14	Composantes susceptibles d'être présentes et affectées par l'évènement redouté N°1	129
Tableau 15	paramètres physico-chimiques des sols exposé et non exposé aux déversements d'eau de production d'El-Gassi	134

Tableau 16	comparaison entre les concentrations moyennes en ETM du sol exposé au déversement d'eau de production et un sol non exposé	136
Tableau 17	Comparaison entre les concentrations moyennes en ETM mesurées dans le sol exposé aux déversements d'eau de production et les valeurs références pour les végétaux terrestres adoptés par l'USEPA	142
Tableau 18	: Comparaison entre les concentrations moyennes en ETM mesurées dans le sol exposé aux déversements d'eau de production et les valeurs références pour les végétaux terrestres adoptées par le Gouvernement du Québec (CEAEQ, 2012).	143
Tableau 19	effets des facteurs zone et organe sur les concentrations en ETM dans la végétation	145
Tableau 20	Comparaison entre les concentrations moyennes en ETM mesurées dans le sol exposé aux déversements d'eau de production et les valeurs références pour les Micro-organismes adoptées par le Gouvernement du Québec (CEAEQ, 2012).	154
Tableau 21	Comparaison entre les concentrations moyennes en ETM mesurées dans le sol exposé aux déversements d'eau de production et les valeurs références pour les invertébrés du sol adoptés par l'USEPA	156
Tableau 22	Comparaison entre les concentrations moyennes en ETM mesurées dans le sol exposé aux déversements d'eau de production et les valeurs références pour les invertébrés du sol adoptés par le gouvernement du Québec (CEAEQ, 2012).	157
Tableau 23	Comparaison entre les concentrations moyennes en ETM mesurées dans le sol exposé aux déversements d'eau de production et les valeurs références pour le peuplement avien adoptés par l'USEPA	158
Tableau 24	Comparaison entre les concentrations moyennes en ETM mesurées dans le sol exposé aux déversements d'eau de production et les valeurs références pour les mammifères adoptés par l'USEPA	160

Liste des annexes

Annexe 01 :

Droites d'étalonnage établis à partir des solutions étalons

Annexe 02 :

Matrice Qualitative du risque de SONAHCESS

Annexe 03 :

Application SSPS du Test T pour échantillon unique relatif aux concentrations en ETM de l'eau de production d'El-Gassi et d'El-Agreb (comparaison aux valeurs seuils du décret exécutif 06-141)

Annexe 04 :

Application SSPS du Test T pour échantillon unique relatif aux concentrations en ETM des sédiments contenus dans les bassins d'évaporation d'El-Gassi et le puisard d'eau de production d'El-Gassi (comparaison aux valeurs seuils de l'arrêté français du 02 02 1998)

Annexe 05 :

Application SSPS du Test T pour échantillon unique relatif aux concentrations en ETM du sol exposé aux déversements d'eau de production (comparaison aux concentrations du sol témoin, aux valeurs références pour les récepteurs biologique définies par l'USEPA, et aux valeurs références recommandé par le gouvernement du Québec pour les récepteurs biologiques)

Annexe 06 :

Application SSPS de l'ANOVA à deux facteurs (zone et organe) pour la végétation située en zone exposée et non exposée aux déversements d'eau de production

Table des matières

Introduction à la problématique	1
1. Notion d'établissements classés et réglementation applicable	1
2. Présentation du complexe GEA	4
3. Classification du complexe GEA	4
4. Objectif de l'étude	5
5. Choix des aspects environnementaux	6
6. Approche globale et organisation du document	8
Chapitre 01 : Synthèse bibliographique	9
1. Eau de production	9
1.1 Origine	9
1.2 Principaux constituants	10
1.3 Gestion de l'eau de production	10
1.3.1 Options de minimisation du volume d'eau généré	12
1.3.1.1 Options prévenant l'arrivée d'eau dans le forage	12
1.3.1.2 Options prévenant l'arrivée de l'eau en surface	13
1.3.1.2.1 Puits à double complétion	13
1.3.1.2.2 Séparateurs de fond « huiles / eau »	14
1.3.2 Options de recyclage et de réutilisation de l'eau	15
1.3.2.1 Injection souterraine pour augmenter la récupération d'huile	15
1.3.2.2 Injection pour utilisation future	16
1.3.2.3 Usage par la faune et flore	16
1.3.2.4 Usage industriel	16
1.3.3 Options d'élimination	17
1.3.3.1 Injection souterraine pour élimination	17
1.3.3.2 L'évaporation	17
1.3.3.3 Rejet dans l'environnement	18
1.3.3.4 Traitement ex-situ par une tierce partie	18
1.4 Exigences réglementaires régissant la gestion de l'eau de production	18
1.4.1 Exigences réglementaires aux Etats-Unis	19
1.4.1.1 Introduction	19
1.4.1.1.1 Le code des règlements fédéraux	19
1.4.1.1.2 Le Resource <i>Conservation and Recovery Act</i> (RCRA).....	19
1.4.1.1.3 Le Clean Water Act (CWA)	20
1.4.1.1.4 Le Safe Drinking Water Act (SDWA)	21
1.4.1.2 Réglementation pertinente eau de production	24
1.4.1.2.1 Exemption de l'eau de production de la liste des déchets dangereux	24
1.4.1.2.2 Exigences relatives aux rejets d'eau de production	24
1.4.1.2.3 Exigences relatives à l'injection souterraine d'eau de production	25
1.4.2 Exigences réglementaires en Algérie	31
1.4.2.1 Exemption de l'eau de production de la législation relative aux déchets dangereux.....	31
1.4.2.2 Exigences relatives au rejet et/réutilisation d'eau de production	33
1.4.2.3 Exigence relatives à l'injection souterraine d'eau de production	35
2. Eléments traces métalliques	39
2.1 Définition	39
2.2 Sources dans l'environnement	40
2.2.1 Fond géochimique	40
2.2.2 Origine de la pollution	40
2.2.3 Processus de transfert dans les sols et eaux souterraines	41
2.2.3.1 le relargage	41
2.2.3.2 La sorption (ou adsorption)	42

2.2.3.3 Précipitation / Dissolution et Co- précipitation	44
2.2.3.4 La complexation aqueuse	45
2.2.3.5 la complexation à des colloïdes	45
2.2.3.6 Activité bactérienne	46
2.3 Eléments traces métalliques étudiés	46
2.3.1 Informations générales	46
2.3.1.1 Le cadmium	46
2.3.1.2 Le plomb	47
2.3.1.3 Le cuivre	47
2.3.1.4 Le zinc	48
2.3.2 Devenir dans l'environnement et comportement dans le sol	49
2.3.2.1 Le cadmium	49
2.3.2.2 Le plomb	50
2.3.2.3 Le cuivre	51
2.3.2.4 Le zinc	53
2.3.3 Devenir et effet chez le biote	54
2.3.3.1 Processus microbiens du sol	54
2.3.3.1.1 Le cadmium	54
2.3.3.1.2 Le plomb	54
2.3.3.1.3 Le cuivre	55
2.3.3.1.4 Le zinc	55
2.3.3.2 Invertébrés du sol	55
2.3.3.2.1 Le cadmium	55
2.3.3.2.2 Le plomb	56
2.3.3.2.3 Le cuivre	56
2.3.3.2.4 Le zinc	57
2.3.3.3 Plantes terrestres	57
2.3.3.3.1 Le cadmium	57
2.3.3.3.2 Le plomb	58
2.3.3.3.3 Le cuivre	59
2.3.3.3.4 Le zinc	60
2.3.3.3.5 Effets de l'interaction Cd, Pb, Cu et Zn sur les végétaux	60

Chapitre 02 : Présentation de la zone d'étude

1. Présentation de l'environnement physique	62
1.1. Implantation générale	62
1.2. Géomorphologie et géologie superficielle	62
1.2.1 Recouvrement sableux	63
1.2.2 Morphologie du complexe GEA	63
1.2.3 Lithologie sous-jacente	65
1.3 Hydrologie et hydrogéologie	65
1.3.1 Précipitation et eaux superficielles	65
1.3.1.1 Précipitations	65
1.3.1.2 Eaux superficielles	66
1.3.2 Eaux souterraines	67
1.3.2.1 Système aquifère peu profond du tertiaire (Complexe Terminal).....	67
1.3.2.2 Système aquifère profond du Continental Intercalaire	69
1.3.2.3 Aquifère du Jurassique	71
1.4. Climat et météorologie	71
1.4.1. Climat.....	71

1.4.2. Météorologie	72
2. Présentation de l'environnement biologique	73
2.1. Flore	73
2.1.1. Flore saharienne	73
2.1.2. Flore sur la zone du complexe GEA	73
2.2. Faune	76
2.2.1. Mammifères	76
2.2.1.1. Généralités	76
2.2.1.2. Zone du complexe GEA	77
2.2.2. Avifaune	78
2.2.2.1. Généralités	78
2.2.2.2. Zone du complexe GEA	79
2.2.3. Reptiles.....	81
2.2.3.1. Généralités	81
2.2.3.2. Zone du complexe GEA	81
2.2.4. Invertébrés	81
2.2.4.1. Généralités	81
2.2.4.2. Zone du complexe GEA	84
2.3. Aires protégées	84
3. Présentation de l'environnement social et culturel	85
3.1. Démographie, urbanisation et infrastructures	85
3.2. Patrimoine culturel, historique et religieux	87
4. Présentation des installations et des procédés industriels appliqués	88
4.1. Présentation simplifiée du procédé de production	88
4.2. Description générale des procédés industriels appliqués	88
4.2.1. Procédé « huile »	91
4.2.2. Procédé « Gaz »	91
4.2.3. Procédé « Condensat »	92
4.2.4. Procédé « eau ».....	92
4.2.4.1. Eau du jurassique et eau douce	92
4.2.2.2. Eau de production	93
4.2.2.2.1. Description du procédé	93
4.2.2.2.2. Description de l'installation de traitement et réinjection	93
Chapitre 03 : Matériel et méthodes	101
1. Stratégie de réalisation et approche de travail	101
2. Présentation de la méthode d'analyse choisie	101
2.1. Objectif de la méthode « Nœud Papillon »	101
2.2. Démarche de la méthode « Nœud Papillon »	101
2.2.1. Identification du danger	105
2.2.2. Identification de l'évènement redouté	105
2.2.3. Identification des menaces	105
2.2.4. Identification des conséquences	105
2.2.5. Identification des barrières de contrôle	105
2.2.6. Identification des facteurs aggravant	106
2.2.7. Identification des barrières de contrôle du facteur aggravant	106
2.2.8. Cotation du risque	106
3. Application de la méthode d'analyse dans le présent travail	106
3.1. Identification du danger	107
3.1.1. Seuils définis pour l'eau de production	107

3.1.2. Seuils définis pour les sédiments	108
3.2. Cotation du risque	108
3.2.1. Matrice qualitative du risque	108
3.2.2. Approche adoptée pour l'analyse des descripteurs de probabilité et gravité ...	110
4. Plan d'assurance et de contrôle qualité	111
4.1. Procédure d'échantillonnage	111
4.1.1. Stratégie et collecte d'information	111
4.1.1.1. Echantillonnage de l'eau de production	111
4.1.1.2. Echantillonnage des sédiments associés à l'eau de production	112
4.1.1.3. Echantillonnage du sol	114
4.1.1.4. Echantillonnage de la végétation	115
4.2. Travail au laboratoire	116
4.2.1. Eléments traces métalliques	116
4.2.1.1. Echantillons de végétation	116
4.2.1.2. Echantillons d'eau de production	117
4.2.1.3. Echantillons de sol et de sédiments	117
4.2.2. pH du sol	118
4.2.3. Calcaire dans le sol	118
4.2.4. Conductivité du sol	118
4.2.5. Matière organique dans le sol	119
4.3.2. ANOVA à 2 facteurs	119
Chapitre 04 : Résultats & discussion	
1. Identification du danger «Teneurs en ETM dans l'effluent –Eau de production-».	120
1.1. Caractérisation du danger	120
1.1.1. Concentrations des ETM dans l'eau de production	120
1.1.1.1. Installation de traitement et réinjection d'El-Gassi	120
1.1.1.2. Installation de traitement et de réinjection d'El Agreb	121
1.1.2. Concentrations des ETMS dans les sédiments	122
1.2. Identification des sources du danger	124
1.2.1. Hypothèse « tubes de conduites comme source des ETM »	124
1.2.2. Hypothèse « additifs chimiques comme source des ETM »	125
1.2.3. Hypothèse « gisement » comme source des ETM »	126
2. Définition de l'évènement redouté	128
2.1. Identification des menaces	129
2.2. Identification des conséquences	129
2.3. Identification des barrières existantes	130
2.3.1. Barrières proactives et facteurs aggravants	130
2.3.1.1. Menace 01	130
2.3.1.2. Menace 02	131
2.3.2. Barrières réactives et facteurs aggravants	131
2.4. cotation du risque	132
2.4.1. Risque associé à l'évènement redouté	132
2.4.1.2. Gravité	132
2.4.2. Risques associés aux conséquences	134
2.4.2.1. Conséquence 01 « contamination du sol & sous-sol»	134
2.4.2.1.1. Probabilité d'occurrence	134
2.4.2.1.2. Gravité	139
2.4.2.2. Conséquence 02 « impact sur la flore »	141
2.4.2.2.1. Probabilité d'occurrence	141

2.4.2.2.2. Gravité	141
2.4.2.3. Conséquence 03 « impact sur les micro-organismes du sol »	154
2.4.2.3.1. Probabilité d'occurrence	154
2.4.2.3.2. Gravité	154
2.4.2.4. Conséquence 04 « impact sur les invertébrés du sol »	156
2.4.2.4.1. Probabilité d'occurrence	156
2.4.2.4.2. Gravité	156
2.4.2.5. Conséquence 05 « impact sur le peuplement avien »	158
2.4.2.5.1. Probabilité d'occurrence	158
2.4.2.5.2. Gravité	158
2.4.2.6. Conséquence 06 « impact sur les mammifères »	160
2.4.2.6.1. Probabilité d'occurrence	160
2.4.2.6.2. Gravité	160
2.4.2.7. Conséquence 07 « contamination des eaux souterraines »	161
2.4.2.7.1. Probabilité d'occurrence	161
2.4.2.7.2. Gravité	161
Synthèse des résultats, Recommandations et conclusion	162
Références bibliographiques	168

Introduction à la problématique

Introduction à la problématique :

1. Notion d'établissements classés et réglementation applicable :

Conformément à l'article 02 du décret exécutif 06-198 (JORADP N°37, 2006), un établissement est dit classé pour la protection de l'environnement lorsque l'ensemble de la zone d'implantation comporte une ou plusieurs installations classées et qui relève de la responsabilité d'une personne physique ou morale, publique ou privée qui détient, exploite ou fait exploiter l'établissement et les installations classées qui en relèvent.

Conformément au même article, une installation classée est définie comme toute unité technique fixe dans laquelle interviennent une ou plusieurs activités figurant dans la nomenclature des installations classées telle que fixée par la réglementation en vigueur, notamment le décret exécutif 07-144 fixant la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement (JORADP N° 34, 2007)

Conformément à l'article 03 du décret exécutif 06-198 (JORADP N° 37, 2006), les établissements classés sont subdivisés en quatre catégories : nous avons d'abord les établissements classés de première catégorie comportant au moins une installation soumise à autorisation ministérielle. Ensuite, nous avons les établissements classés de deuxième catégorie comportant au moins une installation soumise à autorisation du wali territorialement compétent. Aussi, nous avons les établissements classés de troisième catégorie, comportant au moins une installation soumise à autorisation du Président de l'Assemblée Populaire Communale territorialement compétent. Enfin, nous avons les établissements classés de quatrième catégorie comportant au moins une installation soumise au régime de la déclaration auprès du Président de l'Assemblée Populaire Communale territorialement compétent.

Conformément à l'article 04 du décret exécutif 06-198 (JORADP N° 37, 2006), l'autorisation d'exploitation d'un établissement classé est définie comme étant l'acte administratif attestant que l'établissement classé concerné est conforme aux prescriptions et conditions relatives à la protection, la salubrité et la sécurité de l'environnement prévues par la législation et la réglementation en vigueur.

Conformément à l'article 05 du décret exécutif 06-198 (JORADP N° 37, 2006), toute demande d'autorisation d'exploitation est précédée selon le cas :

- D'une étude ou d'une notice d'impact sur l'environnement établie et approuvée selon les conditions fixées par la réglementation en vigueur ;
- D'une étude de danger établie et approuvée selon les conditions fixées par la réglementation en vigueur ;
- D'une enquête publique effectuée conformément aux modalités fixées par la réglementation en vigueur.

Conformément à l'article 23 du décret exécutif 06-198 (JORADP N° 37, 2006), l'autorisation d'exploitation est passible de suspension ou de retrait. En effet, à l'occasion de tout contrôle, en cas de constat de situation non-conforme à la réglementation applicable aux établissements classés en matière de protection de l'environnement ou aux prescriptions techniques spécifiques prévues dans l'autorisation d'exploitation accordée, un procès-verbal faisant ressortir les faits incriminés sera établi. Selon la nature et l'importance des faits incriminés, un délai sera déterminé pour la régularisation de la situation de l'établissement concerné. A l'issue de ce délai, si la situation de non-conformité n'est pas prise en charge, l'autorisation d'exploitation de l'établissement classé est suspendue. Si dans un délai de six mois, après notification de la suspension, l'exploitant n'a pas mis son établissement en conformité, l'autorisation d'exploitation de l'établissement classé est retirée et la remise en exploitation ne pourra se faire qu'après la réintroduction d'une nouvelle demande d'autorisation d'exploitation.

L'étude d'impact sur l'environnement prend en charge les aspects environnementaux à travers la mise en œuvre du plan de gestion environnementale. Généralement, les études d'impact sont régies par le décret exécutif 07-145 (JORADP N° 34, 2007). Depuis octobre 2008, l'approbation des études d'impact relevant du secteur hydrocarbures est régie par le décret exécutif 08-312 (JORADP N° 58, 2008). Ce texte précise entre autre le contenu du plan de gestion environnementale qui doit obligatoirement couvrir les éléments suivants :

- Un plan de prévention et de maîtrise des pollutions (fuites, déversements, décharges à l'atmosphère, etc...) durant la phase de construction, la phase d'exploitation et la phase d'abandon ;
- Un plan d'intervention en cas de pollution ;
- Un plan de gestion des déchets ;
- Un plan de gestion des sites et sols contaminés ;
- Un plan de gestion des rejets liquides et gazeux ;
- Un programme de surveillance et de suivi des impacts environnementaux ;
- Un plan d'utilisation optimale des ressources naturelles ;
- Un plan de gestion des produits chimique ;
- Un plan d'information et sensibilisation environnementale ;
- Un programme d'audit environnemental ;
- Un programme d'abandon et de remise en état des lieux

Il va sans dire que l'autorisation d'exploitation d'un établissement classé reste tributaire d'une bonne mise en œuvre et du stricte respect du contenu du plan de gestion environnementale, faute de quoi celle-ci risque d'être suspendue ou retirée comme nous l'avons expliqué plus haut.

La conformité environnementale de l'établissement classé est mesurable par audit du plan de gestion environnementale décrit ci-dessus. Dans le cas général, l'audit est assuré par la commission de wilaya pour le contrôle des établissements classés. Pour le secteur hydrocarbures, c'est l'Autorité de Régulation des Hydrocarbures (A.R.H) qui est chargée du suivi de l'application du plan de gestion environnementale tel que stipulé dans l'article 20 du décret exécutif 08-312.

2. Présentation du complexe GEA :

Les gisements d'hydrocarbures des champs d'El Agreb, de Zotti et d'El Gassi (désignés « complexe GEA »), situés à une centaine de kilomètres au sud de Hassi Messaoud dans la wilaya de Ouargla dans le sud de l'Algérie, ont été découverts et mis en exploitation à la fin des années cinquante. En 2000, la société nationale algérienne en charge de la gestion de la filière des hydrocarbures SONATRACH a signé avec la société Hess un contrat d'association (production sharing agreement, ou PSA), constituant la société SONAHCESS, en charge de poursuivre et étendre l'exploitation des champs dans des conditions de rentabilité, de sécurité et de préservation de l'environnement satisfaisantes.

Depuis sa création, SONAHCESS a entrepris diverses opérations de mise à niveau sur le complexe GEA, selon un programme prévu en plusieurs phases. La phase 1 (toujours en cours) comprenait diverses mises à niveau des installations existantes. La phase 2 (récemment initiée) comprenait plusieurs modules, dont, en particulier, la mise en place d'un système de compression et de réinjection des gaz associés (projet GCR). Ce projet vise à la récupération des gaz associés qui étaient torchés sur le complexe GEA, en vue de leur réinjection dans les gisements, permettant ainsi d'améliorer l'efficacité de la production d'hydrocarbures, et d'éviter de torcher des gaz qui constituent à terme une ressource commerciale exploitable – éliminant dans le même temps le torchage continu, qui est prohibé depuis 2005 conformément à l'article 52 de la loi 05-07 modifiée et complétée, relativeaux hydrocarbures (JORADP N° 50, 2005).

3. Classification du complexe GEA :

Parmi les activités et substances recensées dans le complexe GEA et figurant dans la nomenclature des installations classées (Décret exécutif 07-144), il y en a une qui requiert une autorisation ministérielle, il s'agit de la rubrique N° 1531 correspondant aux « *liquides inflammables (fabrication industrielle de, dont le traitement de pétrole et de ses dérivés, désulfuration* ». Donc, conformément à l'article 03 du décret exécutif 06-198 (JORADP N° 37, 2006), le complexe GEA exploité par le Groupement SONAHCESS est un établissement classé

de première catégorie. Il est par conséquent soumis à la réglementation en vigueur applicable aux établissements classés, et requiert une étude d'impact et une étude de danger avant obtention de l'autorisation d'exploitation.

4. Objectif de l'étude :

A l'issue de ce qui a été exposé ci-dessus, il apparaît clair que vu le statut d'établissement classé attribuable au complexe GEA, l'exploitant est dans l'obligation de s'assurer de l'adéquation du plan de gestion environnementale et de sa mise en application, afin de prévenir une éventuelle suspension ou un éventuel retrait de l'autorisation d'exploitation et garantir ainsi la continuité des opérations dans le cadre de la conformité environnementale.

Le présent travail intitulé « niveaux de contamination par les Eléments Traces Métalliques (Cd, Pb, Cu et Zn) de l'eau de production et des sédiments des champs pétroliers du complexe G.E.A –Hassi Messaoud », s'inscrit dans la perspective d'audit interne du plan de gestion environnementale visant à mesurer la conformité environnementale de l'exploitation, par l'analyse des risques environnementaux associés aux éléments traces métalliques étudiés dans le contexte actuel de gestion de l'eau de production au niveau du complexe GEA.

A l'issue de ce travail, nous espérons fournir à l'équipe de gestion, des outils d'aide à la décision qui leur permettraient de mieux apprécier les risques associés à l'eau de production et asseoir une assise solide pour développer, mettre en œuvre et améliorer de manière adéquate certains éléments constitutifs du plan de gestion environnementale décrit plus haut. Ces éléments sont :

- Le plan de prévention et de maîtrise des pollutions ;
- Le plan de gestion des déchets ;
- Le plan de gestion des sites et sols contaminés ;
- Le plan de gestion des rejets liquides et gazeux ;

- Le programme de surveillance et de suivi des impacts environnementaux ;
- Le plan d'utilisation optimale des ressources naturelles

Donc, ce travail ne se prétend pas exhaustif, tant sur le choix des éléments du plan de gestion environnementale à améliorer, que sur le choix des aspects environnementaux, ou encore celui des contaminants. C'est plutôt une contribution au développement, à la mise en œuvre et à l'amélioration des 04 éléments constitutifs du plan de gestion environnementale cités ci-dessus, par l'évaluation des impacts associés à certains composants de l'aspect environnemental choisi pour cette étude.

5. Choix des aspects environnementaux :

Un « *aspect environnemental* » est défini comme tout élément des activités, produits, ou services d'un organisme, susceptible d'interaction avec l'environnement (ISO, 2004). Parmi les nombreux aspects environnementaux recensés pour le complexe GEA (pétrole, gaz, déchets solides, additifs chimiques, etc...) notre choix s'est porté sur l'aspect « eau de production ».

La composition spécifique en contaminants de l'eau de production varie selon la géologie des gisements dont elle provient. Cependant, il est généralement admis que l'eau de production contienne les groupes de contaminants suivants : les hydrocarbures, les sels, les métaux (majeurs et en traces) ainsi que les radionucléides. Dans le présent travail, le choix des contaminants s'est porté sur le groupe de contaminants : « Métaux en traces » ou « élément traces métalliques » et plus précisément, sur les éléments suivants: Cadmium, Plomb, Zinc et Cuivre.

Notre choix de cet aspect environnemental ainsi que de ces contaminants est motivé par les raisons suivantes :

- L'eau de production est de loin, le déchet le plus volumineux de l'industrie pétrolière et le cas du complexe GEA n'échappe pas à la règle avec un volume annuel moyen de plus de 07 millions de barils ;
- Toute amélioration dans la gestion de cette eau pourrait avoir une influence directe sur six plans constitutifs du plan de gestions environnementale;
- Le gisement est riche en Pyrite, donc les minerais de Zinc (sphalérite) et de Pb (Galène) qui sont généralement associés à la Pyrite, sont susceptibles d'être présents et par conséquent ceux du Cd ou de Cu le sont aussi. Donc, leur présence dans l'eau de production est probable ;
- Les quatre éléments traces métalliques sont réglementés dans le décret exécutif 06-141 définissant les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels (JORADP N° 26, 2006).
- Le danger inhérent aux quatre éléments traces métalliques. En effet, ces éléments font partie des 09 éléments traces désignés comme présentant un risque pour la santé humaine (selon le rapport 42 de l'académie des sciences, 1998), dont deux (Pb et Cd) sont classés comme « Substances dangereuses prioritaires » par la communauté européenne (Décision 2455/2001/CE). Ces éléments font également partie de la liste des 126 polluants prioritaires répertoriés dans l'Annexe A de la section 423 du titre 40 (Protection de l'environnement) relatif au Code du Registre fédéral des Etats Unis d'Amérique ;
- L'actuelle étude d'impact a préconisé le « traitement » puis la réinjection de l'eau de production. Nous nous demandons si ce « traitement » prend en charge les éléments traces métalliques ;

- La matrice actuelle de sévérité utilisé à GEA lors des déversements ne tient compte que du taux d'hydrocarbures, ce qui pourrait conduire à notre sens à une sous-estimation de l'impact liés à un déversement de l'eau de production ;
- la disponibilité de la logistique et de l'expertise technique nécessaires pour l'analyse et l'interprétation des résultats relatifs à ce groupe au niveau du laboratoire de recherche « Ecologie & Environnement » de l'Université *Mentouri* de Constantine ;

6. Approche globale et organisation du document :

Rappelons que l'objectif global de notre travail est l'analyse des risques environnementaux associés aux éléments traces métalliques étudiés dans le contexte actuel de gestion de l'eau de production au niveau du complexe GEA.

Pour ce faire, il nous faut d'une part, passer revue les informations relatives à l'aspect environnemental choisi ainsi qu'aux contaminants. Ceci fera l'objet du premier chapitre de ce travail intitulé « *Synthèse bibliographique* ».

Il nous faut ensuite consolider toutes les informations relatives au complexe GEA et pertinente pour l'analyse des risques. Ceci fera l'objet du deuxième chapitre intitulé « *Présentation de la zone d'étude* ».

Le troisième chapitre, intitulé « *Matériels et méthodes* », décrira la stratégie de réalisation de l'étude ainsi que les outils d'assurance qualité adoptés.

Le quatrième chapitre, intitulé « *Résultats et discussion* », est une application de l'analyse des risques tel que décrits dans le troisième chapitre qui permettra la synthèse des résultats obtenu et la conclusion.

Chapitre 01

Synthèse bibliographique

Synthèse bibliographique :

1. Eau de production :

1.1 Origine :

Dans les formations souterraines, les roches contiennent généralement des fluides comme l'eau, l'huile ou le gaz. Ces fluides peuvent se trouver seuls ou associés. Il est généralement admis que la roche dans les formations pétrolifères ait été d'abord saturée avec l'eau avant l'invasion et la prise au piège de l'huile. Ainsi, les hydrocarbures moins denses migrent vers les positions d'équilibre hydrostatique et dynamique, déplaçant ainsi l'eau des interstices de la partie supérieure de la structure rocheuse. Cependant, l'huile ne déplacera pas toute l'eau. Donc, les formations rocheuses des réservoirs contiennent à la fois des hydrocarbures et de l'eau. Cette dernière est dite « eau de formation ».

L'exploitation d'un gisement pétrolier nécessite le forage de puits dits « producteurs » et l'implantation d'installations de surface pour le traitement de l'huile. Les puits producteurs et les installations de surface sont reliés par des lignes de production appelées « réseau de collecte ». Sous l'effet de la pression du gisement, le mélange huile-gaz-eau est chassé vers la surface puis vers les installations de surface où il subira une séparation triphasique (figure 01). L'eau issue de cette séparation est dite « eau de production ».

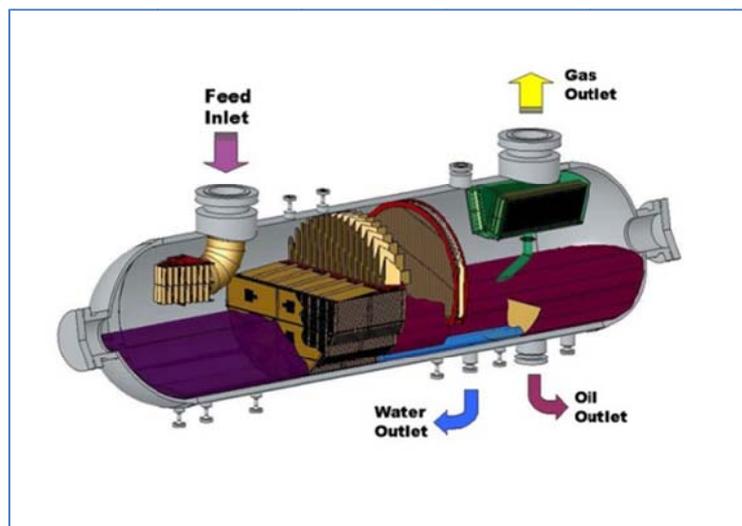


Figure 01 : schéma d'un séparateur tri-phasique

Le volume de l'eau de production croit avec l'âge d'exploitation du gisement. En effet, au début de l'exploitation la production de pétrole est haute et celle de l'eau est basse. Cette tendance s'inverse progressivement avec le temps jusqu'à ce que le coût de gestion de l'eau de production excède les bénéfices de vente du pétrole. A ce moment, la production sera arrêtée et le puits abandonné. Khateeb et Verbeek (2003) cité par Veil et al (2004) ont estimé qu'en 1999, 210 millions de barils d'eau de production étaient générés quotidiennement, ce qui donne un volume total de 77 milliards de barils générés dans le monde en 1999.

1.2 Principaux constituants :

Beaucoup d'auteurs s'accordent que les propriétés physiques et chimiques de l'eau de production varient considérablement en fonction de la situation géographique du champ, de la nature géologique de la formation et du type d'hydrocarbures produit ainsi que des procédés de production utilisés (Clarck & Veil, 2009). Les principaux composés jugés problématiques sont les sels, les huiles et graisses, les composés organiques dissous (originellement présents dans la formation ou issus des additifs chimiques), les éléments métalliques (originellement présents dans la formation ou issus des additifs chimiques), les particules solides ainsi que les radionucléides. Clarck & Veil (2009) rappellent qu'une bonne caractérisation des constituants d'une eau de production est un élément clé pour la mise en conformité réglementaire et un outil précieux d'aide à la décision pour définir la stratégie de gestion appropriée.

1.3 Gestion de l'eau de production :

Il existe plusieurs approches de gestion de l'eau de production. L'option la plus appropriée pour un établissement donné est fonction de plusieurs facteurs incluant la localisation géographique du site, la réglementation en vigueur, la faisabilité technique, le coût engagé et la disponibilité des infrastructures et équipements. Les principales alternatives utilisées de nos jours sont l'injection sous-terrain, le rejet et la réutilisation bénéfique.

La figure 02 illustre les stratégies et technologies de gestion de l'eau dans le cadre de trois niveaux hiérarchiques relatifs à la philosophie de gestion des déchets et prévention de la pollution Veil (2002a) cité par Veil et al (2004).

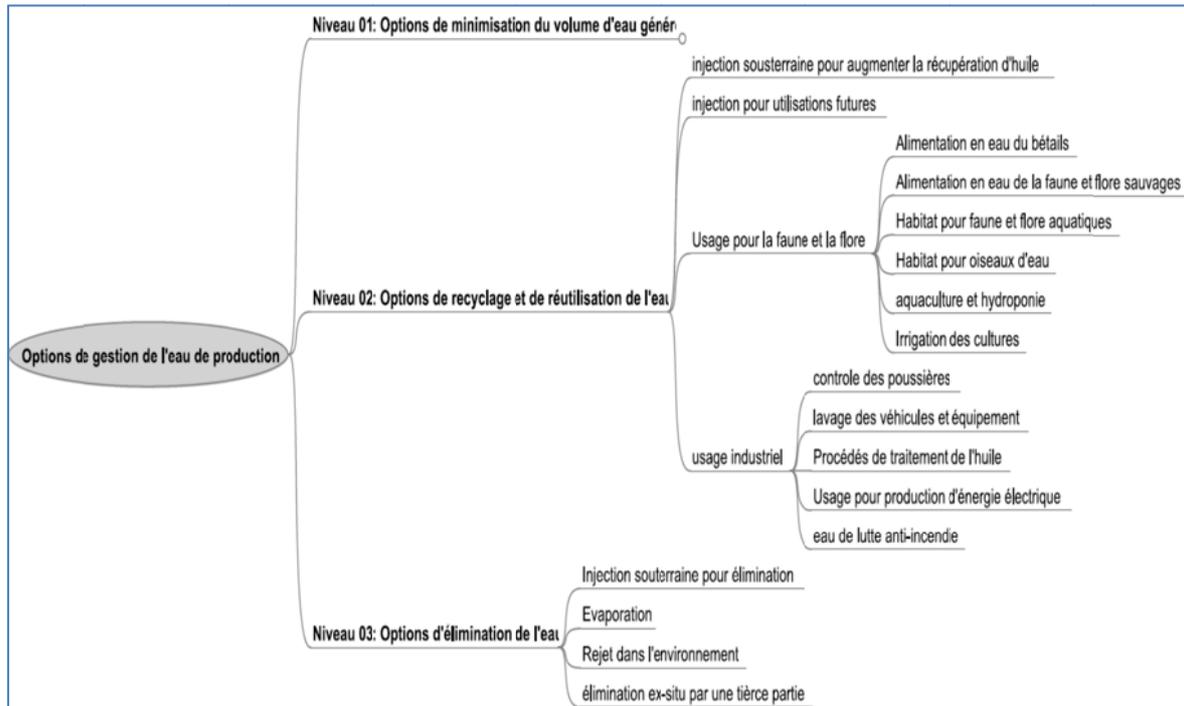


Figure 02 : Options de gestion de l'eau de production

Dans le premier niveau, les procédés sont modifiés, les technologies adaptées et les additifs substitués afin de diminuer la quantité d'eau générée. Lorsque sa faisabilité est avérée, la minimisation de la quantité d'eau générée peut constituer une double opportunité de réduction des coûts et de protection de l'environnement. Pour l'eau qui serait toujours produite malgré la minimisation de la quantité générée, les opérateurs passent au deuxième niveau de gestion, à savoir le recyclage et la réutilisation de l'eau. Il arrive sous certaines conditions ou contraintes que l'eau ne puisse être réutilisée ou recyclée. Dans ce cas, la gestion se fait dans le cadre du troisième niveau, à savoir l'élimination ou le rejet.

1.3.1 Options de minimisation du volume d'eau généré :

1.3.1.1 Options prévenant l'arrivée d'eau dans le forage :

Dans le gisement, l'eau et les hydrocarbures pétroliers ne constituent pas un mélange homogène. En effet, du fait de la différence de densités, les deux fluides apparaissent sous forme de deux couches adjacentes mais séparées avec les hydrocarbures en haut et l'eau en bas. Les opérateurs essaient au maximum de concevoir les puits afin de produire à partir de la couche « hydrocarbure ». Au fur et à mesure que les hydrocarbures sont produits et retirés de la formation, le gradient de pression change au point que la couche d'eau pousse vers le haut jusqu'à atteindre la zone de forage. Ce phénomène est appelé « Cône d'eau » (figure 03), il a pour conséquence d'augmenter le volume d'eau produits en surface avec l'huile.

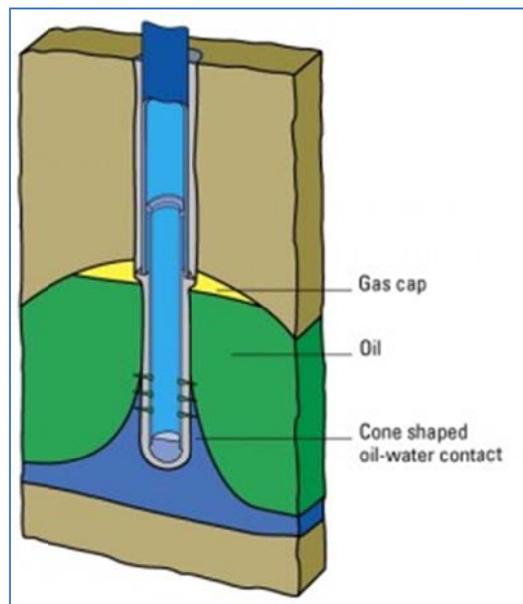


Figure 03: coupe d'un forage illustrant un « cône d'eau »

La réduction du volume d'eau produit dans le puits est un défi opérationnel. Néanmoins, il existe quelques options qui peuvent être utilisées pour restreindre l'entrée d'eau dans le forage tel que les dispositifs de blocage mécanique ou encore des additifs chimiques qui formeront des « barrages » dans les chenaux d'écoulement préférentiel de l'eau et l'empêcher ainsi d'arriver jusqu'au forage. Bien qu'ils préviennent la production en surface de cette eau et l'occurrence des impacts environnementaux qui lui sont associés. Le recours à ces options reste exclusivement conditionné par l'ingénierie « production &

Réservoir » alors qu'elles devraient également être considérées comme outils de gestion environnementale. Il est important de souligner que le succès de ces options est tributaire de la rigueur du diagnostic des conditions du gisement et des raisons d'excès d'eau.

1.3.1.2 Options prévenant l'arrivée de l'eau en surface :

La gestion de l'eau de formation en surface peut présenter deux contraintes. En plus de générer des coûts opérationnels importants pour les opérateurs, elle augmente le risque d'atteinte à la qualité du sol, des eaux superficielles et des eaux souterraines. Dans ce sens, une panoplie de technologies ont été développées afin de permettre la gestion de l'eau soit à l'intérieur du forage, soit le plus loin possible de la surface tel que les fonds marins. Bien que ces technologies ne réduisent pas le volume d'eau entrant dans le puits, elles minimisent néanmoins la quantité arrivant à la surface. Par conséquent, ces technologies sont incluses dans les options de minimisation du volume d'eau généré.

1.3.1.2.1 Puits à double complétion :

La production d'huile peut diminuer à cause de la formation de « cône » d'eau au niveau de la zone de perforation du forage (figure 03). Cette situation peut être inversée et contrôlée en complétant le puits par deux colonnes séparées (figure 04.).

La première complétion est faite à une profondeur correspondant à la couche à forte production d'huile. La seconde est faite plus bas dans l'intervalle à une profondeur correspondant à une couche à forte production d'eau.

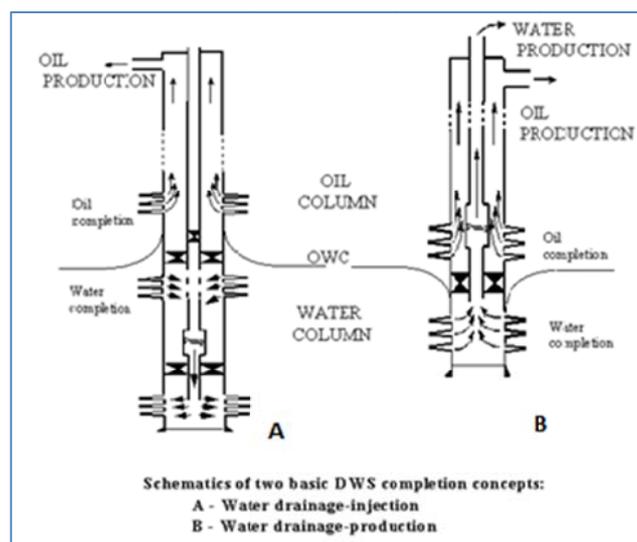


Figure 04 : coupe illustrant une double complétion

Les deux complétions sont séparées par un « Packer ». Ainsi, l'huile est collectée au-dessus du Packer et est produite en surface. L'eau quant à elle est collectée sous le Packer puis drainée in situ (Figure 04. A). La double complétion pourrait également permettre de produire séparément l'eau en surface (Figure 04.B)

1.3.1.2.2 Séparateurs de fond « huiles / eau » :

La séparation de fond « huile / eau » sépare l'huile de l'eau à l'intérieur du forage. Cette technologie réduit la quantité d'eau de production arrivant en surface en la séparant au fond et en la réinjectant dans les formations sous-jacentes. Un système de séparation de fond comporte plusieurs composantes mais deux constituent une exigence minimale, à savoir un système de séparation « huile / eau » et au moins une pompe pour pomper l'huile vers la surface et injecter l'eau. Deux types de systèmes de séparation ont été développés, l'un utilise les hydro-cyclones (Figure 05) pour séparer mécaniquement l'eau et l'huile, l'autre est basé sur le principe de séparation par gravité dans le forage lui-même (Figure 06).

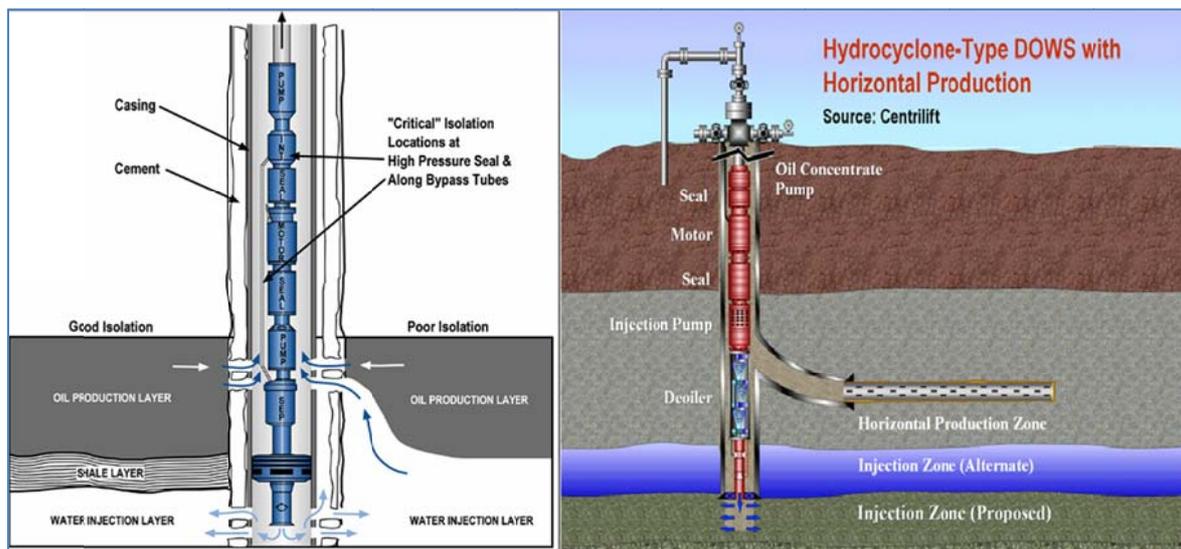


Figure 05 : coupe illustrant une séparation de fond par hydro-cyclone

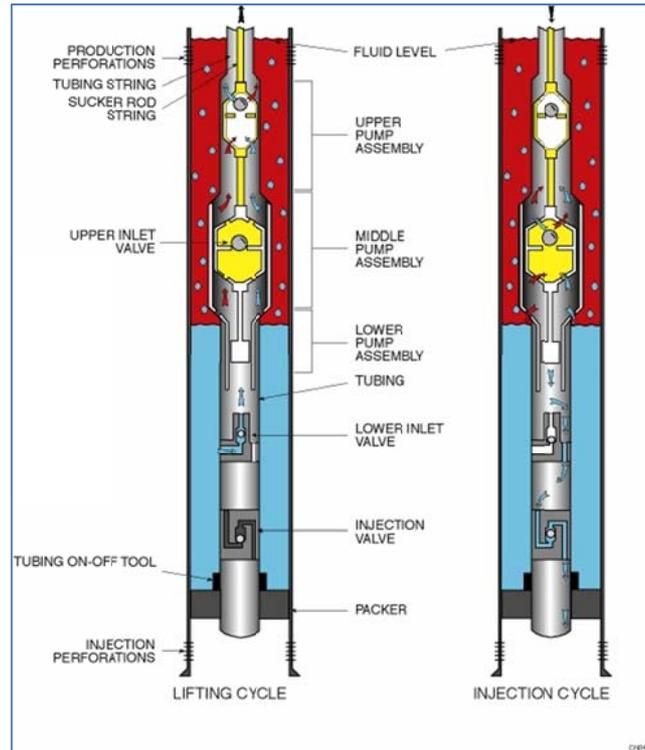


Figure 06 : Coupe illustrant une séparation de fond par gravité

1.3.2 Options de recyclage et de réutilisation de l'eau :

Dans plusieurs cas, l'eau de production peut se révéler utile pour d'autres usages. Dans deux cas de figure, cette eau ne requiert pas de traitement. Le premier cas de figure est que la qualité de l'eau soit naturellement bonne (exemple de certains gisement de méthane). Le second cas de figure est l'usage en question ne requiert pas une eau de haute qualité (exemple du « water flooding » ou la réinjection d'eau dans le gisement). Pour d'autres usages, le traitement de cette eau est impératif avant sa réutilisation. Veil et al (2004) soulignent que le cout du traitement est un facteur important pour déterminer l'option de réutilisation qui sera prise en considération. La section qui suit décrit quelques exemples d'options de gestion de l'eau de production basée sur le principe de recyclage et réutilisation.

1.3.2.1 Injection souterraine pour augmenter la récupération d'huile :

L'approche la plus commune utilisée pour la gestion de l'eau de production dans les activités on shoreest la réinjection dans la formation. Pour maintenir la pression du gisement. En effet, 71% du volume d'eau de production est injectée dans la formation pour

maintenir la pression du gisement et augmenter la récupération d'huile qui sera poussé hydrauliquement par l'eau injectée vers le forage où elle (l'huile) sera produite en surface. Généralement, l'eau de production nécessite un traitement avant injection pour garantir la compatibilité avec de cette eau avec la formation souterraine, assurer la continuité d'injection, et protégé les équipements de réinjection. Ce traitement porte généralement sur la correction de la salinité, l'élimination des matières en suspension, la minimisation des huiles et graisse et l'élimination des bactéries et l'inhibition des dépôts. Aux états unis, les puits injecteurs d'eau de production pour récupération de l'huile appartiennent à la classe II-R (*Enhanced Recovery*).

1.3.2.2 Injection pour utilisation future :

Certains type d'eau de production sont relativement propres et peuvent être utilisés sans traitement ou avec un traitement minime. C'est notamment le cas des gisements à méthane de charbon. En effet, cette eau peut être réutilisée immédiatement à des fins bénéfiques telles que l'irrigation ou encore être dans un aquifère où elle sera exploitée ultérieurement. Ce procédé est connu sous l'appellation ASR (Aquifer Storage and Recovery). Aux Etats Unis, l'EPA (Environmental protection Agency) considère les puits ASR comme puits injecteurs de Class V et en a recensé 130 puits en 1999 Veil et al (2004)

1.3.2.3 Usage par la faune et flore :

Comme nous l'avons déjà dit, certains types d'eau de production sont assez propres qu'ils ne nécessitent aucun traitement voire un traitement minime pour servir à des usages bénéfiques à la faune et flore. Veil et al (2004) ont cité quelques exemples appliqués de ces usages tels que : l'alimentation en eau du bétail, alimentation en eau de la faune et flore sauvage, habitats pour la faune et flore aquatique ainsi que pour les oiseaux d'eau, aquaculture et culture hydroponique, ou encore l'irrigation des cultures.

1.3.2.4 Usage industriel :

Dans certaines régions, les eaux superficielles ou souterraines se font rares et pourraient donc être substituées par l'eau de production dans divers pratiques industrielles tant que la qualité de cette eau est conforme avec la pratique en question. Selon Veil et al (2004), l'eau de production est déjà utilisée avec succès dans certaines pratiques industrielles et

fait l'objet d'étude de faisabilité pour d'autres. Parmi ces usages appliqués avec succès nous citons : lavage des équipements et véhicules, utilisation dans les opérations de forage, utilisation dans l'élimination de l'hydrogène sulfuré, utilisation dans le refroidissement, lutte anti-incendie et production d'énergie électrique.

1.3.3 Options d'élimination :

Les approches de gestion de l'eau de production basées sur la minimisation du volume généré, le recyclage ou la réutilisation présentent pour les opérateurs des opportunités de réduction des coûts non négligeables. Malheureusement, une partie assez importante de l'eau de production générée dans le monde est gérée selon le troisième niveau hiérarchique de gestion des déchets, à savoir l'élimination.

1.3.3.1 Injection souterraine pour élimination :

Cette méthode consiste à confiner l'eau de production dans une formation généralement étanche pour stocke définitif. Comme pour l'injection aux fins de maintien de la pression du gisement, l'injection aux fins d'élimination requiert un traitement préalable de l'eau de production pour assurer la compatibilité de l'eau injectée avec la formation souterraine, assurer la continuité de l'injection et protéger les équipements d'injection, pour ce faire, ce traitement peut inclure la gestion des solides en excès, de l'huiles dissoute, de la corrosion, des réactions chimiques et des microorganismes (NETL, 2012). Aux états unis, les puits injecteurs aux fins d'élimination appartiennent à la classe II-D (Disposal) et régie par l'EPA conformément au programme de control de l'injection souterraine (UIC : Underground Injection Control Program).

1.3.3.2 L'évaporation :

L'évaporation est une stratégie simple de gestion de l'eau de production. L'approche consiste à diriger l'eau de production dans des bassins à grande surface et la laisser s'évaporer. Selon Clarck & Veil, 2009, la vitesse d'évaporation est fonction de la taille, profondeur et emplacement du bassin ainsi que la qualité de l'eau de production. Ils soulignent qu'en régions semi arides, les mouvements d'air chaud à la surface du sol augmente la vitesse d'évaporation au niveau des petits bassins, et au fur et à mesure que les teneurs en solides et autres constituants augmentent dans l'eau de production résiduelle, sa vitesse d'évaporation diminue. Aussi, l'accumulation de sels et solide divers réduit la

capacité utile des bassins et contraint l'opérateur à procéder à un curage périodique. L'un des principaux inconvénients attribuable aux bassins d'évaporation est qu'ils sont attractifs pour les oiseaux d'eau et afin de prévenir leur exposition, l'opérateur a recouru au recouvrement des bassins par un filet (NETL, 2012)

1.3.3.3 Rejet dans l'environnement :

Le rejet dans l'environnement de l'eau de production est une pratique rencontrée essentiellement dans les activités « Offshore » où l'eau de production est rejetée dans la mer ou l'océan. Cette option d'élimination est généralement réglementée et impose le plus souvent un traitement de l'eau de production avant son rejet. Ce traitement peut se révéler complexe et très coûteux.

1.3.3.4 Traitement ex-situ par une tierce partie :

Lorsque la gestion in-situ n'est pas faisable, l'opérateur peut envoyer l'eau de production ex-situ vers des installations d'élimination. Généralement l'eau de production est collectée périodiquement et transportée dans des camions citernes vers ces installations (NETL, 2012). Le recours aux installations d'élimination est souvent fait soit par les petits producteurs qui ne peuvent prendre en charge la construction, l'exploitation et la maintenance d'installations in-situ ou encore, par les opérateurs dont le site d'exploitation n'offre pas de conditions propices à la réinjection (Puder & Veil, 2006).

1.4 Exigences réglementaires régissant la gestion de l'eau de production :

Dans cette section, nous avons jugé utile de passer en revue les exigences réglementaires relatives à deux pays à savoir : l'Algérie et les Etats Unis d'Amérique. La raison pour le choix de l'Algérie est que c'est le pays où est implanté notre site d'étude et par conséquent c'est la réglementation algérienne qui y est applicable. La raison pour le choix des Etats-Unis est que toutes les options de gestion citées y ont été initiées, développées et réglementées. Il convient de souligner que les exigences en vigueur aux Etats-Unis ne revêtent aucun cadre légal en Algérie, mais sont abordés à titre de référence.

1.4.1 Exigences réglementaires aux Etats-Unis :

1.4.1.1 Introduction :

Dans notre description des exigences réglementaires applicable à la gestion de l'eau de production aux Etats-Unis, certaines références réglementaires seront mentionnées de manière récurrente. Pour cette raison, nous avons jugé utile de définir brièvement ces références dans cette introduction avant d'aborder les exigences réglementaires régissant la gestion

1.4.1.1.1 Le code des règlements fédéraux :

Le code des règlements fédéraux (CFR : *Code of Federal Regulations*) des Etats-Unis est le recueil des règles et règlements généraux et permanents publiés dans le Registre Fédéral par les divers départements de l'exécutif et les agences indépendante du gouvernement fédéral. Le CFR est publié par l'office du registre fédéral, une agence de la NARA (*National Archives and Records Administration*).

Le CFR est organisé en plusieurs volumes subdivisés en 50 titres, chaque titre traite d'une large thématique, par exemple : le titre 40 traite de la protection de l'environnement, le titre 42 traite de la santé publique. Les titres sont subdivisés en chapitres, les chapitres en sous-chapitres, les sou chapitres en parties, les parties en sous-parties, les sous-parties en sections et les sections en paragraphes. Ces derniers sont écrits comme suit : « n° titre CFR n° partie .n° section n° paragraphe ». Par exemple le code « **40 CFR 261.4 (b) (5)** » se lit : Paragraphe (b) (5) de la section 4, de la partie 261 du quarantième titre du Code des règlements fédéraux.

Il existe une version internet « non officielle » du *CFR* connue sous le nom de « e-CFR », disponible sur le site : www.ecfr.gov

1.4.1.1.2 Le Resource Conservation and Recovery Act (RCRA):

Le *RCRA* (*Resource Conservation and Recovery Act*), est la principale loi fédérale aux Etats-Unis gouvernant la gestion des déchets solides et des déchets dangereux. Elle fut promulguée en 1976, le *RCRA* est un amendement à la loi relative à l'élimination des déchets solides de 1965 (*Solid Waste Disposal Act*).Le *RCRA*, a été publié par l'Agence de protection de l'environnement (*EPA*) et codifié dans le titre 40 du *CFR* où il couvre les

parties 239 à 282. Le *RCRA* est organisé en dix sous-titres, le sous-titre C est traité des modalités de contrôle des déchets dangereux de leur génération jusqu'à leur élimination.

1.4.1.1.3 Le *Clean Water Act* (*CWA*):

Le *CWA* (*Clean Water Act*) est la principale loi fédérale aux États-Unis gouvernant principalement les eaux de surface. Elle fut promulguée en 1976 et amendée plusieurs fois. Le *CWA* a été publié par l'Agence de protection de l'environnement (*EPA*) et codifié dans le titre 40 du code des règlements fédéraux où il couvre plusieurs sous-chapitres : une portion du sous-chapitre D (parties 100 à 129) intitulé « programme de l'eau », le sous-chapitre N (parties 400 à 471) intitulé « guides et normes relatifs aux effluents », et le sous-chapitre O (partie 501 à 503) intitulé « boues d'épuration des eaux usées ». Le *CWA* est subdivisé en six titres, le titre 04 traite des autorisations de rejet d'effluent dans le cadre d'un programme nommé « *National Pollutant Discharge Elimination System (NPDES)* », et publié par l'*EPA* dans le *CFR* où il couvre les parties 122 (*EPA administered program*) et 125 (*Criteria and standards for the NPDES*).

Le *NPDES* impose l'obtention d'un permis pour le rejet de polluants à partir d'une source ponctuelle et vers des eaux relevant du territoire national. Il existe deux types de permis *NPDES*, les permis individuels ajustés spécifiquement pour un établissement donné, et les permis généraux qui englobent plusieurs établissements appartenant à une catégorie donnée pour une aire géographique donnée. Conformément au *CWA*, c'est l'Agence de protection de l'environnement (*EPA*) qui a l'autorité pour la mise en application du *NPDES*. Néanmoins, l'Agence peut déléguer cette autorité à un état tout en gardant un droit de regard et d'objection si le permis délivré par cet état présente des non-conformités par rapport aux exigences fédérales (Veil et al, 2004).

La définition des limites de rejet pour un effluent est le mécanisme fondamental à considérer dans l'établissement des permis *NPDES* (*EPA*, 2012). En effet, lors de l'établissement d'un permis, l'autorité compétente doit définir des limites en se basant sur deux aspects. Le premier aspect est la technologie disponible pour contrôler la pollution, on parle alors de limites d'effluent basées sur la technologie (*Technology-based effluent limits*). Le second aspect correspond aux seuils de polluants sans impact négatif sur la

qualité des eaux du milieu récepteur, on parle alors de limites d'effluent basées sur la qualité de l'eau (*Water quality-based effluent limits*)

- Limites d'effluents basées sur la qualité de l'eau :

L'autorité qui établit le permis doit considérer l'impact potentiel de chaque rejet envisagé sur le milieu aquatique récepteur. L'autorité pourrait trouver que les limites basées sur la technologie ne sont pas suffisantes pour que les seuils assurant la qualité de l'eau du milieu récepteur soient respectés. Dans ce cas, le paragraphe 40 *CFR 122.44 (d)* exige que l'autorité des limites basée sur la qualité de l'eau car plus elles sont plus strictes et suffisamment protectrices du milieu aquatique récepteur. (EPA, 2010)

- Limites basées sur la technologie :

Le recours aux limites basées sur la technologie dans les permis *NPDES* a pour objet d'imposer un niveau minimal de traitement des polluants au niveau des sources ponctuels. Selon l'EPA (2010), les références permettant d'établir les limites d'effluent basées sur la technologie diffèrent selon la nature de l'établissement. Ainsi, pour les établissements municipaux de traitement (*POTWs*), les limites sont tirées des normes nationales des traitements secondaires. Pour les établissements industriels, les limites sont établies en utilisant les normes nationales définies pour différents secteurs d'industrie ou à défaut, en utilisant le jugement professionnel dans une approche « cas par cas »

1.4.1.1.4 Le *Safe Drinking Water Act (SDWA)*:

Le *SDWA (Safe Drinking Water Act)* est la principale loi fédérale aux Etats-Unis qui assure la qualité d'eau potable pour le public. Conformément à cette loi, l'EPA est chargée d'établir des standards pour la qualité de l'eau potable. Le *SDWA* a été promulguée en 1974 pour protéger la santé publique en réglementant l'alimentation en eau. Cette loi a été amendée en 1986 puis en 1996. Le *SDWA* a été publié par l'Agence de protection de l'environnement (EPA) et codifié dans le titre 40 du code des règlements fédéraux où il couvre une portion du sous chapitre D (parties 141 à 148). Les parties 144 à 148 sont consacrées au programme de control d'injection souterraine (*UIC : Underground Injection Control*) dans lequel l'EPA définit les exigences fédérales minimales régissant les

opérations d'injection souterraine afin de prévenir la contamination des sources souterraines d'eau potable. Conformément à la section 40 CFR 146.5, nous distinguons 06 classes de puits injecteurs, définies comme suit :

(a) Classe I : inclue :

- (1) Puits utilisés par les générateurs de déchets dangereux, ou encore par les propriétaires ou opérateurs d'installations de gestion des déchets dangereux afin d'injecter des déchets dangereux sous la formation la plus profonde contenant une source souterraine d'eau potable dans un rayon de 0,25 mile à partir de la ligne de forage
- (2) Autres Puits industriels et municipal d'élimination qui servent à injecter les fluides sous la formation la plus profonde contenant une source souterraine d'eau potable dans un rayon de 0,25 mile à partir de la ligne de forage
- (3) Puits d'élimination des déchets radioactifs qui servent injecter les fluides sous la formation la plus profonde contenant une source souterraine d'eau potable dans un rayon de 0,25 mile à partir de la ligne de forage

(b) Classe II : inclue les puits qui servent à injecter des fluides:

- (1) Qui sont amenés en surface lors de la production d'huile ou de gaz naturel et peuvent être mélangés aux eaux usées issue des installations de gaz et constituant une partie intégrale des opérations de production, à moins que ces eaux soient classées comme déchets dangereux au moment de l'injection
- (2) Pour augmenter la récupération d'huile ou de gaz naturel
- (3) Pour stockage d'hydrocarbures qui sont à l'état liquide dans les conditions normales de pression et de température

(c) Classe III : Correspond aux puits d'injection pour extraction des minerais :

- (1) Exploitation minière du soufre par le procédé « *Frasch* »
- (2) Production in-situ de l'Uranium ou autres minerais. Cette catégorie inclue uniquement la production in-situ à partir du corps du minerai qui n'a pas été exploité de manière conventionnelle. L'exploitation par mise en solution des minerais par des procédés tels que le « *Stopes leaching* » est incluse dans la Classe V.

(3) Exploitation minière des sels et de la potasse par mise en solution

(d) Classe IV : incluse :

(1) Les puits utilisés par les générateurs de déchets dangereux ou radioactifs, par les propriétaires ou opérateurs d'installations de gestion des déchets dangereux, ou par les propriétaires ou exploitants des sites d'élimination des déchets radioactifs, pour éliminer les déchets dangereux ou radioactifs **dans** une formation qui, dans un rayon de 0,25 mile à partir de la ligne de forage, contient une source souterraine d'eau potable.

(2) Les puits utilisés par les générateurs de déchets dangereux ou radioactifs, par les propriétaires ou opérateurs d'installations de gestion des déchets dangereux, ou par les propriétaires ou exploitants des sites d'élimination des déchets radioactifs, pour éliminer les déchets dangereux ou radioactifs **au dessus** d'une formation qui, dans un rayon de 0,25 mile à partir de la ligne de forage, contient une source souterraine d'eau potable.

(3) Les puits utilisés par les générateurs de déchets dangereux, ou propriétaires ou opérateurs d'installations de gestion des déchets dangereux pour éliminer les déchets dangereux, et qui ne peuvent être classés dans les classes : (a)(1), (d)(1) et (d)(2)

(e) Classe V : correspond aux puits injecteurs non inclus dans les classes I, II, III, IV ou VI. Les types de puits injecteurs de classe V sont décrits dans la section *40 CFR 144.81*

(f) Classe VI : inclue les puits injecteurs non expérimentaux, utilisés pour la séquestration géologique du dioxyde de carbone sous la plus profonde formation contenant une source souterraine d'eau potable ; ou bien les puits injecteurs utilisés pour la séquestration géologique du dioxyde de carbone et ayant bénéficié d'une exemption des exigences relatives à la profondeur d'injection conformément à la section *40 CFR 146.95* ; ou bien, les puits injecteurs utilisés pour la séquestration géologique du dioxyde de carbone ayant fait l'objet d'expansion jusqu'au limite spatiales d'une zone d'injection relevant de la classe II-R contenant un aquifère exempt conformément à la section *40 CFR 146.4* et au paragraphe *40 CFR 144.7 (d)*.

1.4.1.2 Réglementation pertinente eau de production :

1.4.1.2.1 Exemption de l'eau de production de la liste des déchets dangereux :

En 1980, le congrès américain a exempt -sous réserve- les déchets relatifs aux activités Exploration et production de pétrole et gaz (E&P) des exigences relatives à la gestion des déchets dangereux consignées dans le sous-titre C du *RCRA*. La réserve étant que l'agence de protection de l'environnement (*EPA*) était chargé par le congrès d'étudier ces déchets, de soumettre un rapport sur le statut de leurs gestion et de publier le texte réglementaire confirmant ou infirmant l'exemption de ces déchets des dispositions du sous-titre C du *RCRA*(NETL, 2012)

En 1988, l'*EPA* a confirmé l'exemption dans le paragraphe *40 CFR 261.4 (b) (5)* qui exclue de la liste des déchets dangereux, les fluides de forage, eaux de production, et autres déchets associés à l'exploration, le développement, ou la production de pétrole brut, gaz naturel ou énergie géothermale(e-CFR, 2012). Face aux interprétations diverses générées par ce paragraphe, l'*EPA* a publié une première clarification sur cette exemption en 1993 dans le registre fédéral (NETL, 2012) puis en 2002 dans un guide dans lequel l'*EPA* donne des exemples de déchets exempts et des déchets non exempts de la liste des déchets dangereux régie par le sous-titre C du *RCRA*. L'*EPA* y rappelle aussi que l'exemption de la liste des déchets dangereux du *RCRA* ne signifie pas que le déchet exempt soit sans danger pour la santé humaine. Il s'agit plutôt d'une exemption par rapport aux exigences fédérales sur les déchets dangereux (*RCRA* sous-titre C). Donc, ces déchets restent soumis aux autres exigences fédérales (*Clean Water Act, Safe Drinking Water Act, ...*) ainsi qu'aux exigences relatives aux déchets dangereux en vigueur dans les états (*EPA*, 2002)

1.4.1.2.2 Exigences relatives aux rejets d'eau de production :

Nous avons mentionné que l'*EPA* avait développé des guides de limites d'effluent pour la majorité des industries existantes. Pour l'industrie d'extraction de Pétrole et de gaz, l'*EPA* a séparément développé des limites d'effluents pour les activités à terre (*Onshore*) en 1979, en mer (*Offshore*) en 1993, et côtière (*Coastal*) en 1996(Veil et al, 2004). Dans ce paragraphe nous nous limiterons aux activités à terre.

Les exigences relatives aux activités à terre sont consignées dans la sous partie C qui couvre les sections *40 CFR 435.30* à *435.32*, il y est spécifié que les activités Pétrole & Gaz

implantées à terre ne peuvent rejeter l'eau de production dans les eaux de navigation. Néanmoins, il existe deux exceptions :

La première exception est fournie dans la sous partie E couvrant les sections *40 CFR 435.50* à *435.52* et qui permet le rejet d'eau de production en vue d'un usage bénéfique en agriculture ou pour la faune et flore sauvage. Cette exception s'applique aux installations à terre situées à l'ouest du 98^e méridien dont les eaux de production sont jugées d'assez bonne qualité pour servir à des usages bénéfiques en agriculture ou à la faune et flore sauvages. La sous partie E exige entre autre que la qualité de l'eau de production soit d'une qualité suffisante, ne contenant pas plus de 35 mg.l⁻¹ d'huile & graisse et devant servir – lors du rejet- aux usages bénéfiques cités.

La seconde exception qui tolère les rejets d'eau de production des installations à terre est fournie dans la sous partie F qui couvre les sections *40 CFR 435.60* à *435.61* et qui est applicable aux installations ayant une production d'huile journalière inférieure ou égale à 10 barils.

1.4.1.2.3 Exigences relatives à l'injection souterraine d'eau de production :

Comme nous l'avons vu plus haut, l'injection d'eau de production se fait via des puits injecteurs de Classe II-R si l'injection vise à améliorer la récupération d'hydrocarbure du gisement, ou de Classe II-D si l'injection vise à éliminer par confinement l'eau de production. Les exigences relatives à l'application, construction, opération, monitoring et reportage afférant aux puits de classe II sont consignées dans les parties *40 CFR 144* et *146*. Cette section passera en revue certains éléments clés des règlements fédéraux.

Conformément à la section *40 CFR 144.21*, tous les puits de classe II-D déjà existant à la date d'entrée en vigueur du programme *UIC (Underground Injection Control)* nécessitaient l'introduction d'une demande de permis durant les premières années. La section *40 CFR 144.2* stipule que les puits de classe II-R déjà existant à la date d'entrée en vigueur du programme *UIC* restaient soumis au régime d'autorisation d'exploitation du puits tant que le propriétaire ou l'exploitant reste conforme aux dispositions de cette autorisation. Chaque nouveau puits de classe II-D ou II-R doit faire l'objet d'un permis avant sa construction. Dans ce sens, le permis devra être renseigné conformément aux dispositions de la section *40 CFR 146.24*

- Périmètre de vérification (*AOR : Area Of Review*) :

La réglementation relative au contrôle de l'injection souterraine (*UIC*) exige que l'autorité détermine au sein du périmètre de vérification si l'opération d'injection proposée est susceptible de contaminer un aquifère sous-jacent ou sus-jacent à travers les puits existants, les failles, ou autres conduits qui pénètrent dans la zone d'injection. Ce « périmètre de vérification » en déterminant la zone à influence qui correspond à la zone qui a pour rayon, la distance horizontale à partir de la ligne de forage dans laquelle le changement de pression induit par l'opération d'injection pourrait causer la migration du fluide d'injection ou de formation recevant l'injection vers une source souterraine d'eau potable (Thornhill et al, 1982). Donc, le « périmètre de vérification » serait le périmètre autour du puits injecteur où, pendant l'injection, la pression hydrostatique du fluide dans la zone d'injection est supérieure ou égale à la pression hydrostatique d'une source souterraine d'eau potable. Le « périmètre de vérification » peut être calculé mathématiquement par l'équation de Theis ou autre équation équivalente, ou encore définie arbitrairement en fixant un rayon non inférieur à 0,25 mile (Thornhill et al, 1982). Une fois que le « périmètre de vérification » ait été déterminé, le demandeur de permis doit procéder à l'analyse des données relatives à la complétion et aux bouchons de tous les puits qui pénètrent dans la zone d'injection à l'intérieur du « périmètre de vérification ». le demandeur doit vérifier l'existence de conditions pouvant induire la migration de fluide injectée ou fluide de formation hors de la zone d'injection, le cas échéant, le demandeur devrait entreprendre les actions préventives correctives nécessaire avant l'utilisation du puits injecteur (Veil et al, 2004)

- Intégrité mécanique :

L'intégrité mécanique est définie comme l'absence de fuites significatives dans la colonne de revêtement « *Casing* », la colonne de production ou d'injection « *Tubing* », ou dans les garnitures « *Packer* », il s'agit dans ce cas d' « intégrité mécanique interne », ou l'absence de mouvements de fluide significatif dans une source souterraine d'eau potable à travers des chenaux verticaux adjacents au forage, il s'agit dans ce cas d' « intégrité mécanique externe » (Koplos et al, 2006)

L'EPA a approuvé des méthodes de test de l'intégrité mécanique interne, conformément au paragraphe *40 CFR 146.8 (a) (1)*, ces méthodes incluent :

- Test de pression de l'espace annulaire
- Test au traceur radioactif
- Test de l'interface eau-saumure
- Test de pression avec du liquide ou du gaz
- Suivi des données montrant l'absence de changements significatifs de la corrélation pression/débit d'injection (valable uniquement pour certains puits de classe II-R)

Quant aux méthodes approuvées pour la démonstration de l'intégrité mécanique externe, elles sont consignées dans le paragraphe *40 CFR 146.8 (a) (2)* et incluent :

- Relevé de température
 - Relevé de bruit
 - Relevé d'activation-oxygène indiquant l'absence de migration du fluide à travers la colonne de revêtement
 - Traceur radioactif indiquant l'absence de migration du fluide à travers la colonne de revêtement
 - Relevé d'adhésion du ciment
 - Données relatives aux ciments (au lieu de test ou de relevés) attestant l'adéquation du ciment en place (valable pour les puits de classe II uniquement)
- Obturation et abandon :

L'abandon d'un puits consiste en une série d'opérations successives visant à isoler tous les niveaux perméables traversés par un puits injecteur. L'isolation bloquera la communication entre le réservoir et la surface et assurera l'absence d'écoulement entre réservoirs ou vers les aquifères. Généralement, les procédures d'abandon d'un puits injecteur d'eau de production ne varient pas de manière significative de celles appliquées pour l'abandon d'autres types de puits (OGP, 2000). Conformément à la section *40 CFR 146.10*, les puits injecteurs qui n'ont pas été opérationnels pendant deux ans doivent être obturés et abandonnés, à moins que des précautions particulières aient été prises pour prévenir tous risque d'atteinte aux sources souterraines d'eau potable. Le propriétaire doit entre autre s'assurer de la

disponibilité des ressources financières adéquates pour l'obturation et l'abandon adéquats de tout puits qui ne sera plus utilisé.

- Exigences relatives à la construction :

Conformément à la section 40 CFR 146.22, tous les nouveaux puits de classe II doivent être situés dans une formation séparée de toute source souterraine d'eau potable par une zone de confinement. Cette dernière devrait être dépourvue de failles ou fractures connues à l'intérieur du périmètre de vérification. Les puits de classe II doivent être revêtus et cimentés de manière à prévenir l'écoulement de fluides dans ou entre les sources souterraines d'eau potable. Cette section stipule également que la colonne de revêtement (*Casing*) et le ciment utilisés dans la construction doivent être conçus en tenant compte de trois facteurs :

- profondeur de la zone d'injection,
- profondeurs des fonds relatifs aux sources souterraines d'eau potable,
- Estimation de la pression d'injection moyenne et maximale

L'autorité pourrait demander les informations complémentaires suivantes :

- Nature des fluides de formation
- Lithologie relative à la zone d'injection et à la zone de confinement
- Pression externe, pression interne et charge axiale
- Dimension du trou de forage
- Dimension et les spécifications relatives aux joints de revêtement (*Casing*)
- Classe du ciment utilisé

Par ailleurs, la section 40 CFR 146.22 indique que les exigences relatives au revêtement et cimentation ne seront pas appliquées aux puits injecteurs de classe II déjà existant ou récemment convertis en injecteurs, si les deux conditions suivantes sont satisfaites :

- Existence d'exigences et de contrôles réglementaires relatifs au revêtement et à la cimentation lors du premier forage, et conformité du puits avec ces exigences et contrôles

- L'injection n'induit pas d'écoulement de fluides dans une source souterraine d'eau potable de manière à constituer un risque significatif pour la santé

La section 40 CFR 146.22 impose la réalisation de relevés diagraphiques et de tests adéquats lors du forage et de la construction d'un nouveau puits injecteur de classe II. Les relevés et tests qui traitent spécifiquement d'une source souterraine d'eau potable et de la zone de confinement qui lui est adjacente ou de la zone d'injection et des formations adjacentes, doivent faire l'objet d'un rapport descriptif d'interprétation faite par une personne compétente. Ce rapport doit être soumis à l'autorité.

Enfin, la section 40 CFR 146.22 exige que le propriétaire ou opérateur d'un nouveau puits de classe II fournisse des informations relatives à la formation d'injection. Ces informations doivent contenir au moins :

- La pression du fluide
 - La pression de fracturation estimée
 - Caractéristiques physiques et chimiques de la zone d'injection
- Exigences opérationnelles :
Conformément au paragraphe 40 CFR 146.23 (a), les exigences opérationnelles minimales sont décrites comme suit :
 - La pression d'injection au niveau de la tête de puits ne doit pas dépasser un maximum calculé, de façon à assurer que, durant l'injection, la pression n'induit pas l'apparition de nouvelles fractures ou la propagation des fractures existantes dans la zone de confinement adjacente à une source souterraine d'eau potable et en aucun cas, la pression d'injection ne devrait causer l'écoulement du fluide de formation ou d'injection vers une source souterraine d'eau potable
 - L'injection dans l'espace contenu entre le premier revêtement et le forage est interdite

- Exigences relatives aux suivies :

Conformément au paragraphe *40 CFR 146.23 (b)*, les exigences minimales relatives à la surveillance sont :

- Suivi régulier de la nature des fluides injectés, à des intervalles de temps suffisamment fréquent pour avoir des données représentatives de leurs caractéristiques
- Suivi des paramètres « pression d'injection », « débit d'injection » et « volume injecté » dans les fréquences suivantes :
 - ✓ Au moins une fois par semaine pour les puits injecteurs de classe II-D
 - ✓ Au moins une fois par mois pour les puits injecteurs de classe II-R
- Démonstration de l'intégrité mécanique conformément à la section *40 CFR 146.8* au moins une fois tous les cinq ans durant la vie du puits injecteur
- Maintenir tous les résultats de suivi jusqu'à la prochaine révision du permis conformément aux dispositions du paragraphe *40 CFR 144.52 (a) (5)*
- L'injection visant l'augmentation de récupération des hydrocarbures (Classe II-R) peut être suivie à l'échelle du champ plutôt qu'à l'échelle de puits individuels. C'est le cas des établissements comprenant plus d'un puits injecteur opérant via un manifold commun et le suivi se fera au niveau du manifold.

- Exigences relatives aux rapports :

Conformément au paragraphe *40 CFR 146.23 (c)*, les propriétaires ou opérateurs de puits injecteurs doivent communiquer à l'autorité un rapport annuel résumant les résultats relatifs aux suivies. Ce rapport devrait inclure les données mensuelles relatives au fluide injecté ainsi que tout changement significatif dans les caractéristiques ou source du fluide injecté. Ce paragraphe autorise les établissements opérant plusieurs puits injecteur par un manifold commun et assurant le suivi des paramètres d'injection au niveau du manifold d'établir ce rapport pour le manifold.

1.4.2 Exigences réglementaires en Algérie :

Il n'existe pas de réglementation algérienne spécifique à l'eau de production. Dans cette section nous passeront en revue les textes en vigueur et mettre en exergue les exigences légales et réglementaires susceptibles d'être applicables aux points abordés dans la réglementation US, à savoir l'exemption de la réglementation relative aux déchets dangereux, le rejet et la réinjection souterraine.

1.4.2.1 Exemption de l'eau de production de la législation relative aux déchets dangereux:

La loi en vigueur relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets est la loi 01-19 promulguée le 12 décembre 2001.

Au sens de cette loi (article 03) un déchet est défini comme tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, et plus généralement, toute substance, ou produit et out bien meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer (JORADP 77, 2001).

Conformément à son article 04, les dispositions de cette loi sont applicables aux déchets ménagers et assimilés, déchets inertes, déchets spéciaux, déchets d'activité de soins et déchets spéciaux dangereux, alors quels eaux usées ainsi que d'autres déchets (déchets radioactifs, les effluents gazeux, les explosifs déclassés, les épaves d'aéronefs et les épaves maritimes) sont exclues de son champ d'application (JORADP 77, 2001). Il convient de souligner ici que le législateur n'a pas donné de définition « officielle » au terme « eau usée ». Il en résulte que plusieurs exploitants assimilent l'eau de production à une eau usée industrielle et considèrent par conséquent qu'elle n'est pas soumise aux dispositions de la loi 01-19 ainsi qu'à ces textes d'application.

Le décret exécutif 06-104 (JORADP 13, 2006), décrété en application de l'article 05 de la loi 01-19 fixe la nomenclature des déchets, y compris les déchets spéciaux dangereux. Cette nomenclature est une classification systématique des déchets par l'attribution d'un numéro de code structuré comme suit :

- Le premier chiffre représente la catégorie qui retrace le secteur d'activité ou le procédé dont le déchet est issu,

- Le second chiffre représente la section qui retrace l'origine ou la nature du déchet appartenant à la catégorie
- Le troisième chiffre représente la rubrique qui retrace la désignation du déchet

Ce décret contient trois annexes, l'annexe 01 définit les critères de dangerosité des déchets spéciaux dangereux, l'annexe 02 contient la liste de la classe des déchets ménagers et assimilés (MA) ainsi que de la classe des déchets inertes (I) et l'annexe 03 contient la liste relative à la classe des déchets spéciaux (S) ainsi que la classe des déchets spéciaux dangereux (SD).

La classe des déchets spéciaux dangereux (SD) est soumise à plusieurs exigences réglementaires dont :

- Obligation d'autorisation de transport conformément à l'article 24 de la loi 01-19, et dont les modalités sont fixées par le décret exécutif 04-409 (JORADP 81, 2004)
- Interdiction de remettre le déchet à un exploitant n'ayant pas l'autorisation de traitement de cette catégorie de déchet, conformément à l'alinéa 01 de l'article 19 de la loi 01-19
- Obligation de déclaration auprès de la direction de l'environnement conformément à l'article 21 de la loi 01-19, et dont les modalités sont fixées par le décret exécutif 05-315 (JORADP 62, 2005). Cette déclaration servira à la détermination de la taxe d'incitation au déstockage des déchets industriels spéciaux et/ou dangereux conformément à l'article 203 de la loi 01-21 portant loi de finance 2002 (JORADP 79, 2001).

Dans l'annexe 03 du décret exécutif 06-104, le déchet portant le code 13.5.5 correspond à la désignation « *eau mélangée à des hydrocarbures provenant des séparateurs eau / hydrocarbures* ». Contrairement à ce que laisse penser l'assimilation de l'eau de production à une « eau usée », et donc son exemption des dispositions de la loi 01-19 et de ces décrets d'application ; la catégorie 13.5.5 laisse plutôt penser que l'eau de production soit soumise à la réglementation applicable aux déchets spéciaux dangereux.

1.4.2.2 Exigences relatives au rejet et/réutilisation d'eau de production :

Plusieurs textes réglementaires peuvent être applicables selon l'une des quatre cas de figure suivants:

- Le rejet dans l'environnement (sans distinction de la nature du milieu récepteur) ;
- Le déversement dans un réseau public d'assainissement ou dans une station d'épuration ;
- Le rejet dans le domaine public hydraulique ;
- Utilisation pour des usages agricoles individuels ou collectifs ou pour des usages industriels

Le premier cas de figure est applicable aux rejets d'effluents liquides industriels en dehors des installations industrielles, sans distinction de la nature du milieu récepteur. Il est régi par le décret exécutif 06-141 du 19 avril 2006 (JORADP 26, 2006), en application des dispositions de l'article 10 de la loi 03-10 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable (JORADP 43, 2003). Ce décret définit les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels et exige que les installations qui en génèrent, soient conçues, construites et exploitées de manière à ce que leurs rejets ne dépassent pas à la sortie de l'installation, les limites réglementaires. Par ailleurs, ce décret impose à l'exploitant de procéder à l'autocontrôle de la qualité de ses rejets et prévoit des contrôles périodiques et/ou inopinés effectués par les services habilités et lors desquels, l'exploitant est tenu d'expliquer, commenter, ou fonder tout dépassement éventuellement constaté et fournir les actions correctives mises en œuvre ou envisagées.

Le deuxième cas de figure est régi par le décret exécutif 09-209 du 11 juin 2009 (JORADP 36, 2009) en application des dispositions de l'article 119 de la loi 05-12 relative à l'eau modifiée et complétée (JORADP 60, 2005) qui stipule que tout déversement dans un réseau public d'assainissement ou dans une station d'épuration d'eaux usées autres que domestiques est soumis à l'autorisation préalable de l'administration chargée des ressources en eau. Cet article souligne que ce déversement peut être subordonné à une obligation de prétraitement dans le cas où, à l'état brut, ces eaux usées peuvent affecter le bon fonctionnement du réseau public d'assainissement ou de la station d'épuration.

Le décret exécutif 09-209 fixe les modalités d'octroi de cette autorisation. Dans son article 03, il définit des valeurs limites pour la température, le pH ainsi que pour 30 autres paramètres et substances nocives, et exige qu'au moment du déversement dans le réseau public d'assainissement ou dans la station d'épuration, les teneurs en substances nocives de l'eau usée ne dépassent en aucun cas les valeurs limites définies par ce décret. Le décret 09-209 précise entre autre les modalités relatives à la constitution du dossier de demande d'autorisation ainsi que les modalités de contrôle de conformité des eaux usées aux valeurs limites fixées par ce décret.

Le troisième cas de figure est applicable aux effluents non toxiques, il est régi par le décret exécutif 10-88 du 10 mars 2010 (JORADP 17, 2010) qui, en application des dispositions de l'article 44 de la loi 05-12 modifiée et complétée relative à l'eau, fixe les conditions et modalités d'octroi d'autorisation de rejets d'effluents non toxiques dans le domaine public hydraulique. L'article 02 du décret 10-88 stipule que le risque de toxicité ou de nuisance des rejets d'effluents, des déversements ou des dépôts de matières de toute nature, est apprécié par des valeurs limites maximales et des données particulières fixées par arrêté du ministre chargé des ressources en eau et prenant en charge la vulnérabilité du domaine public hydraulique par rapport aux valeurs des rejets d'effluents et déversements fixés par la réglementation en vigueur. A l'heure actuelle, ces valeurs et données n'ont pas encore été arrêtées. L'article 03 de ce décret précise que cette autorisation est octroyée par arrêté du wali territorialement compétent, lequel arrêté doit préciser les prescriptions applicables au rejet, au déversement et au dépôt. Dans le cadre du contrôle du respect des prescriptions de l'arrêté d'autorisation, les articles 6 à 9 du décret exécutif 10-88 attribuent cette tâche à l'administration chargée de la ressource en eau par l'exécution de contrôles périodique et inopinés qui donnent lieu à un rapport et éventuellement à la notification des mesures correctives en cas de non-conformité avec les prescriptions de l'arrêté d'autorisation. Les articles 10 et 11 stipulent qu'en cas de non-exécution des actions correctives dans le délai déterminé par l'administration chargée de la ressource en eau, cette dernière met en demeure le titulaire de l'autorisation afin d'exécuter les mesures prescrites dans un délai supplémentaire, faute de quoi, le wali territorialement compétent prononce l'annulation de la dite autorisation. L'article 12 stipule que tout rejet, déversement ou dépôt de matière de toute nature ne présentant pas de risques de toxicité ou de nuisance dans le domaine public

hydraulique sans autorisation est sanctionné conformément à l'article 171 de la loi 05-12 d'une amende allant de dix mille à cent mille dinars.

Le quatrième cas de figure est applicable à l'utilisation des eaux usées épurées pour des usages agricoles individuels ou collectifs ou pour des usages industriels, conformément à l'article 77 de la loi 05-12 relative à l'eau, cette utilisation est soumise au régime de la concession. Les modalités de concession d'utilisation des eaux usées épurées à des fins d'irrigation sont fixées par le décret exécutif 09-147 du 20 mai 2007 (JORADP 35, 2007).

Ce décret a défini plusieurs exigences portant sur les spécifications de l'eau usée épurée destinée à l'irrigation, les démarches relative à l'octroi de la concession, la prévention des risques liés à l'usage des eaux usées épurées, le contrôle sanitaire ainsi qu'aux dispositions financières. Il convient de souligner que deux articles ont donné lieu à des arrêtés d'application, il s'agit de l'article 02 et l'article 15 qui imposent respectivement des spécifications à cette eau et restreint la liste des cultures pouvant être irriguées par cette.

En application de l'article 15, l'arrêté interministériel du 02 janvier 2012 (JORADP 41, 2012), fixe la liste des cultures pouvant être irriguées avec des eaux usées épurées à cinquante cultures réunies en huit groupes.

Conformément à l'article 02 du décret exécutif 09-147, on entend par « eau usée épurée destinée à l'irrigation », toute eau usée dont la qualité après un traitement approprié dans une station d'épuration ou de lagunage est conforme aux spécifications fixées par arrêté conjoint des ministères chargés des ressources en eau, de la santé et de l'agriculture, il s'agit de l'arrêté interministériel du 02 janvier 2012 (JORADP 41, 2012), fixant les spécifications des eaux usées épurées utilisées à des fins d'irrigation. Cet arrêté a défini des valeurs limites pour les paramètres microbiologique (variables selon le groupe de cultures), ainsi que pour les paramètres physico-chimiques (fixes pour tous les groupe de cultures).

1.4.2.3 Exigence relatives à l'injection souterraine d'eau de production :

Il n'existe pas d'exigences réglementaires explicites spécifiques à l'injection souterraine de l'eau de production. Dans ce sens, prenons l'exemple du décret exécutif 94-43 du 30 janvier 1994 fixant les règles de conservation des gisements d'hydrocarbures et de protection des aquifères associés (JORADP 08, 1994). L'article 18 de ce décret évoque

l'injection d'eau (sans préciser la nature de l'eau) comme procédé de récupération secondaire par balayage, qui est défini selon l'article 07 du même décret comme étant le drainage du réservoir par l'injection d'un fluide. Dans l'article 18, il est mentionné que le choix des procédés de récupération secondaire, le schéma de balayage ainsi que le niveau d'injection doivent être déterminés en fonction notamment des critères suivants :

- Récupération maximale ;
- Niveau de production fixé par le ministre chargé des hydrocarbures ;
- Critères économiques

L'article 21 stipule que les propriétés physiques et chimiques doivent être de nature à assurer une injectivité stable et durable et une bonne efficacité de déplacement de l'huile en place.

L'article 43 stipule que si on utilise comme fluide d'injection des eaux corrosives, les équipements de pompage doivent être en acier inoxydable ou en une matière opposant la même résistance à la corrosion et les collectes et dessertes d'eau doivent être pourvu d'un revêtement anticorrosif. Cet article précise que les puits producteurs influencés par l'injection doivent être surveillés afin de déceler d'éventuelles modifications des conditions bactériologiques de la couche sous l'action des bactéries contenues dans l'eau injectée. L'article souligne que les colonnes de production et les crépines des puits doivent être conçues pour résister à la corrosion.

L'article 185 stipule que les titulaires du titre minier, leurs associés ou autres opérateurs, doivent prendre les dispositions utiles pour la protection et la sauvegarde de l'environnement telles que notamment celles intéressant le bourbier de forage, les rejets des centres de production, la protection des aquifères superficiels, etc...

Donc, il apparaît claire que les exigences explicitement attribuées à la pratique d'injection souterraine en général servent des objectifs d'intégrité des équipements et d'optimisation de la production alors qu'il n'en est pas de même pour la composante environnementale.

Néanmoins, ceci ne signifie pas que cette pratique soit soustraite à toute exigence comme en atteste l'article 17 de la loi 05-12 relative aux hydrocarbures (JORADP 50, 2005) qui

stipule que dans l'exercice des activités objet de cette loi, est observé le plus strict respect des obligations et prescriptions afférentes entre autres:

- Aux caractéristiques essentielles du milieu environnant terrestre ou maritime,
- Au contenu des lois et règlements en vigueur en matière de protection de l'environnement

L'article 18 de cette loi stipule que toute personne doit, avant d'entreprendre toute activité, préparer et soumettre à l'approbation de l'Autorité de Régulation des Hydrocarbures (A.R.H) une étude d'impact environnemental et un plan de gestion de l'environnement. Le contenu de ce plan a été précisé dans le décret exécutif 08-312 du 05 octobre 2008 (JORADP 58, 2008) qui, en application de l'article 18 de la loi 05-07 relative aux hydrocarbures, fixe les conditions d'approbation des études d'impact sur l'environnement concernant les activités « hydrocarbures » par l'autorité de régulation des hydrocarbures.

L'article 8 de ce décret exécutif stipule que l'étude d'impact sur l'environnement relative aux activités d'exploitation des hydrocarbures doit porter sur l'ensemble des installations et activités réalisées sur le périmètre d'exploitation, et notamment :

- (1) Les puits producteurs d'hydrocarbures liquides et gazeux
- (2) Les puits injecteurs de gaz, d'eau, de dioxyde de carbone (CO₂) ou tout autre effluent
- (3) Les réseaux de collectes et de dessertes reliant les puits aux centres de traitement des hydrocarbures
- (4) Les installations de compression de gaz ou de pompage d'eau pour des fins de réinjection ou de gaz lift
- (5) Les canalisations d'expédition des hydrocarbures vers le réseau de transport et les terminaux d'hydrocarbures
- (6) Les constructions réalisées sur le périmètre d'exploitation notamment les bases de vie, les bâtiments, les bureaux administratifs, les magasins et les ateliers
- (7) Les routes d'accès aux puits, aux centres de traitement et de production et aux bases de vie

Donc, conformément aux alinéas (2) et (4), l'exploitant est tenu d'étudier les impacts générés par l'injection souterraine d'eau de production et de définir les mesures de

contrôles appropriées. L'autorité quant à elle, jugera de l'adéquation des mesures de contrôle durant la phase d'approbation, et contrôlera la mise en œuvre durant les audits.

2. Eléments traces métalliques :

2.1 Définition :

Le terme « Eléments traces » n'a jamais été définie avec précision. En géochimie, il est utilisé pour les éléments chimiques présents dans la croûte terrestre avec une concentration inférieure à 0,1% ($1\ 000\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$). En biologie, ce terme s'applique aux éléments chimiques ayant cette même concentration dans les organismes vivants. Par conséquent, certains éléments qui sont « traces » dans les matériaux biologiques, ne le sont pas « traces » dans les matériaux terrestres comme c'est l'exemple du Fer (Kabata-Pendias & Mukherjee, 2007). Le terme « Eléments traces » est relatif à leur abondance et inclue des éléments de diverses propriétés chimiques : métaux et métalloïdes. Les terminologies communes aux cations traces sont « métaux traces » et / ou « métaux lourds », les métalloïdes traces sont simplement dits « Eléments traces ». Selon Kabata-Pendias & Mukherjee (2007), d'autres termes tels que « micro-nutriments », « Eléments essentiels » et « Eléments toxiques » sont relatifs à leurs fonctions physiologiques et sont plutôt ambiguës du moment où leurs effets sur les organismes dépendent de leurs concentrations.

Tous ces termes sont inadéquats, et une grande confusion a pris place dans la littérature où les auteurs n'ont pas été précis dans leur utilisation de ces termes, notamment le terme « métaux lourds » qui a fait récemment l'objet de larges discussions mettant l'accent sur l'imprécision de sa définition.

Durant les deux dernières décennies, le terme « métaux lourds » a été de plus en plus utilisé dans divers texte de publications ou législations relatives au danger chimique et à l'utilisation sûre des substances chimiques. Il est souvent utilisé comme le nom d'un groupe de métaux et métalloïdes associé à la contamination, la toxicité ou l'écotoxicité. (Duffus, 2002).

2.2 Sources dans l'environnement :

2.2.1 Fond géochimique :

Le fond géochimique est par définition « *la teneur naturelle ou originelle en éléments traces dans un sol en absence de tout processus d'apport ou d'exportation vers ou hors d'un site considéré* » (Académie des sciences, 1998 cité par INERIS, 2006).

Cette teneur dépend aussi bien de la teneur de la roche originelle constituant le sol (roche dite primaire) que des processus intervenus lors des périodes géologiques de formation du sol qui ont pu lessiver ou concentrer l'élément en question : le fond géochimique est défini par une valeur moyenne et une variabilité dépendant de l'échelle spatiale considérée (région donnée, horizon de référence, ...).

Tous les sols contiennent naturellement des éléments traces métalliques. Ainsi, leur seule présence n'est pas indicatrice d'une pollution. La concentration de ces éléments dans des sols non contaminés par l'activité humaine est essentiellement liée à la géologie du matériau parent à partir duquel le sol s'est formé. Selon la géologie locale, la concentration en ETM dans un sol non contaminé par l'activité humaine peut dépasser celle d'un autre sol contaminé par l'activité humaine. Pour cette raison, l'utilisation de domaines de variation ou de concentrations moyennes d'éléments traces métalliques dans des sols pour indiquer si un sol est contaminé ou non est inappropriée puisque la concentration native dans un sol spécifique peut se trouver en dehors des domaines listés. Ainsi, seule l'analyse directe des sols non contaminés peut indiquer les niveaux de fond géochimique (INERIS, 2006)

2.2.2 Origine de la pollution :

Les pollutions sur un site peuvent être de différentes natures, nous avons d'abord la pollution locale rencontrée essentiellement sur les anciens sites industriels ou encore les sites de stockage des déchets minéraux. Ensuite, il y a la pollution de proximité, comme par exemple les contaminations en provenance des stations d'épuration, des eaux d'inondation ou encore du dragage des canaux et ports. Enfin, nous avons les sites miniers qui constituent un cas particulier, les concentrations en éléments traces métalliques étant localement très élevées. Bien qu'à l'origine ces éléments soient en général inclus dans des structures cristallines, donc peu mobiles, les risques de migration résultent de l'oxydation

des sulfures (au sein des galeries ou stériles présent en surface). L'acidification des eaux qui en résulte permet le transport à l'état dissous des éléments (phénomène appelé drainage minier acide)

2.2.3 Processus de transfert dans les sols et eaux souterraines :

2.2.3.1 le relargage :

Le premier processus identifiable est le relargage du contaminant à partir d'une source (primaire ou secondaire) ou l'entrée directe du contaminant dans le système étudié via un déversement ou une fuite (INERIS, 2006).

Dans le cas d'une source présente dans le sol (dans la zone non saturée « ZNS », ou dans la zone saturée « ZS »), la cinétique avec laquelle un contaminant donné est relargué (taux de relargage) est variable au cours du temps, elle est notamment fonction de la composition géochimique de l'eau souterraine interagissant avec la source (INERIS, 2006).

Dans le cas d'un déversement direct, la cinétique avec laquelle un contaminant donné est relargué est liée à la vitesse avec laquelle le déversement ou la fuite se produit et à la concentration du contaminant. Il apparaît donc essentiel de connaître l'origine de la pollution métallique et la forme sous laquelle elle se présente (solide, dissoute, diffuse). Selon l'origine du métal ou métalloïde considéré, une première information quant au taux de relargage peut être acquise au travers de différentes sources, variant de publications scientifiques à des rapports techniques réalisés par des organisations ayant eu à évaluer le transfert potentiel de ce genre de contaminants (INERIS, 2006).

Cependant, il faut bien garder à l'esprit que les cinétiques de relargage sont extrêmement dépendantes des conditions géochimiques. En effet, le relargage dépend de paramètres tels le potentiel redox et le pH, chacun d'eux étant spécifique au site. Ainsi, il n'est pas possible de sélectionner une valeur dans la littérature qui aura été déterminée dans des conditions différentes de celles du site étudié, un programme expérimental considérant les principaux paramètres influençant la dissolution de la source doit être prévu et toute évaluation de ces cinétiques doit être accompagnée d'expériences spécifiques en laboratoire, ayant pour objectif de déterminer les taux de relargage dans les conditions géochimiques existant au droit du site étudié (INERIS, 2006)

2.2.3.2 La sorption (ou adsorption):

Le terme générique de sorption peut désigner différentes réactions (dont l'adsorption, absorption...) lorsque seule l'existence d'une réaction entre un élément (ou une molécule) et une surface est connue, sans plus de détail (Atteia, 2005).

Sposito (1986), définit l'adsorption comme « l'accumulation de matière à l'interface entre la phase aqueuse et un adsorbant solide sans formation d'un arrangement moléculaire tridimensionnel ». Mai Zhu (2002a) met en avant le fait que dans le domaine de l'hydrogéologie le terme sorption est souvent synonyme d'adsorption. En effet, les hydrogéologues parlent d'isothermes de sorption quand les chimistes parlent d'isothermes d'adsorption.

L'adsorption du contaminant se produit à la surface de différentes phases solides rencontrées. Ce phénomène qui retarde la migration du contaminant est un processus réversible, ce qui signifie que le contaminant peut être désorbé et par la suite remobilisé.

Les mécanismes de sorption à l'interface solide-liquide peuvent affecter le transfert des éléments traces métalliques dans les sols et les eaux souterraines. Ces mécanismes comprennent entre autres l'adsorption à la surface d'un solide dans les réservoirs à courts temps de résidence : rivières, sols et eaux souterraines peu profondes.

L'adsorption décrit le processus de fixation de matière sur des surfaces minérales. Bien que des réactions physiques de Van der Waal soient également possibles, ce terme décrit principalement la fixation par liaison chimique. C'est un processus limité par la surface spécifique du solide disponible, il diffère de la précipitation par le fait que l'élément métallique ne forme pas de nouvelle phase solide en trois dimensions. De plus, l'adsorption est considérée comme un processus réversible (effet retard).

Plusieurs variables affectent l'étendue de l'adsorption des éléments traces métalliques. Ces variables comprennent le pH, la concentration, la charge, la présence de cations majeurs concurrents, la spéciation aqueuse, l'aire disponible, la densité locale du solide, etc. la variable la plus étudiée dans les analyses d'adsorption est le pH.

Deux grandes catégories de processus d'adsorption, ou mode d'adsorption, peuvent être distinguées :

La première catégorie correspond à l'adsorption par formation d'une liaison covalente entre le métal et les groupes $-OH$ terminaux de la surface du solide. Cette catégorie prédomine dans les solides dont les surfaces présentent des groupes $-OH$ (groupes hydroxydes) terminaux.

La seconde catégorie est l'adsorption par échange d'ions, elle prédomine dans les solides qui possèdent des sites d'échange, principalement les argiles.

Dans le cas de l'adsorption par formation de liaisons covalentes, l'affinité relative de la surface d'un solide pour un cation d'élément trace métallique libre augmente avec la tendance du cation à former des liaisons fortes avec l'oxygène. En effet, le processus d'adsorption est une complexation des groupes $-OH$ terminaux des surfaces du solide avec l'élément. Cette réaction est analogue à la réaction d'hydrolyse d'un ETM par l'eau, la seule différence étant que, au lieu d'avoir une liaison H^+ au niveau du OH^- (groupe qui coordonne le cation), dans les cas des réactions d'adsorption le groupe OH forme à l'origine une liaison avec le solide. Par conséquent, la tendance d'un élément donné à être adsorbé sur une surface dépend dans une certaine mesure de sa tendance à être hydrolysé. La tendance à l'hydrolyse des ETM considérés suit l'ordre suivant : Pb, Cu, Zn et Cd (INERIS, 2006). Dans le cas de l'échange d'ions, la tendance à la substitution dépend de la charge et la taille relatives des éléments métalliques échangés. D'après Mc Llean et Bledsoe (1992), l'affinité relative des ETM pour les sols et constituants du sol se présente comme suit:

Tableau 01 : Affinité des ETMs pour le sol et les constituants du sol (source : Mc Liean et Bledose, 1992)

Sol ou constituant du sol	Ordre d'adsorption relatif	Référence
Matériau contenant des oxydes et des silicates. Adsorption par liaisons covalentes		
Goethite	Cu>Pb>Zn>Co>Cd	Forbes et al., 1976
Oxyde de Fer	Pb > Cu > Zn > Cd	Benjamin et Leckie, 1981
Sols	Zn > Ni > Cd	Tiller et al., 1984
Sols minéraux	Pb > Cu > Zn > Cd	Elliot et al., 1986
Sols organique	Pb > Cu > Cd > Zn	Elliot et al., 1986
Sol	Pb > Cu > Zn > Ni	Harter., 1983
Matériau à base de phyllosilicates (argile). Adsorption par échange d'ions		
Kaolinite	Cd > Zn > Ni	Puls et Bohn., 1988
Montmorillonite	Cd=Zn > Ni	Puls et Bohn., 1988

2.2.3.3 précipitation / Dissolution et Co- précipitation :

Si le produit ionique de la phase solide est dépassé, le contaminant métallique précipite sous forme solide. Cependant, dans la plupart des cas le contaminant n'est pas présent à des teneurs aussi élevées et il est plus probable que le principal processus, outre l'adsorption, soit l'incorporation de l'élément métallique dans un autre minéral majeur, par exemple par le biais d'un processus de Co-précipitation.

Dans cette éventualité, le contaminant peut être incorporé à un solide déjà existant. Cette interaction peut débiter par un simple procédé d'adsorption et évoluer vers une plus forte interaction, avec des réorganisations de la structure de la phase solide, qui peuvent donner naissance à des phases solides mixtes.

La précipitation/ Co-précipitation de surface est importante lorsqu'on modélise le comportement d'ETM dans des réservoirs avec des temps de séjour de plus longue durée : océans et eaux souterraines profondes. Dans ce cas, le vieillissement des phases solides dynamiques est un facteur critique.

La Co-précipitation est la disparition d'un oligoélément de la solution en tant qu'impureté ou composant mineur dans des phases secondaires formées à partir des composants majeurs du système, de sorte que la concentration résiduelle de l'oligoélément en solution est inférieure à celle qui serait prédite à partir des solubilités de solides contenant cet oligoélément en tant que composant majeur (Curti, 1997)

2.2.3.4 La complexation aqueuse :

La complexation aqueuse, incluant les réactions redox, affecte la mobilité des contaminants métalliques. Les métaux lourds peuvent former des complexes aqueux avec différents ligands organiques et inorganiques présents dans les eaux souterraines. Une augmentation de la concentration d'un ligand peut conduire à une augmentation de la concentration aqueuse en métal due à la formation de complexes de coordination. Une variation des conditions redox peut causer la mobilisation ou l'immobilisation d'un élément donné.

2.2.3.5 la complexation à des colloïdes :

Un autre processus pouvant affecter la mobilité du métal est la complexation avec des colloïdes mobiles.

En effet, du fait de leur petite taille, de leur surface spécifique élevée et de leurs propriétés de charge, les colloïdes mobiles (minéraux et organiques) ont potentiellement une forte affinité pour les ETM (Citeau, 2004).

Les matériaux humiques et fulviques sont très souvent rencontrés dans les eaux souterraines. Ces espèces ont des masses moléculaires élevées et forment des colloïdes de haute densité avec des groupes fonctionnels qui peuvent complexer les éléments traces métalliques. Cette complexation peut augmenter la mobilité des métaux puisque les colloïdes peuvent migrer à la même vitesse que l'eau.

La formation de particules colloïdales peut aussi se produire si l'eau est saturée ou à cause d'interactions entre les matériaux solides et la solution aqueuse. Les éléments métalliques peuvent s'adsorber aux particules colloïdales et être transportés avec elles. Il est donc nécessaire d'estimer le degré d'occurrence de telles particules dans l'eau souterraine considérée (INERIS, 2006).

2.2.3.6 Activité bactérienne :

Les bactéries sont aussi des colloïdes qui peuvent influencer le comportement des métaux. L'importance des microbes dans la composition de l'eau a été étudiée notamment par Pederson (1997). Les bactéries présentes dans l'environnement peuvent avoir un effet catalytique sur certains processus géochimiques comme :

- L'oxydation de la matière organique ;
- L'oxydation du fer divalent et des sulfures ;
- La réduction de fer trivalent en fer divalent (via l'oxydation de la matière organique) dans des environnements anoxiques ;
- La réduction des sulfates en sulfures (par oxydation de la matière organique), dans des environnements où la teneur en matière organique, nutriments et sulfates est élevée

Les matières organiques présentes dans les environnements naturels peuvent servir de nutriments pour les microbes et, même en absence de matières organiques, les bactéries peuvent utiliser du méthane et de l'hydrogène dissous dans l'eau. La teneur en oxygène influence directement les conditions redox de l'eau souterraine, qui est l'un des paramètres les plus importants dans l'environnement hydrogéochimique.

2.3 Eléments traces métalliques étudiés :

2.3.1 Informations générales :

2.3.1.1 Le cadmium :

Le cadmium (CAS 7440-43-9), un métal luisant blanc doux, teinté de bleu, rarement trouvé à l'état pur, existe dans la nature sous forme de cation divalent (Cu^{2+}). Le cadmium a une masse atomique de 112,40 et une pression de vapeur de 1,4 mm Hg. Avec un point d'ébullition de 750°C, il est peu probable que le cadmium se volatilise, sauf sous conditions extrêmes (volcans ou feu de forêts) (Eisler, 1985). La forme élémentaire du cadmium est insoluble dans l'eau, alors que la solubilité des sels de cadmium varie de 0,00013 à 140g.100 ml⁻¹ (Lide, 1992).

Le cadmium a cinq usages industriels principaux : les accumulateurs Nickel/Cadmium, les revêtements, les pigments, les alliages, et les agents stabilisateurs dans les plastiques et les produits synthétiques (Hoskin, 1991)

2.3.1.2 Le plomb :

Le plomb (CAS 4739-92-1) est un métal argenté brillant, malléable et dense qui ternit au contact de l'air et devient d'un gris bleuâtre terne. Le métal a un point de fusion relativement faible de 327,5 °C et un point d'ébullition de 1740°C. La solubilité du plomb métallique est très faible, alors que la solubilité des autres composés du plomb varie de très soluble à extrêmement insoluble (Environnement Canada, 1996). En milieux naturels, le plomb se rencontre rarement sous forme élémentaire (MEEQ, 1994), mais existe principalement sous forme d'ion divalent stable Pb^{2+} (CCMRE, 1987), le plomb forme facilement des alliages avec d'autres métaux comme l'étain, l'antimoine, le cuivre et le zinc.

Les minerais primaires représentent plus de 95% de la production minière de plomb. La production du plomb à partir des minerais est souvent associée à la production du zinc, puisque le plomb et le zinc se rencontrent fréquemment ensemble dans la nature (CCME, 1999)

2.3.1.3 Le cuivre :

Le cuivre (CAS 7440-50-8) est un métal qui se rencontre sous quatre états d'oxydation (Cu , Cu^{1+} , Cu^{2+} et Cu^{3+}) dont Cu^{2+} est la forme la plus fréquente. Le numéro atomique du cuivre est le 29 et sa masse moléculaire est de 63, 546. Le cuivre a une masse spécifique de 8,96 à 20°C, un point de fusion de 1083°C et un point d'ébullition de 2695°C (CCME, 1997).

Le cuivre est utilisé abondamment dans la fabrication de textiles, de peinture antisalissure, de conducteurs électriques, de tuyaux et d'accessoires de plomberie, de pièces de monnaie et de batteries de cuisine. Certains composés de cuivre sont aussi des ingrédients actifs dans les préservatifs du bois, les pesticides et les fongicides. Enfin, le sulfate de cuivre est parfois inclus dans les engrais comme micro-élément nutritif (CCME, 1997).

Le cuivre est présent dans un large éventail de types de dépôts minéraux en tant que minéral primaire et secondaire. Le cuivre métallique à l'état élémentaire existe dans la

nature mais la plus part du cuivre est présent sous forme de minéraux sulfurés, particulièrement la chalcopirite (CuFeS_2), ainsi que la chalcocite (Cu_2S), la bornite (Cu_5FeS_4) et la tétraédrite ($(\text{CuFe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$). L'altération chimique météorique de ces minéraux primaires de sulfure de cuivre peut entraîner la formation de minéraux secondaires, y compris la cuprite oxydée (CuO_2), la malachite carbonée ($\text{Cu}_2(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$) et l'azurite carbonée ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$), ainsi que la brochantite sulfatée ($\text{Cu}_3\text{SO}_4(\text{OH})_4$) (CCME, 1997)

2.3.1.4 Le zinc :

Le zinc (CAS 7440-66-6) est un métal de transition du groupe 12 (anciennement groupe IIB) qui a le numéro atomique 30 et une masse moléculaire de 65,38. A l'état pur, le zinc à un point de fusion relativement bas de 419°C et un point d'ébullition de 907°C . le zinc est divalent et tend à réagir fortement avec les composés organiques et inorganiques. Le zinc forme des combinaisons stables avec plusieurs substances organiques incluant les acides humiques et fulviques et un large éventail de composés biochimiques. Le zinc métallique est insoluble alors que les différents composés du zinc varient entre insolubles (oxydes, carbonates, phosphates et silicates) et extrêmement solubles (sulfates et chlorures) (Environnement Canada, 1996).

Le zinc est principalement utilisé dans le processus de galvanisation puis dans la fabrication de laiton et de bronze pour les pièces de plomberie et pour les composantes des systèmes de chauffage et de climatisation. Les autres usages du zinc incluent la fabrication de semi produits en zinc, d'oxydes, de produits chimiques et de poussières de zinc. L'oxyde de zinc est important pour la fabrication de pneus et d'autres produits en caoutchouc. De plus il y a eu beaucoup de recherches sur l'utilisation de zinc dans les piles, dont la pile zinc-air développée pour les ordinateurs personnels. Cette pile dure trois fois plus longtemps que les piles Nickel-cadmium et peut être recyclée. la poudre de zinc est utilisée dans la production de piles sans mercure (Environnement Canada, 1996)

2.3.2 Devenir dans l'environnement et comportement dans le sol :

2.3.2.1 Le cadmium :

Une variété de facteurs influencent la mobilité du cadmium dans les sols ; les plus importants sont probablement le pH et le type de sol (y compris la taille des particules ; la teneur en oxydes, hydroxydes, et oxyhydroxydes de métal et la teneur en matière organique). De nombreuses études ont identifié le pH du sol comme un facteur important influençant la mobilité du cadmium dans le sol (Chanmugathas et Bollag, 1987 ; Christensen, 1989b ; Ericksson, 1989, Iodenus et autio, 1989), et la plupart des études soutiennent qu'un mouvement significatif du cadmium dans la matrice du sol et vers d'autres milieux est probable dans des conditions acides. Un certain nombre de processus, notamment le transport éolien, le transport fluvial, le lessivage et l'absorption par des organismes terrestres ont aussi le potentiel d'affecter le devenir du cadmium dans le sol (CCME, 1999).

Les sols sont particulièrement importants dans l'atténuation puisqu'ils ont à la fois des composantes minérales et organiques qui interviennent dans la rétention des métaux (Evans, 1989). Plusieurs études ont démontré que les minéraux argileux (McBride et coll., 1981 ; Inskip et Baham, 1983 ; Christensen, 1984a, 1984b), les oxydes, hydroxydes et oxyhydroxydes de métal (Benjamin et Leckie 1981a, 1981b ; Bruemmer et coll., 1988 ; Fu et coll., 1991), et la matière organique (Blume et Brummer, 1991) contribuent à l'immobilisation du cadmium dans les sols. Toutefois, la présence de concentrations élevées de matière organique dissoute dans les produits de lixiviation du sol peut aussi augmenter la mobilité du cadmium et ainsi représenter un risque pour la qualité de l'eau de la nappe phréatique (Bollag et Czaban, 1989 ; Christensen 1989a ; Singh 1990).

Les microorganismes peuvent avoir un effet inhibant ou stimulant sur la mobilité du cadmium dans le sol. Les substances organiques produites par certains micro-organismes peuvent agir comme chélate et immobiliser effectivement le cadmium (Bollag et Czaban, 1989). De plus, la production microbienne de sulfure d'hydrogène peut induire la formation de sulfures de cadmium insolubles, lesquels sont très stables (Bollag et Czaban, 1989). Toutefois, la décomposition microbienne de la matière organique ou de sulfures des métaux peut induire le largage de cadmium à partir de complexes stables et ainsi augmenter

la mobilité globale (Cole, 1979 cité par CCME, 1999). Le degré de mobilisation dépend du type de sol, de l'aération et de la teneur en humidité.

2.3.2.2 Le plomb :

Le plomb peut constituer un danger pour l'environnement s'il se déplace dans le sol et contamine la nappe phréatique et les eaux de surface, ou s'il est transféré aux organismes vivants. Plusieurs facteurs affectent la mobilité et la biodisponibilité du plomb : le pH, la texture du sol (surtout la teneur en argile) et la teneur en matières organiques. Comme le plomb dissous dans l'eau des sols est normalement sous la forme Pb^{2+} , l'adsorption sur les sites d'échange cationique des argiles ou de la matière organique peut diminuer la mobilité et la disponibilité du plomb à court terme. L'érosion des sols par le vent ou l'eau est une voie importante par laquelle les sols contaminés au plomb peuvent migrer et contaminer le milieu environnant (CCME, 1999).

L'ajout de plomb dans le sol peut provenir de retombées atmosphériques, de déversements accidentels ou volontaires de déchets contenant du plomb ou de l'épandage de pesticides et d'engrais contenant du plomb. La solubilité et la mobilité initiale du plomb dans le sol dépendront du type de composé de plomb qui aura été ajouté au sol. Par exemple, les chlorures de plomb, les acétates de plomb et les nitrates de plomb sont très solubles et seront facilement lessivés des sols. Les oxydes de plomb bien qu'ils soient moins solubles que les sels, sont encore plus solubles que certains composés du plomb qui se forment dans les sols. Le plomb métallique est relativement insoluble mais il peut être oxydé dans les sols pour former PbO , qui lui, peut être dissous ou transformé en un composé plus stable. (CCME, 1999).

Dans les sols aérobies, la désagrégation des composés de plomb très solubles résulte en la formation de composés plus stables comme le $Pb_3CO_3(OH)_2$ (Lindsay, 1979). Dans les sols anaérobies, la réduction de SO_4^{2-} en S^{2-} mène à la formation de sulfure de plomb (PbS), un composé très insoluble et non réactif. Même dans les déchets municipaux solides compostés, la solubilité du plomb diminue à mesure que le matériel vieillit et se stabilise (Leita et De Nobili, 1991).

Dans les sols, la solubilité du plomb semble être contrôlée par des composés relativement insolubles comme $PbCO_3$, $Pb(OH)_2$, $Pb_3(PO_4)_2$, ou $Pb_5(PO_4)_3OH$, qui ont une solubilité dépendante du pH. Ceci est contraire aux sels de plomb normalement utilisés dans les tests

de toxicité, dont la solubilité ne dépend pas du pH (Santillan-Medrano et Jurinak, 1975). Par exemple, le $\text{Pb}(\text{OH})_2$ maintiendrait une concentration de Pb^{2+} d'environ 300 g.L^{-1} en solution à pH de 4 mais à un pH de 7 la concentration serait seulement $0,0003 \text{ g.L}^{-1}$.

Il ne semble pas y avoir de preuve concluante à savoir quelles formes du plomb sont disponibles au biote du sol. Les indications relatives aux effets des propriétés du sol comme le pH, la capacité d'échange cationique, et la présence de ligands capables de lier le plomb (ex. PO_4 ou la matière organique) suggèrent que la quantité de métal libre (Pb^{2+}) est la fraction critique (Adriano, 1986 ; Kabata-Pendias & Pendias, 1992).

A l'opposé des sols non contaminés, la teneur en plomb des sols contaminés est généralement plus élevée dans les horizons de surface que plus profondément dans le profil du sol. Cette tendance est due en partie au dépôt de plomb provenant de l'atmosphère de même qu'à la capacité de ce métal de former des complexes forts avec la matière organique (Adriano, 1986). En présence d'acides organiques solubles, comme l'acide fulvique, le plomb peut être rendu mobile et être lessivé vers le bas dans le profil du sol. Bien qu'il ait été démontré que l'addition de matière organique au sol diminue la disponibilité du plomb pour les plantes, la décomposition éventuelle des complexes organiques peut entraîner le rejet de plomb dans la solution du sol (Kabata-Pendias & Pendias, 1992).

En plus de l'impact qu'a la matière organique, il a été démontré que la manipulation du pH du sol par épandage de chaux ou d'engrais phosphatés diminue la quantité de plomb absorbé par les plantes (Adriano, 1986 ; Kabata-Pendias et Pendias 1992)

2.3.2.3 Le cuivre :

Le cuivre est fortement adsorbé aux particules du sol. Par conséquent, il est beaucoup moins mobile que d'autres éléments traces (Alloway, 1990). Il en résulte que le cuivre déposé tend à s'accumuler dans le sol (Slooff et coll, 1989). Les différents types de sol ont des capacités de rétention limitées pour les ions de cuivre, et un lessivage peut survenir lorsque les niveaux de cuivre épandus ou déposés dépassent cette capacité (Adriano, 1986).

Les facteurs qui influencent la disponibilité du cuivre dans les sols sont le pH, la capacité d'échange cationique, la teneur en matières organiques, la présence d'oxyde de fer, de

manganèse et d'aluminium et le potentiel d'oxydoréduction (Adriano, 1986 ; Slooff et coll, 1989)

Adriano (1986)) a démontré que la capacité du sol à adsorber le cuivre augmente avec l'augmentation du pH, la capacité maximale de rétention étant obtenue dans des conditions de pH neutre ou légèrement alcalin (pH 6,7 – 7,8) (CCME, 1999). De plus, les sols alcalins favorise la précipitation du cuivre ; ainsi, le cuivre est plus mobile sous des conditions acides que sous des conditions alcalines. En général, plus la CEC est élevée, plus le sol peut adsorber le cuivre (Adriano 1986). Les sols ayant une CE élevée ont la capacité de retirer les cations de métaux traces de la solution du sol (Fuller, 1977 cité par CCME, 1999). La CEC dépend du type et de la quantité d'argile présents, de la quantité de matière organique présente, et du pH du sol (CCME, 1997).

Le cuivre a une très grande affinité pour la matière organique et s'y lie plus fortement que les autres éléments traces (Nriagu, 1979 ; Adriano, 1986 ; Sloof et coll, 1989 ; Alloway, 1990). Cette forte capacité d'adsorption de la matière organique est vraisemblablement due à sa CEC élevée et à sa capacité de chélation (Adriano, 1986, Hunter et coll, 1987). Le cuivre présent dans les solutions de sol est souvent lié à la matière organique dissoute et ne sera relâché sous forme ionique que sous de fortes conditions d'oxydation ou par la décomposition microbienne de la matière organique (Fuller , 1977 ; Gibson et Farmer, 1984 cité par CCME, 1999). Bien que la matière organique contribue généralement à l'immobilité du cuivre en formant de fortes liaisons, elle peut aussi augmenter la solubilité du cuivre par la formation de complexes solubles (CCME, 1997).

Le cuivre est adsorbé spécifiquement par les oxydes de fer, d'aluminium et de manganèse (Alloway et Jackson, 1991). A l'exception possible du plomb, le cuivre est le plus fortement adsorbé de tous les métaux divalents, qu'ils soient des métaux de transition ou des métaux traces, sur les oxydes et les oxyhydroxydes de fer et d'aluminium (Adriano, 1986).

La teneur en eau des sols influence la capacité de rétention du cuivre par des réactions biotiques et abiotiques d'oxydoréduction. La réduction du cuivre donne lieu à une plus grande solubilité (Adriano, 1986). D'après Reddy et Patrick (1983) cité par CCME (1999), la réduction peut entraîner la solubilisation du cuivre adsorbé spécifiquement sur les oxydes et les oxydes hydratés de fer et de manganèse.

2.3.2.4 Le zinc:

Le zinc est très réactif dans les sols, de sorte qu'en plus du zinc Zn^{2+} inorganique, on retrouve aussi le zinc sous forme de composés organiques solubles et insolubles. Le zinc peut être adsorbé aux minéraux argileux et aux oxydes métalliques et peut aussi être présent dans les minéraux primaires des matériaux d'origine (Sachdev et coll., 1992). En général, le zinc est réparti également parmi tous les horizons du sol. Toutefois le zinc pouvant être extrait par EDTA diminue avec la profondeur dans le profil du sol (Lindsay, 1972 cité par CCME, 1999).

La concentration du zinc dans la solution du sol dépend de la quantité de zinc présente dans le sol, de la solubilité du composé particulier du zinc et de l'ampleur de l'adsorption. La solubilité varie de façon significative entre les différents composés de zinc ; le sulfate de zinc est très soluble dans la solution du sol, alors que l'oxyde de zinc est relativement insoluble. Le zinc peut être adsorbé aux minéraux argileux, mais peut aussi former des composés stables avec la matière organique du sol, dont les hydroxydes, les oxydes et les carbonates (CCME, 1999).

Plusieurs études ont démontré que le pH du sol est un des principaux facteurs affectant la mobilité et la rétention du zinc dans les sols (Shuman, 1975 ; Evans, 1989 ; Duquette et Hendershot, 1990 ; Davis-Carter et Shuman, 1993). Le zinc devient plus soluble avec les diminutions des pH ; le zinc est donc plus mobile et, par conséquent, plus disponible aux organismes lorsque le pH est faible, surtout à $pH < 5$ (Duquette et Hendershot, 1990). A $pH < 7,7$, le zinc est sous forme de Zn^{2+} dans la solution du sol, alors qu'à $pH > 7,7$, la forme prédominante est $Zn(OH)_2$ (Giordano et Mordvedt, 1980 cité par CCME, 1999), ce qui explique le lessivage plus fréquent du zinc dans les sols acides.

La quantité de zinc bio disponible est déterminée par la quantité de zinc qui est soluble ou qui peut être solubilisé, présente dans le sol. Dans un sol donné, un équilibre existe entre les différentes formes de zinc (adsorbé, échangeable, minéraux secondaires, complexes insolubles) dans les phases liquides et solide du sol. L'absorption par les plantes, les pertes par lessivage, l'introduction du zinc sous différentes formes, les changements de la teneur en eau du sol, les changements de pH, la minéralisation de la matière organique et les changements du potentiel d'oxydo-réduction du sol sont des facteurs qui influencent l'équilibre. A cause de la complexité des interactions du zinc dans le sol, le comportement

du transport du zinc dans ce milieu ne peut être prédit avec exactitude (Hinz et Selim, 1994). De plus, les effets de l'adsorption dans le sol ne peuvent être isolés des effets de solution, telle la précipitation.

2.3.3 Devenir et effet chez le biote:

2.3.3.1 Processus microbiens du sol :

2.3.3.1.1 Le cadmium :

La taille des populations de bactéries et de champignons a été réduite dans des sols présentant une concentration en cadmium de $2,9 \text{ mg.kg}^{-1}$ (Naidu et Reddy, 1988 ; Kobus et Kurek, 1990). La minéralisation de l'azote a été réduite de 17 à 39% à une concentration en cadmium de 5 mg.kg^{-1} (Liang et Tabatabai, 1977). Une réduction de 60% de la nitrification a été observée à une concentration en cadmium de 1000 mg.kg^{-1} , et la production de dioxyde de carbone dans le sol a été réduite de 17 à 47% par des concentrations allant de 10 à 8000 mg.kg^{-1} (Cornfield, 1977 ; Bewley et Stotzky, 1983 ; Lightthart et coll., 1983 ; Doelman et Haanstra, 1984).

2.3.3.1.2 Le plomb :

Bhuiya et Cornfield (1974) cité par CCME (1999) ont observé que des doses uniques de 1000 mg.kg^{-1} de plomb n'avaient aucun effet sur la nitrification à un pH de 6,0, mais qu'elles inhibaient la nitrification de 11 et 9% à des pH de 7,0 et 7,7 respectivement. L'application d'une dose unique d'acétate de plomb de 1036 mg.kg^{-1} a réduit la nitrification de 7 à 26% selon le type de sol (Liang et Tabatabai, 1978 cité par CCME, 1999). Bollag et Barabasz (1979) cité par CCME (1999) ont observé qu'une concentration de 1000 mg.kg^{-1} de plomb réduisait la dénitrification d'environ 15%. Wilke (1989) cité par CCME (1999) observe que la nitrification n'était pas inhibée à des concentrations en plomb de 1000 et 4000 mg.kg^{-1} , mais plutôt qu'elle augmentait de 12 à 16% respectivement. La minéralisation de l'azote quant à elle, était réduite de 32 et 44% à ces mêmes concentrations respectivement.

La consommation d'oxygène a diminué de 16 à 17% à une concentration en plomb de 375 mg.kg^{-1} dans un sol sablonneux, mais elle n'a pas été affectée dans un sol argileux. Dans un sol sablonneux, la production de dioxyde de carbone fut réduite de 12 à 59% en présence de 400 à 8000 mg.kg^{-1} de plomb dans le sol ; dans un terreau sablonneux, elle fut

de 6 à 45% en présence de 150 à 1000 mg.kg⁻¹ de sol (Doelman et Haanstra, 1979, 1984 cité par CCME, 1999)

2.3.3.1.3 Le cuivre :

La concentration de cuivre la plus faible ayant un effet négatif sur l'évolution du dioxyde de carbone dans une population microbienne a été rapportée par Cornfield (1977) cité par CCME (1999). Une diminution de 25% de l'évolution du CO₂ a été observée à une concentration en cuivre de 100 mg.kg⁻¹.

2.3.3.1.4 Le zinc :

Les processus microbiens sont sensibles aux concentrations en zinc. Cornfield (1977) cité par CCME (1999) a observé une diminution de 21% de la respiration de CO₂ après une exposition de 08 semaines à une concentration en zinc dans le sol de 10 mg.kg⁻¹. La nitrification semble moins affectée par le zinc puisque Liang et Tabatabai (1978) cité par CCME (1999) ont trouvé qu'une concentration en zinc de 327 mg.kg⁻¹ était nécessaire pour entraîner une inhibition de 24% de la nitrification.

2.3.3.2 Invertébrés du sol :

2.3.3.2.1 Le cadmium :

Plusieurs études ont démontré qu'une absorption et qu'une accumulation de cadmium par les vers de terre surviennent dans les sols contaminés (Hartenstein et coll., 1981 ; Kruse et Barrett, 1985 cités par CCME, 1999). Au cours d'une expérience sur le terrain, Ma (1982) cité par CCME (1999) a démontré que le pH du sol et la capacité d'échange cationique (CEC) affectent tous deux l'absorption du cadmium par les vers de terre. Une corrélation négative significative a été calculée entre le facteur de concentration et le pH du sol. Cette corrélation est conséquente puisqu'une diminution du pH entraîne une désorption accrue des cations métalliques. Une deuxième corrélation négative significative a été calculée entre le facteur de concentration et la CEC, révélant l'importance générale de la disponibilité du métal plutôt que de sa concentration totale dans le sol (CCME, 1999).

2.3.3.2.2 Le plomb :

Les vers de terre accumulent le plomb et sont donc des indicateurs utiles de la pollution du sol par le plomb. Les concentrations totales de plomb excèdent presque toujours les concentrations totales de plomb dans les vers de terre. Par contre, des conditions exceptionnelles comme des niveaux élevés de plomb dans les sols combiné à un faible pH et à une teneur en calcium peu élevée, peuvent induire une plus grande accumulation du plomb provenant du sol, chez les vers de terre (Ireland, 1979 cité par CCME, 1999). Les Facteurs de bioconcentration (FBC) varient de 0,01 à 2,73, mais ils sont en général bien en dessous de 1,0, indiquant qu'il n'y a pas de relation constante entre la concentration du plomb dans le sol et celle et celle mesurée dans les vers de terre (Kabata-Pendias et Pendias, 1992)

Les invertébrés carnivores du sol tels que les coléoptères faucheurs et les coléoptères carabidés sont généralement plus susceptibles d'empoisonnement au plomb que les herbivores comme les charançons et les fourmis (Bengtsson et Rundgren, 1984 cité par CCME, 1999). Les FBC du plomb chez les arthropodes (rapport entre la concentration de plomb dans l'animal et la concentration de plomb dans la couche de litière) varient de 0,01 à 0,43 (Martien et Hogervorst, 1993). Comme pour les vers de terre, il n'y a pas de relation constante entre la quantité de plomb mesurée dans la litière et la quantité de plomb accumulée dans les arthropodes (CCME, 1999).

Tous les invertébrés ingèrent du plomb à partir du sol mais ils n'assimilent que de faibles quantités nettes de plomb par comparaison à d'autres métaux traces comme le cadmium, puisqu'ils excrètent rapidement le plomb (van Straalen et van Meerendonk, 1987 cité par CCME, 1999) et l'absorbent de manière limitée dans la paroi intestinale (Hopkin et Martin, 1984 cité par CCME, 1999). La moitié de la charge corporelle de plomb dans le collembole *Orchisella cincta* se retrouve dans l'intestin, où la durée de demi-vie est < 1j (van Straalen et coll., 1985 cité par CCME, 1999).

2.3.3.2.3 Le cuivre :

Les concentrations les plus faibles de cuivre pour lesquelles des effets négatifs surviennent chez les invertébrés du sol ont été révélées par une étude de Ma (1988) cité par CCME (1999) sur la production de cocon par trois différents types de vers de terre (*Apporectodea caliginosa*, *Allolobophora chlorotica* et *Lumbricus rubellus*). Chez *A.caliginosa* et *A.*

chlorotica, la production de cocon a commencé à diminuer à une concentration de cuivre dans le sol de 28 mg.kg^{-1} , alors que chez *L.rubellus* une réponse n'est apparue qu'à une concentration dans le sol de 80 mg.kg^{-1} . Des valeurs de CE_{50} respectives de 51 mg.kg^{-1} , 68 mg.kg^{-1} et 122 mg.kg^{-1} ont été mesurées pour *A.caliginosa*, *A. chlorotica* et *L.rubellus*. Un FBC sol-à-invertébrés de 0,47 a aussi été calculé à partir de données tirées de la littérature (CCME, 1997).

2.3.3.2.4 Le zinc :

Une CL_{50} de 80 mg.kg^{-1} de zinc dans le sol sec a été mesurée chez le ver de terre, *Eisenia foetida* (Sheppard et coll., 1993). Les caractéristiques du sol jouent un rôle important dans l'apport de zinc par les vers. Ma (1982) cité par CCME (1999) rapporte que les niveaux de zinc dans les vers de terre, *Lumbricus rubellus*, sont généralement reliés aux concentrations de zinc dans le sol et sont d'avantage corrélées avec les concentrations de zinc dans les sols à faible pH. A plus faible pH, le sol adsorbe moins le zinc, ce qui le rend plus bio disponible pour les vers de terre.

2.3.3.3 Plantes terrestres:

2.3.3.3.1 Le cadmium :

Les taux d'absorption du cadmium par les plantes sont variables et dépendent de l'espèce de plante (Kuboi et coll., 1986 ; Kim et coll., 1988), de la concentration de cadmium dans le sol de même que des autres facteurs ayant une influence sur la biodisponibilité du cadmium (CCME, 1999). La translocation du cadmium n'est pas universelle parmi les plantes ; des études ont révélé une accumulation de cadmium dans les racines chez certaines plantes (Carlson et Ragsdale, 1988 ; Mench et coll., 1989) et dans les feuilles chez d'autres (Kim et coll., 1988 ; Boon et Soltanpour, 1992).

Environnement Canada a calculé des FBC sol-à-plante pour différents tissus de plantes et a rapporté des valeurs de FBC de 1,81 ; 1,07 ; et 15,22 pour les feuilles, les pousses et les racines, respectivement, à partir des résultats de plusieurs études (Kelly et coll., 1979 ; Burton et Morgan, 1984 ; Wadge et Hutton, 1986 ; Kim et coll., 1988 ; Bache et Lisk, 1990 cités par CCME, 1999). Toutefois, en faisant la moyenne géométrique de tous les FBC calculés pour ces tissus végétaux, un FBC global de 2,65 est obtenu (Environnement Canada, 1996).

Les concentrations les plus faibles de cadmium dans les sols pour lesquelles des effets phytotoxiques ont été observés sont de 2,5 et 4 mg.kg⁻¹. Ces concentrations ont produit une réduction de 21% de la récolte de blé (Haghiri, 1973 cité par CCME, 1999), une réduction de 14% de la récolte de fèves Soya (Haghiri, 1973 cité par CCME, 1999), une réduction de 25% de la production de pousses d'épinards (Bingham et coll., 1975 cité par CCME, 1975) et une réduction de 28% de la croissance des pousses de maïs (Miller et coll., 1977 cité par CCME, 1999). La littérature scientifique révèle qu'une variété d'indicateurs de croissance sont réduits de 25% à des concentrations allant de 4 à >640 mg.kg⁻¹. Des réductions de 50% de certains indicateurs de croissance surviennent à des concentrations allant de 16 à 205 mg.kg⁻¹.

2.3.3.3.2 Le plomb :

Le plomb est considéré comme un élément non essentiel pour les plantes, bien que certaines études ont démontré un effet de stimulation sur la croissance à de faibles concentrations (Nakos, 1979 ; Muramoto et coll., 1990 ; Balba et coll., 1991 cités par CCME, 1999). En général, dans la plupart des études, des effets nocifs significatifs n'ont été observés chez les plantes qu'à des concentrations élevées de plomb (Pahlsson, 1989 cité). Les symptômes visibles de la toxicité du plomb comprennent des feuilles plus petites, des feuilles chlorotiques et rougeâtres avec nécrose, des racines courtes noirâtres et une croissance réduite (Pahlsson, 1989). De plus, les plantes exposées montrent généralement des taux de photosynthèse et de transpiration diminuant avec l'augmentation des concentrations de plomb. Bazzaz et coll. (1974) cité par CCME (1999) suggèrent que ces réponses sont reliées à des changements de la résistance des stomates au CO₂ et la diffusion d'eau. Il a aussi été démontré que les ions de plomb inhibent la synthèse de la chlorophylle, induisant des teneurs réduites en chlorophylle. Ainsi, la diminution de la photosynthèse pourrait être en partie reliée aux teneurs réduites des feuilles en chlorophylle (Pahlsson, 1989).

Les taux d'absorption et d'accumulation du plomb varient entre les espèces et à l'intérieur d'une même espèce et semblent être influencés davantage par le pH que par toute autre propriété du sol. Seiler et Paganelli (1987) ont observé une toxicité sensiblement élevée du plomb chez les épinettes rouges (*Picea rubens*) due à la biodisponibilité accrue du plomb produite par les conditions de pH faibles. Allinson et Dzialo, 1981 cité par CCME (1999) ont noté que l'ivraie (*Lolium hybridum*) et l'avoine (*Avena sativa*) contenaient des

concentrations de plomb significativement plus élevées, après trois mois de croissance, dans un sol à pH de 4,5 que dans un sol à pH de 6,4. Les FBC du plomb pour la plupart des plantes varient typiquement de 0,001 à 0,03 (Jones et Johnston, 1991). Le MEO (1992) cité a adopté un FBC sol-à-plante général de 0,039 pour les fruits et les légumes communs des jardins.

Hassett et coll. (1976) cité par CCME (1999) ont observé une réduction de 19% de l'allongement des racines de maïs à une concentration en plomb du sol de 250 mg.kg⁻¹ et aucun effet à 100 mg.kg⁻¹. Le poids sec des pousses de maïs a été réduit de 13 à 29% à une concentration en plomb du sol de 125 mg.kg⁻¹ (Miller et coll., 1977 cité par CCME, 1999). Une diminution significative de 11% dans le rendement en poids sec des oignons a été observée à 50 mg.kg⁻¹, alors qu'une concentration de 400 mg.kg⁻¹ était nécessaire pour réduire de 20% le rendement en poids sec du fenugrec (Dang et coll., 1990). Les biomasses radiculaires de l'avoine et du blé étaient réduites en présence de 500 mg.kg⁻¹ (Khan et Frankland, 1984 cité par CCME, 1999).

Environnement Canada (1995)) a rapporté des valeurs respectives de 421 ; 974 ; 833 et 1236 mg.kg⁻¹ de plomb dans le sol pour la CSEO, la CMEO, la CE₂₅, et la CE₅₀ relatives à l'émergence des semis de radis (*Raphanus sativa*). Pour l'émergence des semis de laitue (*Lactuca sativa*), les valeurs de CSEO, CMEO, CE₂₅ et CE₅₀ étaient de 416 ; 740 ; 667 et 876 mg.kg⁻¹ de plomb, respectivement.

Seiler et Paganelli (1987) ont observé une réduction de 38 à 45% du poids sec des racines et des pousses d'épinette rouge, de même que de la hauteur des plants, à une concentration en plomb du sol de 150,1 mg.kg⁻¹, alors qu'une réduction de 30% de la photosynthèse fut observée à 271,1 mg.kg⁻¹. D'autres parts le pin blanc montrait une réduction de taille et de poids sec des racines et des pousses à 1179 mg.kg⁻¹ de plomb dans le sol, alors que la photosynthèse n'était pas affectée.

2.3.3.3 Le cuivre :

La concentration la plus faible de cuivre dans le sol pour laquelle des effets phytotoxiques ont été observés est de 50 mg.kg⁻¹ de sol sec ; il en résulte une diminution de 18% de l'allongement des radicules du bouleau blanc (*Betula papyrifera*). Aucun effet n'a été enregistré sur le pin blanc (*Pinus strobus*), l'épinette blanche (*Picea glauca*) et le pin rouge (*Pinus resinosa*) lorsqu'ils ont été exposés à une concentration en cuivre de 50 mg.kg⁻¹ de

sol sec (Patterson et Olson, 1982 cité par CCME, 1999). Les symptômes typiques de la toxicité du cuivre chez les plantes incluent l'apparition de feuillage vert foncé suivie par l'induction d'une chlorose ferrique, des racines épaisses, courtes ou barbelées et un enracinement réduit (Kabata-Pendias et Pendias, 1991). Le cuivre ne se bio accumule qu'à un faible degré. Un FBC sol-à-plante de 0,2645 a été calculé à partir de données sur plusieurs espèces de plantes (CCME, 1997).

2.3.3.3.4 Le zinc :

La concentration la plus faible de zinc pouvant provoquer des effets phyto toxiques est de 50 mg.kg⁻¹ de sol sec, ce qui a entraîné une diminution de 50% de la production de graines de navet (*Brassica rapa*), à un pH de 6,3 (Sheppard et coll., 1993)

Des symptômes communs de la toxicité au zinc sont les chloroses, particulièrement aux jeunes feuilles, et la croissance réduite de la plante (Kabata-Pendias & pendias, 1992). Le zinc réagit avec d'autres produits chimiques dans le sol. Les niveaux de fer dans les tissus végétaux diminuent significativement en présence d'un excédent de zinc dans le sol, alors qu'un excédent de phosphore dans le sol induit une déficience en zinc dans les plantes (Kabata-Pendias & Pendias, 1992)

2.3.3.3.5 Effets de l'interaction Cd, Pb, Cu et Zn sur les végétaux :

Dans le sol et les solutions du sol, les plantes sont simultanément exposées à divers éléments et facteurs qui peuvent interagir de différentes manières. Donc, les effets de l'interaction peuvent différer de ceux obtenus, lorsque chacun des éléments ou facteurs agit seul (Pahlsson, 1989).

L'interaction entre éléments survient naturellement dans les sols et plantes. Souvent, ses effets sont antagonistes, ce qui signifie que les effets combinés de deux éléments ou plus sont moindres que la somme des effets singuliers relatifs à chaque élément. Dans ce sens, un excès en macronutriments tels que le Ca, P et Mg peuvent interférer avec les micronutriments. D'autre part, un ou plusieurs éléments traces peuvent avoir un impact sur l'assimilation et le métabolisme de macronutriments ou d'autres éléments traces dans les plantes. Ceci est d'autant plus envisageable lorsque le sol présente un déséquilibre chimique comme c'est le cas des sols contaminés par les éléments traces.

Il arrive aussi que les effets de l'interaction des éléments traces soit égale ou supérieure à la somme des effets singuliers de chaque éléments, ses effets d'interaction sont alors respectivement qualifiés d'effets « cumulés » et « synergétiques».

Bien que les interactions entre les éléments traces soient communément observées, elles restent complexes et contradictoires. Lors de traitement avec le cadmium de plusieurs espèces végétales, il a été noté une augmentation de l'absorption et de la concentration en zinc dans les pousses végétales (Turner, 1973 cité par Pahlsson, 1989). D'autre part, l'augmentation de la concentration en cadmium dans le maïs (*Zea mays*) est accompagnée d'une diminution de la concentration en zinc (Root et al., 1975 cité par Pahlsson, 1989). Cependant, il a été démontré que les effets soient dépendant de la teneur en métal et du pH du milieu de croissance. Donc, avec des teneurs faibles en zinc et un pH bas, la concentration en zinc dans les feuilles d'haricot (*Phaseolus vulgaris*) n'était pas affectée par le cadmium, alors que des teneurs élevées en zinc et cadmium diminuent significativement la concentration en zinc des feuilles. Les interactions entre le cadmium et le cuivre chez l'orge (*Hordeum vulgare*) étaient quelques peu similaire (Wallace et al. 1977 cité par Pahlsson, 1989). Dans une autre étude, le taux de zinc n'était que légèrement affecté par le cuivre, et inversement (Beckett et Davis, 1978 cité par Pahlsson, 1989).

Une interaction positive a été souvent rapportée entre le plomb et le cadmium. Chez le maïs (*Zea mays*), le plomb a augmenté l'absorption du cadmium, alors qu'à l'inverse, le cadmium réduisait l'absorption du plomb (Miller., 1977 cité par Pahlsson, 1989). De plus, il a été démontré qu'une combinaison de plomb et de cadmium présentait un effet synergétique inhibiteur de la croissance des racines (Hasset et al. 1976 cité par Pahlsson, 1989). Des effets similaires ont été rapportés pour le Platane d'Amérique (*Platanus occidentalis*) (Carlson et Bazzaz, 1977 cité par Pahlsson, 1989). La croissance des racines, tiges et feuilles était diminuée par l'effet synergétique du plomb et cadmium. Néanmoins, la photosynthèse ainsi que la transpiration n'étaient pas affectées. L'addition de cadmium aux plantes traitées préalablement au plomb n'a pas réduit d'avantage les taux de photosynthèse et de transpiration (Phalsson, 1989).

Donc, les effets de l'interaction peuvent différer, selon le paramètre mesuré dans la plante ou encore selon l'organe, l'espèce et le sol tel que démontré par Miles et Parker (1979) cités par Pahlsson (1989), et bien que des évidences de synergie et d'antagonisme aient été observées, ceci ne peut être démontré de manière concluante (Pahlsson, 1989).

Chapitre 02

Présentation de la zone d'étude

1. Présentation de l'environnement physique :

1.1. Implantation générale :

Le complexe GEA (Gassi El Agreb) est situé par environ 31 degrés de latitude nord et environ cinq degrés et 30 minutes de longitude est, dans le nord du Sahara algérien, à environ 700 kilomètres au sud d'Alger, 180 kilomètres au sud-ouest de Ouargla et une centaine de kilomètres au sud de Hassi Messaoud dans le secteur administratif de la wilaya de Ouargla.

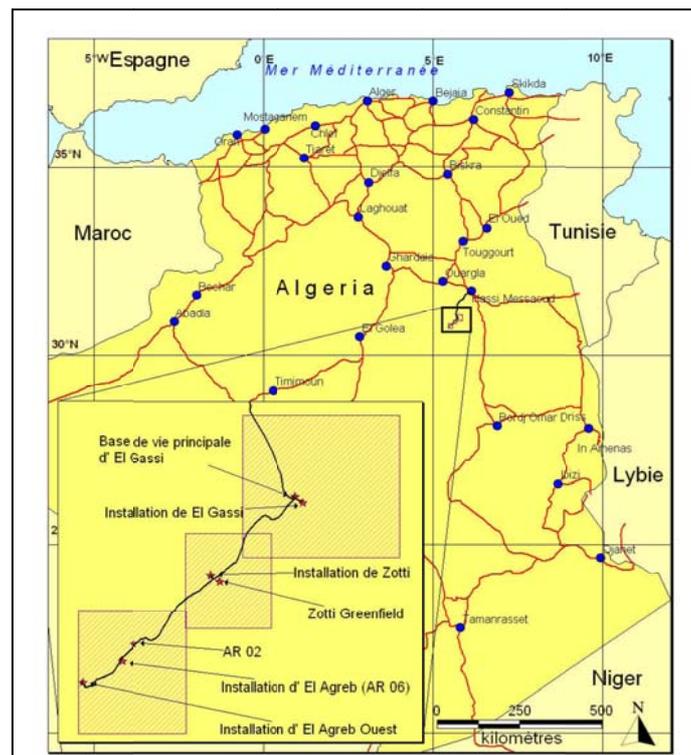


Figure 07. Localisation du complexe GEA

L'ensemble de GEA s'étend sur un axe nord est – sud-ouest d'une quarantaine de kilomètres, avec les trois champs de Gassi, Zotti et El Agreb s'étendant chacun sur une trentaine de kilomètres carrés plus ou moins centrés sur les installations de traitement.

1.2. Géomorphologie et géologie superficielle :

Le complexe GEA est situé en bordure ouest du Grand Erg Oriental, une vaste mer de sable d'une surface de 150 000 kilomètres carrés s'étendant entre le vingt neuvième et le trente troisième parallèles, et à l'est au-delà de la frontière tunisienne. Si le grand erg oriental est remarquable pour ses champs de dunes, la zone du complexe GEA est plutôt constituée d'une vaste plaine de colcrete et de gypse, parsemée d'occasionnelles

formations dunaires. L'altitude générale de la zone varie entre 160 et 200 mètres, sans relief notable excepté pour de rares dunes.

1.2.1 Recouvrement sableux :

Bien que le complexe GEA soit situé hors de la mer de sable du Grand Erg Oriental, le sable est un matériau de recouvrement omniprésent. Les formes de dunes et la relative variabilité de la direction des vents suggèrent que leurs emplacements soient relativement fixes. Le transport du sable par le vent pouvant provoquer des modifications de morphologie mais non de position. Si des accumulations localisées de sable sur des périodes courtes sont visibles (par exemple sur la route près de dunes, ou par l'ensablement de plates-formes de puits), les mouvements de sables restent limités et les quelques formations dunaires sur le site ne sont pas considérées comme très mobiles.

Les plus grands phénomènes de transport se produisent lors de la saison des vents de sable, à l'automne et au printemps, quand des vents pouvant atteindre plus de 60 kilomètres par heure et persistant sur plusieurs jours transportent de fortes quantités de sable éolien. Dans la zone du site, les vents de sable soufflent principalement du sud-ouest.

Les formations sableuses sur le complexe GEA comprennent des grains de quartz jaunes à oranges, arrondis, de granulométrie moyenne à fine. Des grains de sable plus grossiers et de couleur plus sombre prédominent sur les zones planes et en recouvrement occasionnel des plaines de calcrete, ainsi qu'à la base des formations dunaires.

1.2.2 Morphologie du complexe GEA :

Aucun réseau hydrographique, notamment ancien, n'est évident sur la zone de GEA. Seules les dépressions locales plus ou moins gypseuses (« pan plains ») témoignent de l'accumulation locale, actuelle ou passée, d'eau de ruissellement. Localement, des terrasses et dômes surélevés sont notables, mais les changements abrupts de relief restent rares et les écarts d'élévation ne dépassent pas l'ordre de la dizaine de mètres.

Vers le nord, le long du tracé des pipelines reliant GEA à Hassi Messaoud, le paysage gagne en relief, la plaine calcrete étant graduellement entrecoupée par un des réseaux

hydrographiques anciens. A partir d'une trentaine de kilomètres au nord de GEA, apparaissent ainsi une succession de dépressions, alternant avec des affleurements de calcrete en fore de mesas (relief tabulaire), les zones de plus faible élévation montrant des accumulations de sables éolien (figure 08). Les vallées entrecoupant le paysage de calcrete témoignent des parcours d'anciens oueds, à présent inactifs faute de précipitations suffisantes ; les dépressions sont recouvertes de sable et les lits des anciens cours d'eau ont disparu.

A partir du kilomètre 60 au nord de GEA, les pipelines entrent dans le champs de Hassi Messaoud, vaste zone sillonnée de pipelines, parsemée de puits de pétrole et de carrières de gypse, et marquée par d'abondance traces de passage et d'activité de véhicules (travaux de déblaiement, traces d'études sismiques passées, de transfert de chantiers de forage, ou de simple circulation de routine sur le champs).



Figure 08. Résumé de la géomorphologie le long du tracé des pipelines (Source : RBA, 2005)

1.2.3 Lithologie sous-jacente :

Le Grand Erg Oriental repose sur un bassin sédimentaire atteignant plus de trois kilomètres, dominées par des formations clastiques (grès et schiste), intercalées alternant avec des horizons carbonatés et des évaporites. Schématiquement, la lithologie de la zone est caractérisée par la succession suivante applicable à la région du Grand Erg Oriental :

- Des formations de recouvrement du mi-Pliocène sur plusieurs mètres à des dizaines de mètres (sable, calcaire)
- Les formations carbonatées du toit du crétacé supérieur (Sénonien) surplombant des niveaux évaporitiques puis gréseux (base du Sénonien), puis des niveaux calcaires argileux (Turonien et toit du Cénomaniens), entre une centaine de mètres et plusieurs centaines de mètres d'épaisseur.
- Entre environ 1000 ou 1500 et environ 2000 mètres de profondeur, une large épaisseur de grès du Crétacé moyen (base du Sénonien et toit de l'albien) puis de grès argileux du Crétacé inférieur (Aptien, Barrémien, Néocomien)
- Des formations du Jurassique marin à dominance gréseuse et argilo gréseuse (Malm, Dogger, Lias)
- Le trias, dominé au toit par des formations d'anhydrite et développant des formations argilo gréseuses, reposant en discordance sur les grès argileux du Dévonien supérieur, l'ensemble constituant le toit des gisements d'hydrocarbures exploités sur le complexe GEA.

1.3 Hydrologie et hydrogéologie :

1.3.1 Précipitation et eaux superficielles :

1.3.1.1 Précipitations :

La zone du complexe GEA est située bien en deçà de l'isohyète des 100 millimètres, seuil de définition du climat désertique. Les précipitations sont rares. Les données pluviométriques disponibles pour la région de Hassi Messaoud suggèrent (tableau 02):

Tableau 02 : Données pluviométriques pour Hassi Messaoud 1993-2003 (ONM, 2005)

(mm)	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total Annuel	Moyenne mensuelle
1993	0	7,9	0	-	0	0	0	0	0	-	8,1	5	21	1,75
1994	5,6	0	28,8	0	6	1	0	-	7	15,3	3,2	2,8	69,7	5,8
1995	<1	0	5	<1	3	0	0	0	13	3	3	3	30	2,5
1996	10	2	12	1	1	0	0	0	0	0	0	0	26	2,2
1997	2	6	0	3	0	0	0	<1	7	1	2	<1	21	1,75
1998	0	0	0	0	7	1	0	0	0	0	0	6	14	1,2
2000	0	0	0	1	22	0	0	0	0	15	0	0	38	3,2
2001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2002	0	0	0	0	3	0	0	-	-	20	2	-	25	2,1
2003	2	0	7	0	1	0	0	0	8	6	4	0	28	2,3
Moyenne interannuelle	2	1,6	5,3	0,5	4,3	0,2	0	0	3,5	6	2,2	1,7	27,3	2,3

- L'existence d'une saison sèche marquée entre juin et aout ;
- En dehors de la saison sèche, une variabilité inter mensuelle marquée, montrant des précipitations sporadiques et dispersées entre le moi de septembre et mai ;
- Une forte variabilité interannuelle, cette variabilité se retrouve dans l'intensité des évènements pluvieux, pouvant être limités à de très faibles et courtes précipitations, tout en étant parfois intense, en 2012 et 2013 par exemple, nous avons assisté à des séquences pluvieuses intenses et continues sur 48 et 72 heures.

1.3.1.2 Eaux superficielles :

Compte tenu de la faiblesse des précipitations, l'eau météorique tend à s'infiltrer avant la mise en place de phénomènes de ruissellement. Les indices de ruissellement visibles dans la région sont liés à des phénomènes anciens caractérisant les périodes les plus arrosées du Sahara. Sur la zone du complexe GEA, les seuls indices de ruissellement passé sont d'occasionnelles de pressions (« pan plains ») formées par l'accumulation locale passée d'eau de ruissellement. En direction de Hassi Messaoud, le long du tracé de pipelines, le paysage se développe en dépressions plus accentuées creusées par le ruissellement d'anciens oueds dans la plaine de calcrete, bordées de relief tabulaire (mesas). Ces dépressions sont alignées selon un axe général sud-est – nord-ouest, et se développent à

l'approche de Hassi messaoud en une plaine de calcrete parsemée d'occasionnelles mesas. Compte tenu de la faiblesse des pluies dans la région, aucun des oueds à l'origine de ce relief n'est actif, les dépressions formées sont recouvertes d'un occasionnel matériau de pente et de sable.

1.3.2 Eaux souterraines :

Les aquifères de la séquence sédimentaire du Sahara se développent principalement dans les séquences de grès, mais aussi dans les dolomites et les calcaires fracturés. Des dépôts de faible conductibilité hydraulique (argiles, schiste, évaporites) forment des aquicludes entre les aquifères, à l'instar des couvertures des gisements d'hydrocarbures.

Les deux unités aquifères les plus importantes du Sahara septentrional sont les séquences carbonatées et gréseuses du tertiaire (Complexe Terminal) et du mésozoïque (Continental Intercalaire) (figure09). D'autres niveaux aquifères existent avec des moindres capacités (grès et carbonates confinés) et des eaux de qualité médiocre (gisement salins au voisinage d'évaporites).

1.3.2.1 Système aquifère peu profond du tertiaire (Complexe Terminal):

L'aquifère du Complexe Terminal est peu profond (à 100 mètres ou plus dans la zone d'étude, et partiellement confiné par des intercalations gypseuses ou argileuse. Il se développe principalement de formations tertiaires (Moi-Pliocène, Eocène) jusque dans les niveaux carbonatés du Crétacé supérieur (Sénonien) au-dessus des niveaux évaporitiques de la base du Sénonien. Cet aquifère fourni l'eau des puits traditionnels dans cette région du Grand Erg Oriental, et il est exploité par les compagnies pétrolières pour subvenir aux besoins en eau industrielle et de lavage, d'irrigation, et parfois pour l'eau potable. On inclut en outre dans le Complexe Terminal les séries aquifères du Turonien (Crétacé supérieur), qui représentent le système aux affleurements du crétacé à l'ouest du Grand Erg oriental le long de la dorsale du M'Zab.

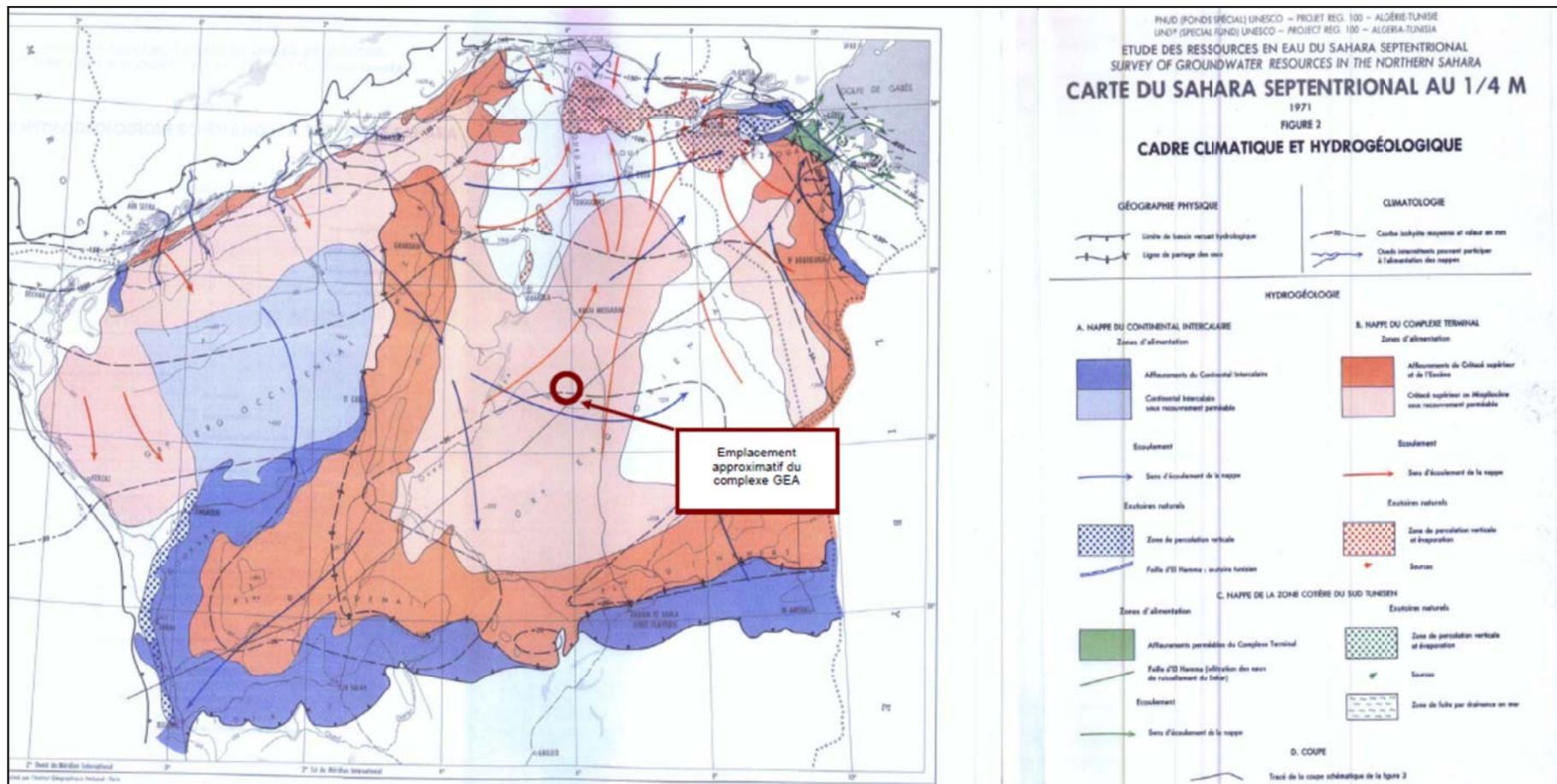


Figure 09 : Etendue et écoulement général des aquifères du Sahara septentrional

Le Complexe Terminal affleure sous les formations de recouvrement du Grand Erg Oriental et s'étend sur environ 350 000 kilomètres carré jusqu'aux marges du bassin du Sahara Septentrional, où elles finissent de disparaître du fait de phénomènes de plissement et d'érosion. Dans la plus grande partie du bassin, il est à surface libre, et de ce fait les zones de recharge sont étendues, l'eau météorique étant, lors des rares averses, filtrées à travers les formations superficielles. L'eau du Complexe Terminal s'écoule généralement vers le nord avec un exutoire dans les chotts (zones humides) bordant au nord le bassin du Sahara.

Les réserves totales de l'aquifère sont estimées à 10 000 kilomètres cubes, avec une recharge d'environ 0,5 Kilomètre cube par an. Recharge et abstraction s'équilibraient vers le milieu du XX^{ème} siècle. Une extrapolation des taux d'abstraction pour la situation a conduit à estimer les prélèvements totaux à environ 0,25 kilomètre cube par an, soit la moitié de la recharge naturelle annuelle du système ; la tendance est à une augmentation des prélèvements et leur intensification dans des zones déterminées (zones pétrolières en particulier) induisant un risque de créer des déséquilibres locaux ou régionaux.

L'eau du Complexe Terminal est exploitée sur la zone du complexe GEA au moyen de puits forés à différentes périodes depuis le développement des champs. Ces puits fournissent l'eau au fons d'usage domestique (eau de consommation, irrigation) et industriel. (eau de service, lavage, lutte anti-incendie, eau de dilution)

1.3.2.2 Système aquifère profond du Continental Intercalaire :

Le système aquifère du Continental Intercalaire est principalement représenté par les séries gréseuses de l'Albien à une profondeur supérieure à 1000 mètres, avec une continuité dans la base du Cénomaniens, ainsi que dans les grès argileux sous-jacents du Barrémien et du Néocomien. Le toit du système est constitué par les séries argileuses de la base du Turonien et du toit du Cénomaniens, et sa base par les argiles du Jurassique supérieur (Malm). Ce système est géologiquement comparable aux aquifères similaires que l'on trouve en Lybie et en Egypte (l'aquifère Nubien) et au Moyen-Orient.

La série albienne est considérée comme l'une des couches aquifères les plus importantes dans le Continental Intercalaire. Elle est formée de grès datant d'environ 90 millions d'années, alternant parfois, sur environ 150 mètres de puissance totale, avec des schistes imperméables. Du fait de l'absence de niveaux évaporitiques, l'eau de cet aquifère est relativement peu saline.

L'aquifère Albien est en surpression. Il est important de procéder avec beaucoup de soin lorsqu'on fore à travers la couche aquifère, afin de réduire les risques de contamination des eaux souterraines, et l'équipement du puits doit fournir une protection efficace de l'aquifère durant la production.

Le Continental Intercalaire affleure le long des franges méridionales et occidentales du bassin du Sahara Septentrionale, où il est notamment exploité par le système traditionnel des foggaras, anciennes galeries souterraines de captage et de transport d'eau s'étendant sur des distances de plusieurs dizaines de kilomètres pour alimenter des oasis. Les principaux secteurs de recharge sont les affleurements situés sur les plateaux du sud et du sud-est, et sous les sables de la bordure méridionale du Grand Erg Occidental, où il peut y avoir une recharge limitée et sporadique. Les principaux exutoires comprennent les chotts au nord et des sources dans les environs de Gabès en Tunisie.

Le système aquifère du Continental Intercalaire s'étend sur une superficie estimée à 600 000 kilomètres carrés. La porosité effective de l'aquifère a été estimée à 20%. Le volume total d'eau stocké dans la seule série albienne dépasse les 20 000 kilomètres cubes. La recharge annuelle moyenne du système est de l'ordre de 0,25 kilomètres cube. La vitesse d'écoulement de l'eau de l'aquifère est réduite et on peut considérer que l'eau rencontrée dans la région GEA est une eau fossile.

Avant la mise en œuvre de puits d'exploitation du système aquifère du Continental Intercalaire, autrefois très réduite du fait de la profondeur des formations, le système était estimé être en recharge nette. Les études suggèrent qu'avec l'accroissement des prélèvements au XX^{ème} siècle, prélèvements et recharge s'équilibraient dans les années cinquante, pour évoluer vers un déficit des recharges de 50 pour cent en 1970. A l'heure actuelle, le système est perçu comme clairement en déséquilibre, bien que l'abondance des réserves réduise largement la perception des effets locaux (rabattement potentiel de nappes à l'affleurement, notamment).

1.3.2.3 Aquifère du Jurassique :

Les séries marnes argilo-gréseuses du Jurassique (Malm, Dogger) produisent une eau relativement saline, exploitée à partir de puits profonds (plus de 1500 mètres) comme eau d'injection sur le complexe GEA.

1.4. Climat et météorologie :

1.4.1. Climat

On définit comme limite septentrionale au désert, l'isohyète des 100 millimètres en précipitation annuelle, le complexe GEA se trouve au sud de l'isohyète des 50 millimètres. Dans cette zone, les mois de juin, juillet et août sont les plus chauds, ceux de décembre et février sont les plus froids (figure 10).

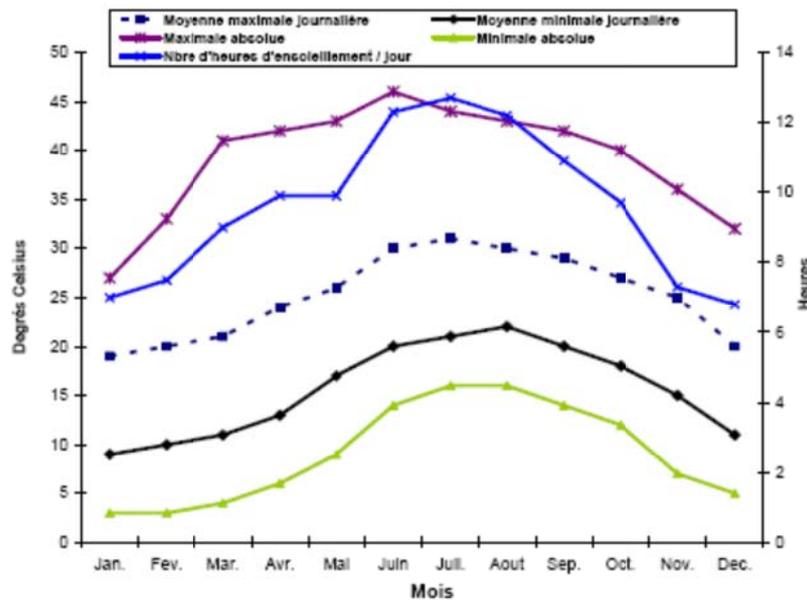


Figure 10 : température et ensoleillement du Sahara septentrional (Cloudsley-Thompson, 1984)

A l'instar de grandes parties du désert, la zone d'étude connaît des températures moyennes en juillet dépassant 37°C ; des pointes au-delà de 43 °C peuvent se produire pendant plusieurs jours consécutifs. En raison de la faible nébulosité et de la faible hygrométrie, les températures peuvent varier de plus de 27 °C en 24 heures. Les maximales diurnes en hivers approchent 16 °C, tandis que les minimales nocturnes peuvent descendre autour de 0°C.

1.4.2. Météorologie :

La zone d'étude est caractérisée par une vitesse de vent moyenne allant de 3 à 4 m/s (Figure 11).

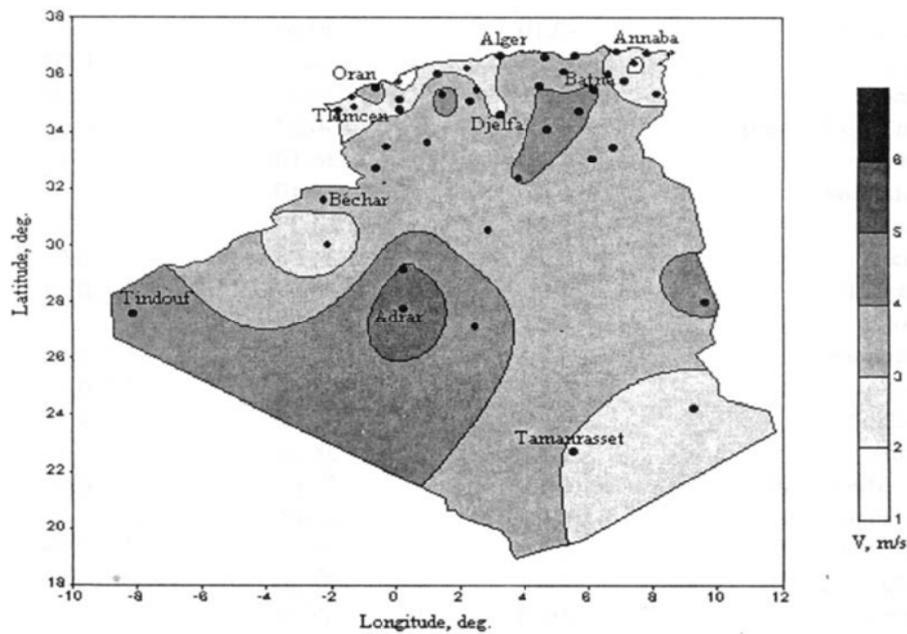


Figure 11 : Tracé de la carte des vents à 10 mètres d'altitude en Algérie (source : ATLAS Vent ONM).

Au printemps et en automne, des vents de sable violents se produisent, pouvant soulever jusqu'à 50 grammes de poussière par mètre cube d'air à une hauteur de 0,6 mètre. Les vents de sable sont le plus souvent des vents d'ouest ou de sud-ouest. La figure 12 illustre la vitesse moyenne du vent et son orientation prédominante dans la région.

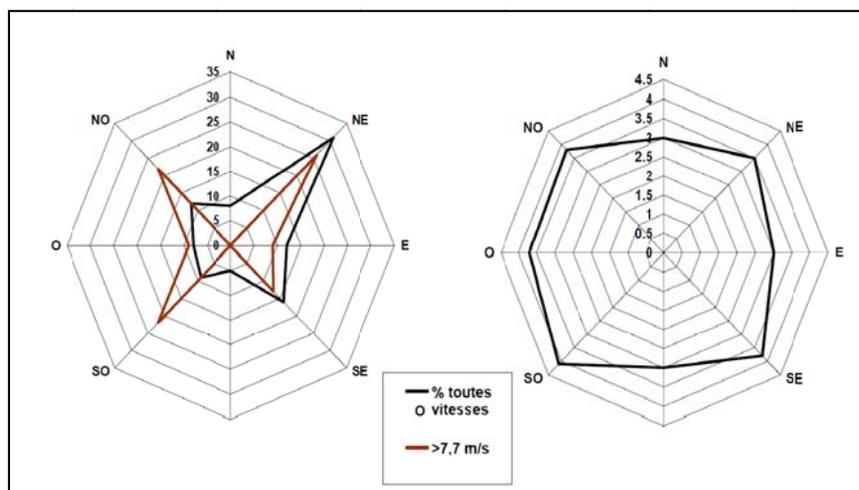


Figure 12 : Sens et direction du vent (par vitesse et par fréquence)

2. Présentation de l'environnement biologique :

2.1. Flore :

2.1.1. Flore saharienne :

La production primaire saharienne est directement proportionnelle à l'abondance des précipitations avec en règle générale un couvert végétal très peu dense. On compte environ 1 620 espèces de plantes dans le Sahara, dont environ 200 sont endémiques. Les genres endémiques sont peu nombreux et mono-spécifiques. On compte trois zones floristiques principales dans le désert du Sahara : Dans le nord, la flore montre une grande affinité avec la flore méditerranéenne ; au sud, l'influence des tropiques est prépondérante (végétation sahélienne), et entre les deux se trouve une zone mixte. Les transitions floristiques du nord et du sud du désert sont, respectivement, le Maghreb et le Sahel, zones arides mais plus arrosées et soutenant une activité biologique et humaine bien plus dense.

La zone du complexe GEA se trouve dans la zone d'endémisme saharo-sindienne ouest, qui couvre l'ensemble du Sahara septentrional, des franges côtières atlantiques et méditerranéennes et l'ouest du désert libyen. Les ergs sahariens sont en général presque dépouillés de couvert végétal, bien que certaines dunes puissent être couvertes plus que de moitié par une végétation très peu diverse.

Les étendues planes de calcrete et de gypse, fournissant des substrats rocheux, sont en général peu végétalisées, à l'exception des zones abritées et/ou montrant un léger recouvrement sableux (pied de dunes, points bas).

2.1.2. Flore sur la zone du complexe GEA :

L'ensemble du complexe GEA est extrêmement peu végétalisé. Les étendues de plaine de calcrete sont arides et littéralement dénudées, sauf pour d'exceptionnelles touffes d'herbe à plumeau *Aristidaplumosa*, légèrement plus abondantes dans les zones abritées et à recouvrement sableux (pieds des dunes, points bas ensablés). Des pieds ligneux secs ont été identifiés comme probablement des pieds de *Ephedraspp*. Broutés par des chameaux et desséchés.

En remontant vers le nord le long du pipeline la végétation devient plus abondante, principalement :

Un assemblage des arbustes *Ephedraspp.* Et *Calligonumspp.* En association avec les herbes *Stipagrostispungens* et *Aristidaplumosa*, rencontrés surtout sur substrat sableux à l'abri de formations dunaires ou dans des points bas, avec une densité variant d'une plante tous les cinq à dix mètres. *Cornulaccamonocantha* était absent des assemblages observés, mais cet arbuste très ubiquitaire dans le Sahara septentrional est probablement présent même en petites quantités ; des colonies de genêt *Retamaretam*, essentiellement sur substrat de calcrete nu ou très peu recouvert de sable, avec une densité d'une plante tous les huit mètres environ.

Quant au périmètre immédiat des installations, la densité de végétation est minime à nulle. La présence végétale se limite à l'espèce *Oudneya africana*, notamment près des points d'eau de consommation et des bassins d'évaporation.

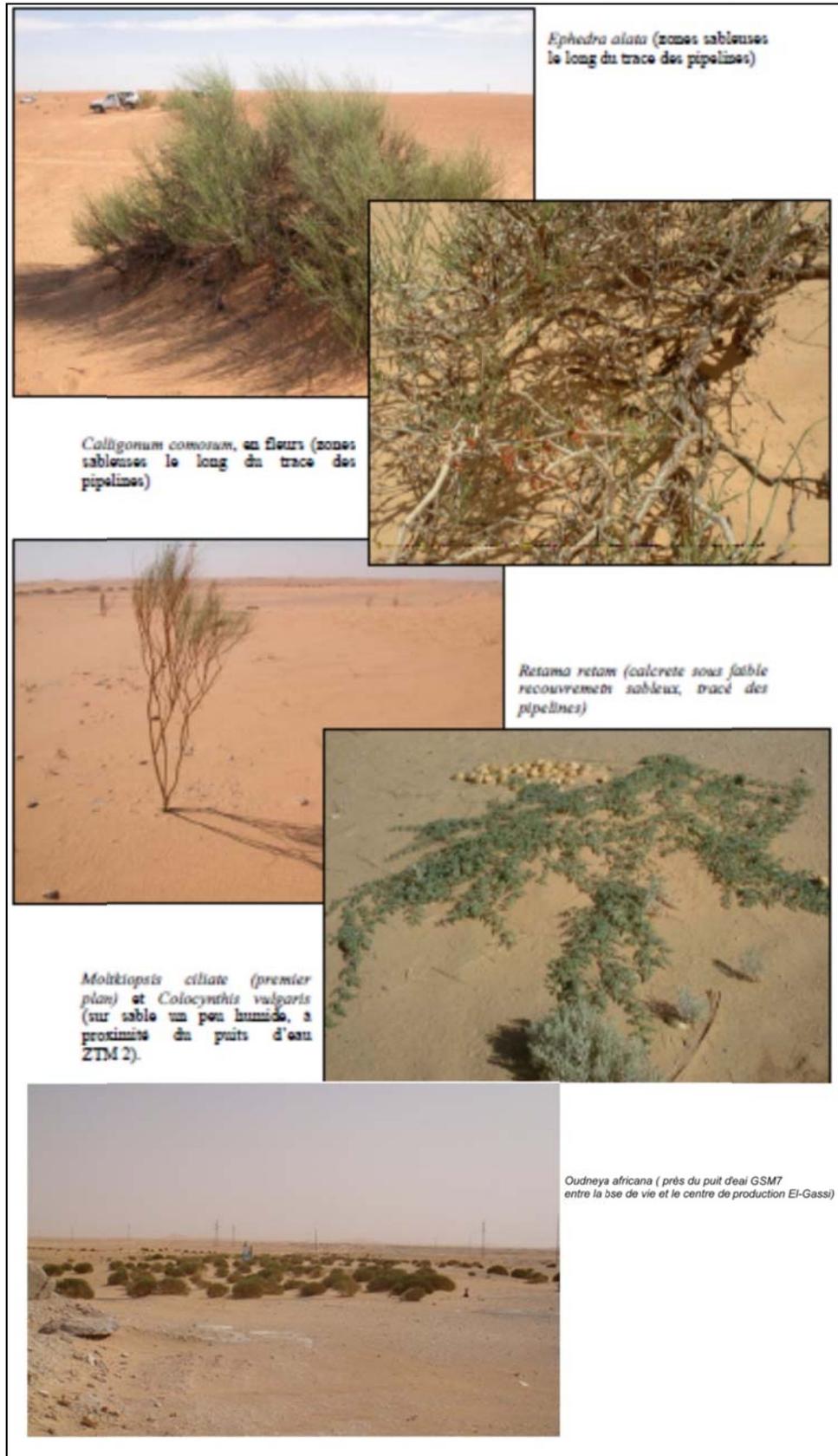


Figure 13 : Flore observée au niveau du complexe GEA

2.2. Faune :

Le Sahara est pauvre en espèces animales, et leur densité diminue vers la zone centrale du désert. La nature sporadique des pluies a conduit les animaux à des adaptations stratégiques. Les plus gros mammifères ont tendance à rester aux marges du désert et ne s'aventurer dans l'erg qu'en période humide. Les petits animaux sont moins mobiles et restent sur place toute l'année, mais se protègent de la chaleur en s'enfouissant, profitant de températures et d'une humidité relative plus favorables à leur régulation thermique et à la conservation de l'eau.

Pour beaucoup d'espèces, la marge entre le succès et l'échec est étroite du fait que chacun vit à la limite de ses limites physiologiques. De ce fait, des perturbations de cet état d'équilibre peuvent avoir des conséquences sérieuses sur ces espèces. Les grands ongulés (oryx, addax, gazelle), autrefois relativement nombreux dans le Sahara, ont été chassés jusqu'au bord de l'extinction, ou délogés par des herbivores domestiques (ovins, caprins, chameaux). Les prédateurs à de plus hauts niveaux trophiques ne peuvent subsister que lorsque la production primaire est capable de soutenir les maillons trophiques moins élevés. La plupart des mammifères sont nocturnes ou crépusculaires, donc rarement visibles.

2.2.1. Mammifères :

2.2.1.1. Généralités :

De nombreuses espèces de rongeurs adaptés aux conditions désertiques sont caractéristiques du Sahara – telles la gerboise, la gerbille, certaines espèces de mulot. Tous sont essentiellement nocturnes, et pendant la journée s'abritent de la chaleur en s'enfouissant. Jusqu'à 40 espèces de rongeurs, tous genres confondus, sont répertoriés dans le Sahara, comprenant notamment dans la famille des *Gerbillidées* les genres *Gerbillus*, *Desmodillus*, *Meriones*, *Pachyuromys*, *Psammomys*, *Sekeetamys*, *Tatera* et *Taterillus* (ces deux derniers ne se trouvant qu'au marges du Sahara méridional). Tous sont caractérisés par une robe sable ou brune, un ventre clair, une longue queue souvent terminée par un fouet et de grands yeux. Les gerboises (Dipodidées, en particulier *Jaculus* spp.) sont les seuls rongeurs bipèdes du Sahara et sont capables de vivre plusieurs mois sans eau en couvrant ses besoins en eau par l'humidité de son alimentation (herbes, graines).

Parmi les insectivores le hérisson (*Erinaceus*, *Hemiechinus* et *Paraechinus*) est répandu dans les zones d'abondance de nourriture.

Parmi les carnivores, sont représentés deux espèces de renards (le fennec *Fennecus zerda* et le renard de Rüppell ou renard famélique *Vulpes rueppelli*), communs à travers le Sahara, la belette (Mustelidées, genres *Ictonyx* et *Poecilictis*), la fouine (famille des Viverridés, genre des *Genetta*), la mangouste (*Herpestes*), ces trois derniers étant limités aux marges du Sahara. On recense également trois espèces de chats, dont essentiellement dans l'erg Saharien le chat des sables *Felis margarita*, essentiellement nocturne et vivant en terriers. Enfin, cinq espèces de chauves-souris sont présentes dans le Sahara dans des habitats sylvestres et rocheux, hors des zones d'erg.

Les grands mammifères sont rares, en raison de pratiques de chasse de subsistance mais surtout sportive – constat particulièrement sévère pour l'addax *Addax nasomaculatus*, éteint dans le Sahara algérien et ne survivant plus qu'en petits nombres de la Mauritanie au Soudan. Le mouflon à manchettes *Ammodorcas leervia* est présent surtout dans les zones rocailleuses, les plateaux et les steppes du Sahara et des franges sahariennes. Enfin, quatre espèces de gazelles: la gazelle de l'Atlas *Gazella cuvierii*, la gazelle dama *G. dama*, la gazelle dorcas *G. dorcas* et la gazelle léptocère (ou rhim) *G. leptocerus* fréquentent le Sahara algérien, les deux dernières étant plus particulièrement présentes dans les ergs hyperarides tandis que les deux premières restent limitées aux marges du désert.

Le Dromadaire (*Camelus dromaderius*) n'est pas autochtone des ergs sahariens, domestiqué par les populations nomades du Sahara, il est omniprésent et adapté à la survie dans des climats hyperarides. Enfin, sont présents près de zones de peuplement humain des troupeaux d'ovins, de caprins, des ânes et des chiens.

2.2.1.2. Zone du complexe GEA :

Aucune observation de mammifère sauvage n'a pu être réalisée au cours de l'étude de terrain réalisée sur le complexe GEA en mai 2005, principalement du fait du comportement nocturne de la plupart des espèces résidentes de l'erg. Cependant, diverses traces ont été observées sur le sable en divers points de la zone d'étude, confortant les témoignages du

personnel de SONAHCESS rapportant notamment sur l'ensemble de la zone la présence avérée de rongeurs (gerbilles, particulièrement) et de fennecs.

2.2.2. Avifaune :

2.2.2.1. Généralités :

Beaucoup d'oiseaux traversent le Sahara lors de leurs migrations entre l'Europe et l'Afrique subsaharienne. Cependant, la population d'oiseaux résidents est relativement restreinte, avec la plupart des espèces présentes dans les marges du désert. Le Sahara se trouve à la jonction de deux régions distinctes, la faune paléarctique occidentale et la faune afro-tropicale au sud. Il s'insère dans le grand désert paléarctique qui s'étend du Maroc à la Chine.

Un groupe d'une vingtaine d'oiseaux, non clairement reliés aux régions nord et sud, exhibe une distribution est-ouest à travers cette région. D'autres espèces sont colonisatrices ou ne s'aventurent dans le Sahara que pour s'y reproduire, surtout dans les régions montagneuses du sud de l'Algérie ou dans les zones localement humides (oasis, chotts au nord du Sahara) (tableau 03).

Les migrations transsahariennes qui ont lieu deux fois par an depuis la zone paléarctique occidentale concernent environ 1 300 millions d'individus, dont 90 pourcent de passereaux. La plupart sont des oiseaux migrateurs nocturnes, hormis les oiseaux de la famille des hirondelles, le rolhier d'Europe (*Coraciasgarrulus*) et le guêpier (*Meropsapiaster*) qui se déplacent pendant la journée. Les oiseaux planeurs doivent se limiter à des itinéraires qui ne traversent que des bras de mer étroits à l'ouest et à l'est de la Méditerranée, à l'exception de la bondrée (*Pernis apivorus*) qui suit une route Italie-Sicile-Tunisie. Ces oiseaux migrateurs ont peu d'impact sur l'écosystème de l'erg oriental car ils n'ont pas tendance à s'arrêter et à se nourrir dans le désert. En plus des espèces migratrices, 30 espèces supplémentaires sont présentes en plus petits nombres ou de façon isolée (Moreau, 1972 cité par RBA, 2005).

Tableau 03 : Avifaune se reproduisant régulièrement dans le désert (Source RBA, 2005)

Nom	Nom scientifique	Période de reproduction	Nidification
Vautour percnoptère	<i>Neophronpercnopterus</i>	mars à avril	Falaises
Vautour oricou	<i>Torgostrachelionotus</i>	mars à juillet	Falaises
Faucon lanier	<i>Falco biarmicus</i>	février à mars	Falaises
Faucon crécerelle	<i>Falco tinnunculus</i>	avril à juillet	Falaises
Oedicnème criard	<i>Burhinusoedicnemus</i>	printemps	Sol
Pigeon biset	<i>Columbalivia</i>	deux à trois fois par an	Cavernes
Tourterelle des bois	<i>Streptopeliaturtur</i>	avril à juillet	Arbres
Tourterelle maillée	<i>Streptopelia senegalensis</i>	toute l'année	Buisson
Hibou grand-duc	<i>Bubo bubo</i>	printemps	Roche, falaises ou caverne
Chouette chevêche	<i>Athenenoctua</i>	mars à mai	Trou ou terrier
Engoulevent d'Égypte	<i>Caprimulgusaegyptius</i>	printemps	Sol
Cochevis huppé	<i>Galeridacristata</i>	mars à juin	Sol
Hirondelle de fenêtre	<i>Delichonurbica</i>	avril à mai	Falaises
Pie-grièche grise	<i>Laniusexcubitor</i>	printemps	Buissons épineux
Hypolaïs des oliviers	<i>Hippolaispallida</i>	printemps	Buissons
Prinia à front ocellé	<i>Spiloptilaclamens</i>	printemps	Buissons
Agrobate roux	<i>Cerotrichasgalactotes</i>	avril à mai	Buissons
Moineau espagnol	<i>Passer hispaniolensis</i>	mars à juin	Arbres

2.2.2.2. Zone du complexe GEA :

Sur le complexe GEA, les principales observations d'oiseaux ont eu lieu dans les zones végétalisées des bases de vie, ainsi qu'en certains points d'eau (bassins d'évaporation, puits d'eau). Les principales espèces clairement autochtones observées comprenaient la tourterelle maillée, la tourterelle des bois, des espèces de passereau (probablement moineau du désert, moineau espagnol).

En outre, une grande quantité de carcasses d'oiseaux morts jonchaient le sol de la base de vie d'El Gassi et des centres de traitement d'huile – en particulier des passereaux et, occasionnellement, des guêpiers. D'après les témoignages du personnel de SONAHES, une grande quantité d'oiseaux migrateurs de passage au-dessus du complexe GEA au printemps s'arrêtent sur la base vie d'El-Gassi attirés par ses arbres et ses espaces verts, profitent de l'eau fournie par l'irrigation permanente, et s'attardent. Compte tenu de la quantité probablement limitée de nourriture disponible sur le site, la saison chaude approchant, ces oiseaux déjà affaiblis par leur migration ne peuvent ni repartir ni subsister dans cet environnement auquel ils ne sont pas adaptés. Un résumé des observations d'oiseaux faites lors de la visite sur site est présenté dans le tableau 04.

Tableau 04 : Avifaune observée à GEA (Source : RBA, 2005)

Lieu	Nom	Nom scientifique
Base De Vie	Guêpier d'Europe	<i>Meropsapiaster</i>
	Tourterelle des bois	<i>Streptopeliaturtur</i>
	Tourterelle turque	<i>Streptopeliadecaocto</i>
	Tourterelle maillée	<i>Streptopeliasenegalensis</i>
	Hirondelle de fenêtre	<i>Delichonurbica</i>
	Hirondelle rousseline	<i>Hirundorustica</i>
	Rougequeue noir	<i>Phoenicurusochruros</i>
	Pie-grièche grise	<i>Laniusexecubitor</i>
	Moineau espagnol	<i>Passer hispaniolensis</i>
	Moineau domestique	<i>Passer domesticus</i>
	Gobemouche gris	<i>Muscicapastriata</i>
	Bergeronnette printanière	<i>Motacillaflava</i>
	Traquet oreillard	<i>Oenanthehispanica</i>
	Traquet à tête grise	<i>Oenanthemoesta</i>
Champs	Agrobate roux	<i>Cercotrichasgalactotes</i>
	Ammomanesabelline	<i>Ammomanesdeserti</i>
	Corbeau brun	<i>Corvusruficollis</i>
Décharge	Corbeau brun	<i>Corvusruficollis</i>
	Tourterelle des bois	<i>Streptopeliaturtur</i>
Bassins d'évaporation	Cigogne blanche	<i>Ciconiaciconia</i>
	Grue cendrée	<i>Grus grus</i>
	Héron cendré	<i>Ardea cinerea</i>

2.2.3. Reptiles :

2.2.3.1. Généralités :

Les reptiles sont probablement le groupe le mieux représenté de tous les groupes de vertébrés dans le Sahara où l'on en trouve plus de cent espèces et sous-espèces.

Les espèces présentes à travers le Sahara algérien, on recense divers geckos dont *Geckoniachazaliae* (gecko casqué), *Stenodactyluspetrii*, *S. stenodactylus*, *Tarentolaneglecta* (Tarenteneglignée), des sphénops et scinques ou scindidés (lézards allongés à courtes pattes) dont *Sphenopsboulengeri* (Sphénops de Boulenger), *S. sphenopsiformis* (sphénops occidental), *Scincusscincus* (scinque des sables), *S. albifasciatus* (scinque à bandes blanches), des lézards acanthodactyles (Lacertidae) dont *Acanthodactylusscutellatu* (Acanthodactyle pommelé), *A. aureus* (Acanthodactyle doré), *Mesalinarubropunctata* et *Mesalinapasteuri*, des agames dont *Agama flavimaculata* – dans la famille des agamidés le fouette queue (*Uromastyx* spp.) étant plutôt abondant dans les régions rocheuses du sud de l'Algérie –, le varan du désert *Varanusgriseus*, et deux espèces de serpents, la couleuvre diadème *Lytorhynchusdiadema* et la vipère à cornes *Crotaluscerastesvipera*, cousine de la vipère à cornes *C. cerastescerastes* qui fréquente plutôt les zones rocheuses.

2.2.3.2. Zone du complexe GEA :

Sur la zone d'étude du complexe GEA, des lézards sont régulièrement observés, évoluant de manière très furtive entre des buissons de *Calligonum* et des touffes de *Stipagrostis* de petite taille, peu allongés, rapides, aux pattes relativement longues, il s'agit probablement de gecko ou d'acanthodactyle. D'autre part, on rencontre régulièrement des vipères des sables notamment dans les caves des puits de pétrole où elles recherchent de l'ombre.

2.2.4. Invertébrés :

2.2.4.1. Généralités :

Vingt-six ordres d'insectes sont représentés au Sahara et quatorze existent dans le désert extrêmement aride. Les plus courants sont :

- *Arachnidae* « araignées et scorpions » :

Deux familles de scorpions sont présentes dans le désert; les *Scorpionidae* et les *Buthidae*. *Scorpiomaurus* est le seul scorpion de la famille des *Scorpionidae* ; on retrouve ce scorpion clair dans toute la région du nord-Sahara et en Asie. Les *Buthidae* sont plus nombreux, et répartis en de nombreuses espèces et sous-espèces, dont *Buthusoccitanus*, *Androctonusaustralis*, *A. amoureuxi*, *A. crassicauda*, *A. Aeneas*, *A. sargentiet* *A. mauritanicus*. Les araignées ont fait l'objet de peu d'études. Elles comprennent principalement les familles des *Gnaphosidae*, les *Sparassidae*, les *Thomisidae*, les *Hersiliidae*, les *Salticidae*, et les *Tetragnathidae* et *Argiopidae*

- *Coleoptera* « Scarabées » :

Constituent une proportion importante de la population d'insectes du nord de l'Afrique. Les plus courants sont les *Tenebrionidae*. Les scarabées de la famille des *Scarabaeidae* sont également courants.

- *Diptera* « mouches et moustiques » :

Les mouches communes incluent la mouche domestique, *Muscadomestica*, les *Psychodidae*, les *Tipulidae*, les *Nemetrinidae* et les *Bombyliidae* sont aussi présentes. Des mouches prédatrices de la famille des *Asilidae*, *Therevidae* et des *Empididae* sont courantes tout comme les taons (*Tabanidae*)

- *Heteroptera*, *Homoptera* « parasites des plantes » :

Ces parasites sont le plus souvent xérophiles et se nourrissent de la sève des plantes de la végétation clairsemée; elles sont capables de résister à des températures élevées.

- *Hymenoptera* « Abeilles, guêpes et fourmis » :

On trouve principalement les fourmis et les guêpes dans les reliefs peu élevés; les abeilles (dont la représentante principale est l'abeille du Sahara *Apis saharensis*) sont dépendantes

des fleurs et sont limitées aux zones plus montagneuses. Les guêpes *Eumenid* sont faciles à voir; elles construisent des nids dans les murs des maisons et l'on trouve de nombreuses *Vespidae* dans les oasis.

- *Lepidoptera* « papillons et phalènes » :

Pendant les périodes de grand vent, certains petits papillons peuvent continuer à voler dans les limites d'un fourré particulier. *Tarucus* et *Freyeria galba*. Certaines larves d'*Artiidae*, *Lymantriidae* et de *Lasiocampidae* utilisent l'effet de dispersion provoqué par le vent en s'enroulant et en se laissant balloter par le vent

- *Orthoptera* « Sauterelles » :

On connaît surtout le criquet pèlerin *Schistocerca gregaria*. Des essaims gigantesques peuvent consommer une quantité considérable de feuillage et par le passé, ils ont été responsables de famines épisodiques dans la région (*Uvarov, 1954*). Le criquet migrateur *Locusta migratoria* reste pour sa part confiné aux marges sahéliennes. La sauterelle *Poecilocerushieroglyphicus* et la mante *Mantidseremiaphila* sont également fréquentes dans les zones suffisamment végétalisées.

- *Thysanoptera* « thrips » :

Insectes minuscules de un à deux millimètres de long avec des ailes duveteuses qui sont liés de près aux plantes et qui s'alimentent d'herbes dans certaines régions du désert.

- *Thysanura* « poisson d'argent » :

Constituent l'échelon le plus bas de la chaîne alimentaire dont d'autres organismes dépendent.

2.2.4.2. Zone du complexe GEA :

De nombreux scarabées sont présents sur l'ensemble de la zone du complexe GEA, tant dans les zones naturelles végétalisées qu'à l'intérieur des installations. On note la présence de petits scorpions blancs et le personnel témoigne l'existence de plus gros scorpions noirs. Enfin, de nombreuses carcasses desséchées de criquets témoignaient du passage au cours de l'hiver de vastes essaims de criquets migrants.

2.3. Aires protégées :

Le complexe GEA et le tracé des pipelines le reliant à Hassi Messaoud et Haoud El Hamra ne sont pas situés dans ou à proximité de sites protégés. Le parc national le plus proche est le parc national de Tassili N'Ajjer, est situé à près de 500 kilomètres au sud du complexe GEA. Il occupe une superficie de quelque cinquante millions d'hectares et figure aussi sur la liste des sites du patrimoine mondial.

Au nord, les sites protégés les plus proches sont les oasis de la vallée du M'Zab à plus de 250 kilomètres au nord-ouest (classés au patrimoine mondial de l'UNESCO), les sebkhet de Touggourt (présentés comme sites protégés au niveau national) ; enfin, à l'ouest, les premiers sites protégés sont les oasis de Tamantit et Sid Ahmed Timmi (sites RAMSAR) à plus de 500 kilomètres du complexe GEA près de Timimoun (Figure 14).

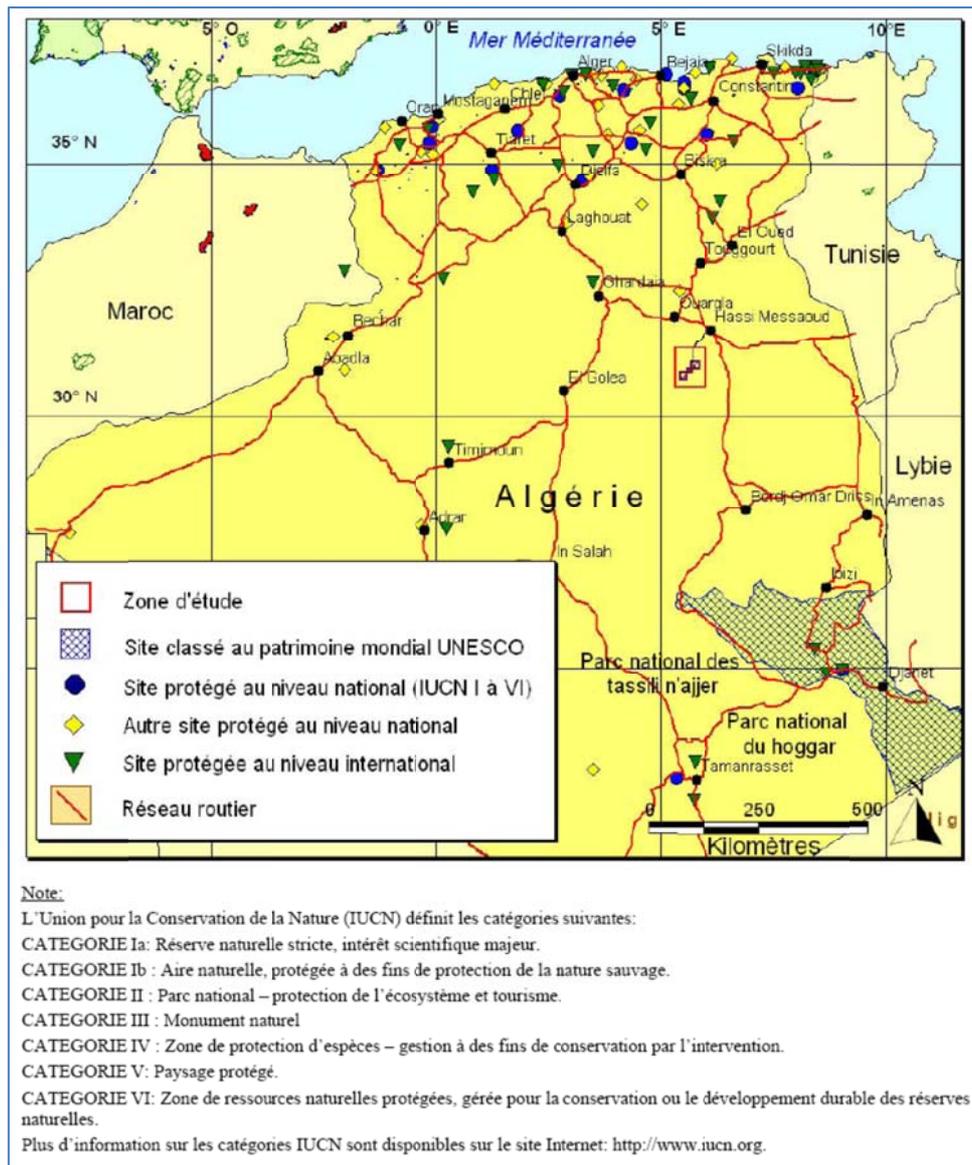


Figure 14 : Localisation de GEA par rapport aux principales aires protégées (Source : UNEP-WDPA, 2005)

3. Présentation de l'environnement social et culturel :

3.1. Démographie, urbanisation et infrastructures :

L'agglomération la plus proche du complexe GEA est la ville de Hassi Messaoud, située à environ 120 kilomètres au nord du complexe GEA. Hassi Messaoud ainsi que le complexe GEA font partie de la juridiction de la wilaya de Ouargla, dont le centre administratif est situé à environ 70 kilomètres à l'ouest de Hassi Messaoud. Initialement un « centre industriel saharien » à vocation uniquement industrielle, Hassi Messaoud s'est développée de manière rapide depuis la fin des années cinquante, du fait de l'attractivité des activités pétrolières pour une main d'œuvre devenue pour partie résidente, jusqu'à

devenir une ville au statut administratif de commune en 1985, comptant environ 60 000 habitants et 600 entreprises dont près de 200 entreprises étrangères.

A l'est, à l'ouest et au sud, le complexe GEA est bordé par le désert du Sahara, les plus proches zones d'habitations répertoriées étant Gassi Touil à environ 60 kilomètres à l'est (champ pétrolier sans population résidente hors travailleurs), et les oasis d'El Meniaa (El Goléa) à plus de 200 kilomètres à l'ouest.

Les voies de communications publiques les plus proches sont la route nationale N°03 longeant traversant l'Erg Oriental et reliant Hassi Messaoud à la wilaya d'Illizi (Bordj Omar Driss, Ohanet, In Aménas), ainsi que la route nationale no 1 reliant Ghardaïa à El Meniaa (El Goléa) et Tamanrasset.

Dans la zone de GEA, les principales voies de communications, les puits proches, les centres de traitement et les sites en construction font partie d'une zone d'exclusion interdite aux personnes non associées aux activités de SONAHESSE et régulièrement patrouillée par des détachements de militaires.

En dehors du personnel associé au complexe GEA (largement plus de 1 500 personnes en comptant le personnel de construction du projet de GCR phase 2, voir section 3), on ne peut réellement parler de population résidente sur ou à proximité de la zone d'étude qui reste, effectivement, désertique, à l'exception notable d'un petit groupe de bédouins établis dans un campement permanent au nord-est de la base vie d'El Gassi. Ce groupe est réduit quelques individus, sauf en de rares occasions surtout en saison sèche lorsque d'autres bédouins remontent du sud avec leurs troupeaux (Dromadaires essentiellement).

L'installation de bédouins à proximité des installations remonte à de nombreuses années. Elle s'explique par le forage de puits d'eau dans une zone auparavant totalement aride, permettant la survie des hommes et du cheptel, et également par les opportunités de pâturages créés par le dépôt de déchets de cuisine et de jardinage générés par les bases de vie. SONAHESSE tolère l'utilisation de l'eau en alimentant de manière permanente des abreuvoirs, notamment près du puits GSM 7.

3.2. Patrimoine culturel, historique et religieux :

Il n'existe pas de sites classés d'intérêt culturel, historique ou religieux dans la région de GEA. La région du Grand Erg Oriental a connu des climats essentiellement désertiques pendant des millions d'années, limitant les peuplements humains permanents à quelques oasis et aux marges du désert. L'épaisseur du sable éolien de l'Erg Oriental peut atteindre une centaine de mètres, témoignant d'un très long passé de conditions désertiques.

Cependant, le climat de la région est devenu plus humide après la dernière glaciation, entraînant des modifications de la flore, de la faune et de l'habitat humain.

Sur la zone de GEA, aucun artefact n'a été trouvé ni signalé par le personnel de SONAHES pendant l'étude de terrain. La topologie essentiellement plane de ce plateau de calcrete peut justifier la rareté de campements préhistoriques. D'autre part, des vestiges existants ont pu être prélevés par l'homme depuis l'exploration et le développement des gisements dans les années cinquante. La totalité du complexe n'a pu cependant être couverte par les études de terrain, laissant ouverte la possibilité de découvertes sur des parties moins fréquentées de la zone.

De la même manière, les observations réalisées le long du tracé des pipelines entre GEA et Hassi Messaoud n'ont pas conduit à l'identification de vestiges préhistoriques, à l'exception notable d'un petit racloir de quartz finement taillé parmi de rares éclats de silex, observé sur la pente d'un talus de calcrete, en déporté d'environ 300 mètres à l'ouest du tracé des pipelines. L'étroitesse du couloir du pipeline concerné par les travaux d'installation des pipelines (100 à 150 mètres au maximum) et la relative fréquentation de la zone couverte (GEA / proximité de la route GEA – Hassi Messaoud / champs et agglomération de Hassi Messaoud) au cours des dernières cinquante années peut expliquer la rareté des découvertes le long de cette route.

4. Présentation des installations et des procédés industriels appliqués :

4.1. Présentation simplifiée du procédé de production :

Les puits producteurs sont connectés sur un manifold, leur effluent est acheminé vers une séparation tri-phasique (Gaz, huile et eau), ces trois composants sont traités de la manière suivante (figure 15) :

L'huile est stockée au niveau des bacs de stockage pour décantation et expédition par pompes vers Haoud El-Hamra (HEH).

Le gaz est acheminé vers les stations de compression avant d'être réinjecté, soit sous forme de gaz lift pour alléger l'huile dans les colonnes de production des puits, soit forme de gaz miscible pour le maintien de la pression du gisement.

L'eau de la production subit un traitement avant d'être réinjectée pour le maintien de la pression du gisement.

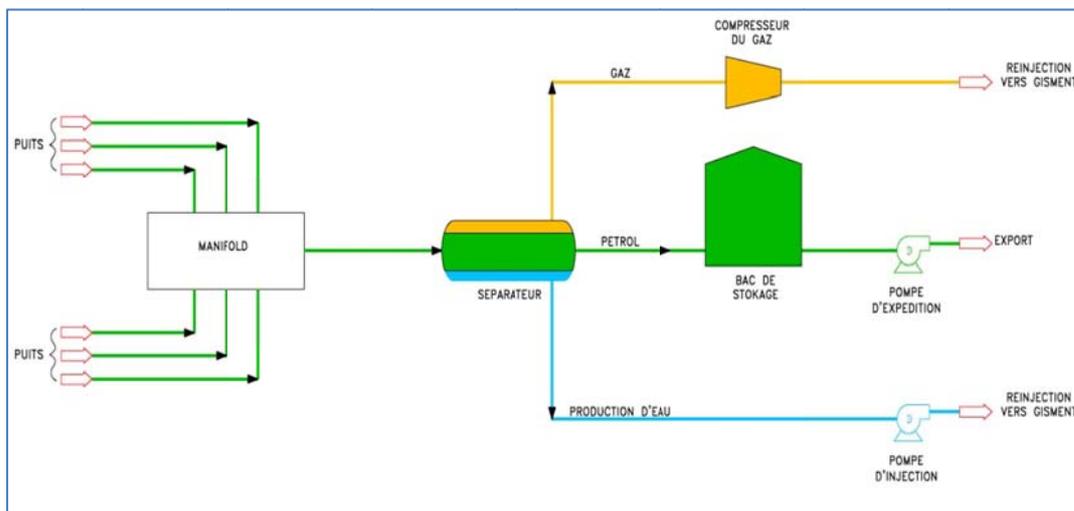


Figure 15 : schéma simplifié du procédé de séparation

4.2. Description générale des procédés industriels appliqués :

Le champ GEA de SonaHess est constitué de trois gisements d'huile : El Gassi, Zotti et El Agreb (figure 16). Les puits constituant ces trois gisements sont interconnectés par des conduites (pipelines) et des manifolds. Cette architecture de pipelines et manifolds est appelée « réseau de collecte ».

Selon le mode d'exploitation du gisement, les puits peuvent produire en déplétion naturelle (cas des puits éruptifs) ou par récupération assistée (cas des puits en Gaz-lift, dont Le gaz est injecté à haute pression au fond du puits à travers le concentrique descendu dans lacolonne de production).

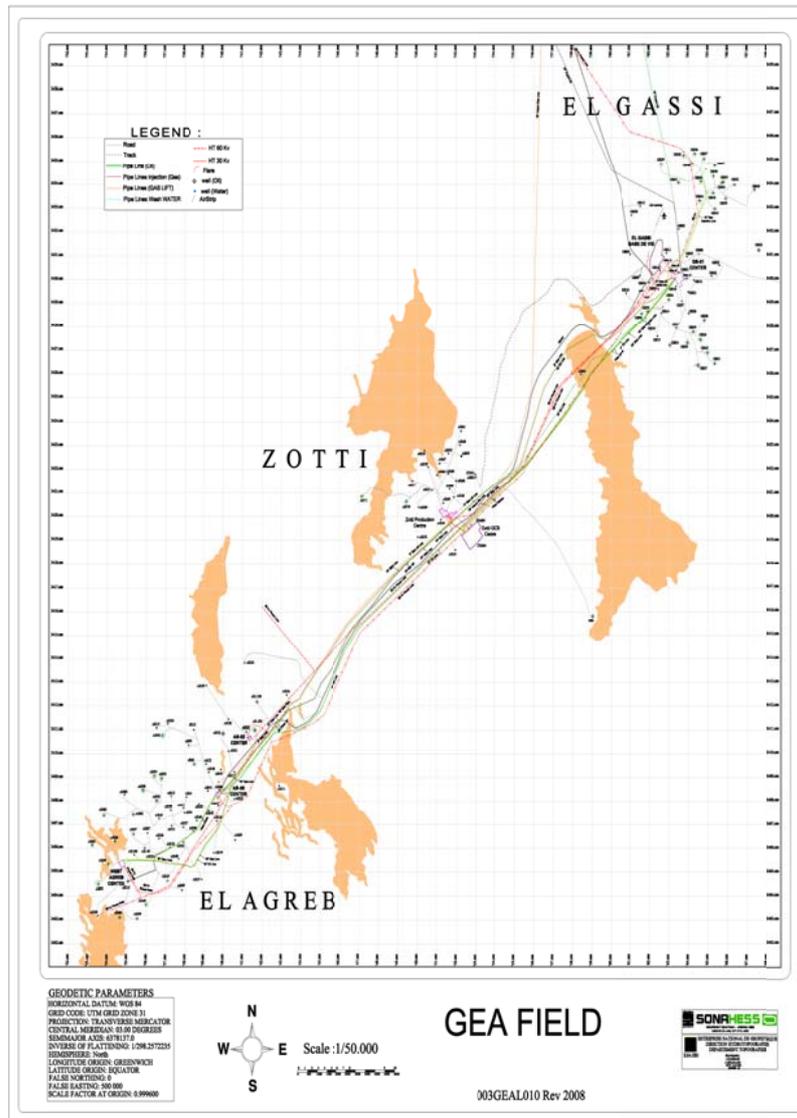


Figure 16 : Gisement et installations du complexe GEA

Une fois l'effluent (eau, huile, gaz) récupéré du réservoir et acheminé vers les centres appropriés, par le réseau de collecte, il subit une détente au sein des séparateurs ce qui permet la récupération séparément des phases : huile, eau et gaz. La figure 17 illustre les différents procédés appliqués dans la production.

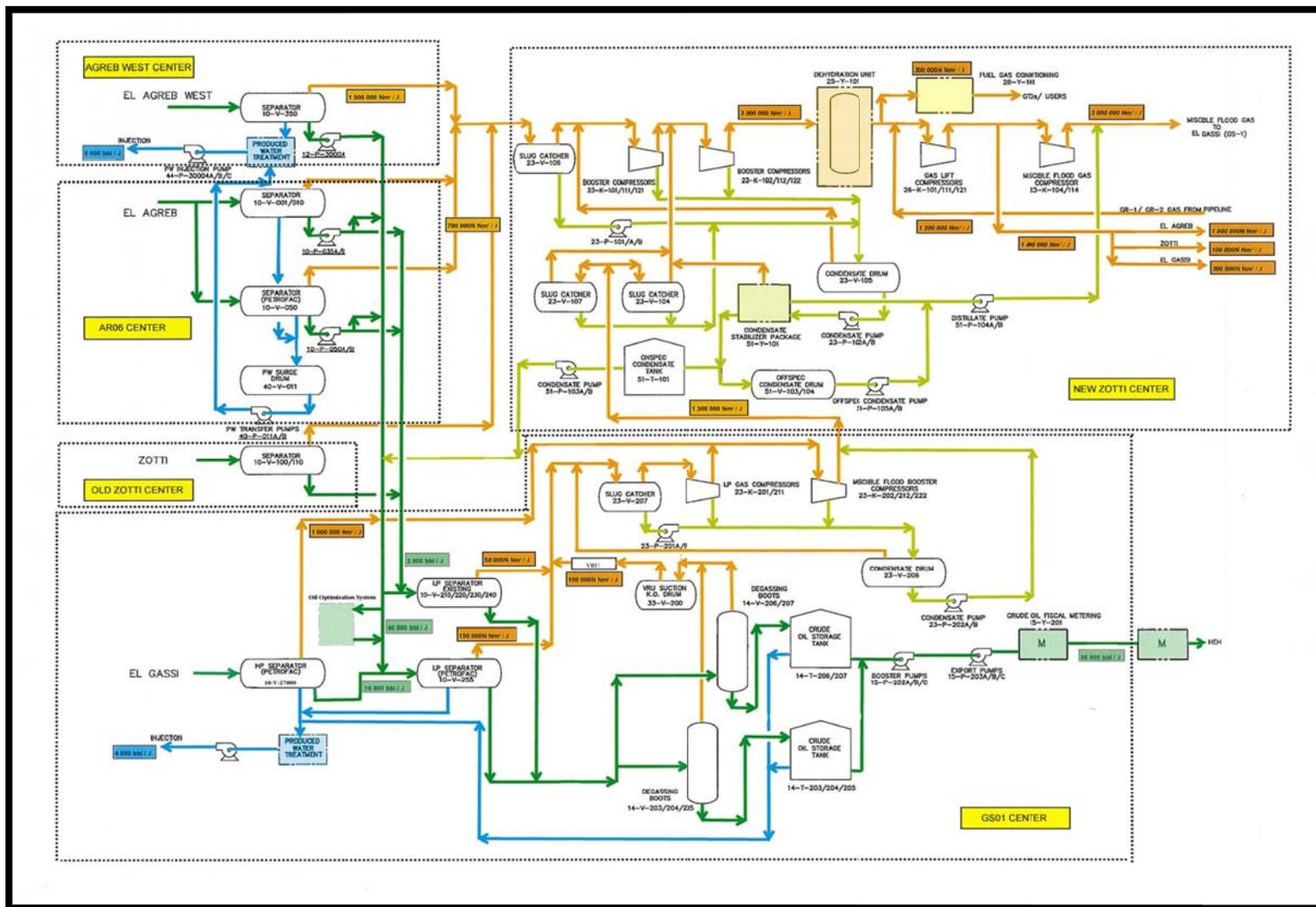


Figure 17 : Schéma général du flux des procédés de production à GEA

4.2.1. Procédé « huile » :

L'huile du gisement El-Agreb est traitée au niveau de la séparation des centres AR6 et WA (West Agreb) est acheminées vers le centre GS1 par les pompes de transfert via une conduite 18''.

L'huile du centre de production ZOTT est acheminée vers le centre GS1 via une ligne 10'' sous l'effet de la pression de la séparation.

Le dernier étage de la séparation du centre GS1 reçoit l'huile provenant des centres AR6 et WA (gisement d'El Agreb), dont une partie à travers la stabilisation. Il reçoit l'huile du centre ZOTTI et l'huile de la séparation des puits du gisement d'El-Gassi.

L'huile des centres des gisements d'El-Agreb et ZOTTI se combinent avec l'huile de la séparation HP des puits du gisement d'El-Gassi pour un traitement finale dans la séparation LP du centre GS1, a ce stade l'huile est acheminée vers les bacs de stockage pour décantation avant qu'elle soit expédiée vers le centre de stockage de Haoud El-Hamra qui est chargé de l'activité transport par canalisation.

Par ailleurs, le long de ce processus de production, l'huile subit plusieurs traitements tel que l'injection des produits chimiques, injection de l'eau douce augmentation de la température à travers l'unité de stabilisation et diminution de la pression.

4.2.2. Procédé « Gaz » :

Le gaz de la séparation des centres de production AR-6, WA et ZOTTI subit une détente jusqu'à 3bars pour être acheminé à travers une capacité de récupération des condensats (slug catcher) vers l'aspiration du premier étage des compresseurs boosters du centre de compression et de réinjection ZOTTI

Le gaz de la séparation de GS1 ainsi celui de l'unité de récupération du gaz atmosphérique des bacs de stockage sont comprimés à travers deux étages de compression, de 2.5bars jusqu'à 15bars afin d'être acheminé à travers une capacité de récupération des condensats (slug catcher) vers l'aspiration du deuxième étage des compresseur booster du centre de compression ZOTTI. Une fois le gaz des quatre centres combiné à la sortie du deuxième étage des compresseurs boosters, il sera acheminé vers l'unité de déshydratation avant d'être dirigé vers les compresseurs 50/150bars.

A cette phase de compression, une partie de ce gaz est utilisé comme gaz lift et l'autre comme gaz miscible à travers le dernier étage de compression qui est de l'ordre de 150 bars à 400bars ; autrement dit :

Le gaz lift est injecté à **150 bars** dans les colonnes des puits afin d'alléger la densité des effluents ascendants et pour faciliter leur écoulement vers les têtes de puits et le réseau de collecte.

Le gaz miscible est le dernier étage des stations de compression du centre de compression ZOTTI, avec une pression qui avoisine les 400bars, il est réinjecté dans le réservoir pour le maintien de la pression du gisement d'El Gassi.

4.2.3. Procédé « Condensat » :

Les condensats des différents étages des stations de compression des centres GS1 et ZOTTI sont collectés et acheminés vers l'unité de stabilisation du centre de compression ZOTTI. Après la stabilisation, le condensat dont les spécifications sont en conformité avec les standards recommandés par la Sonatrach, est mélangé avec l'huile provenant des centres AR6 et WA vers le centre GS1, par contre le condensat hors spécifications est réinjecté dans la ligne de gaz miscible.

4.2.4. Procédé « eau »

4.2.4.1. Eau du jurassique et eau douce :

En plus des procédés décrits ci-dessus, le champ GEA dispose du centre AR2 qui est doté de deux électropompes pour la réinjection de l'eau produite du jurassique dans le réservoir.

D'autre part, les centres AR6, WA, centre de compression ZOTTI et GS1 sont dotés par des unités de traitement de l'eau douce qui est acheminée à travers une collecte appropriée et prédisposée pour les opérations de lavage des colonnes des puits producteurs qui est effectué à des pressions de 145 bars afin de dissoudre les sels et les dépôts solides pour éviter le bouchage des puits producteurs d'huile.

4.2.2.2. Eau de production :

4.2.2.2.1. Description du procédé :

L'eau de production issue de la séparation des centres **AR06** et **West Agrebest** traitée au niveau de l'installation de traitement des eaux huileuses du centre WA pour être réinjectées à 200 bars dans le réservoir d'El-Agreb pour le maintien de pression. Le volume injecté quotidiennement est d'environ 20 000 barils/jour.

L'eau de production issue de la séparation et des bacs de stockages du centre GS1 est traitée au niveau de l'unité de traitement des eaux huileuses du centre GS1 pour être réinjectées à 200 bars dans le réservoir d'El-Gassi pour le maintien de pression.

L'eau de production du gisement Zotti reste mélangé avec l'huile est rejoint la séparation basse pression de GS-01 où elle sera séparé puis traité au niveau de l'installation de traitement de GS-01 avant d'être réinjectée dans le gisement d'El Gassipour le maintien de pression. Le volume total d'eau de production injectée dans le gisement d'El gassi est d'environ 5 000 barils/jours.

En cas de non disponibilité d'injection d'eau de production (maintenance des installations de traitement et réinjection ou perte d'intégrité dans les installations de réinjection), elle rediriger vers les bassins d'évaporation.

4.2.2.2.2. Description de l'installation de traitement et réinjection :

4.2.2.2.2.1. Flux du procédé :

Le flux de procédé est schématisé dans la figure 18. L'eau produite du centre alimente le Ballon Flash. Cette alimentation inclue une injection d'eau de dilution pour empêcher la précipitation des sels dissout qui peuvent être engendrés par la diminution de la pression ou de la température.

Dans le ballon flash, l'eau de production subit une séparation en quatre phases:

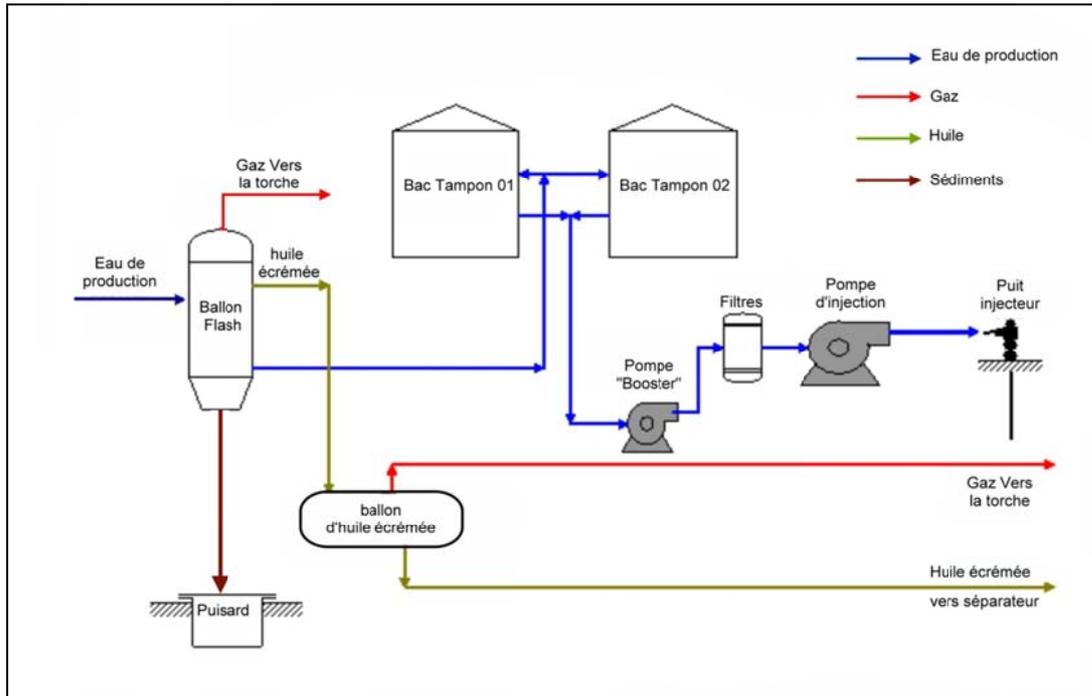


Figure 18 : Schéma du flux de procédé de l'eau de production

- Le gaz produit par dégazage de l'eau à une pression de 1.5 bars et est acheminé vers torche
- Les solides décantés dans le fond du ballon, sont régulièrement évacués vers le puisard
- L'huile obtenue par séparation est écumée vers un ballon puis rejoint la séparation
- L'eau de production est acheminée vers les bacs Tampons. Elle est ensuite aspirée par des pompes de surpression « Booster » puis refoulé vers des filtres, après les filtres des additifs chimiques sont rajoutés (inhibiteurs de corrosion, biocides) avant sa réinjection via les pompe d'injection et les puits injecteurs.

4.2.2.2.2. Description des technologies appliquées dans le ballon flash:

Le ballon flash d'eau de production appelé aussi Cyclo-Sep, est conçu pour dégazer le flux entrant, retirer l'huile et les solides et envoyer l'eau vers les bacs tampons. Dans ce ballon, l'eau subit une séparation par hydro-cyclone suivit d'une flottation par gaz dissous.

Le principe des hydro-cyclones est d'appliquer une force centrifugeuse sur un flux de liquide (eau produite). La différence de densité entre l'huile et l'eau cause la migration de l'huile vers le centre du vortex qui est créé dans le cyclone, forçant ainsi l'huile à passer par une extrémité du cyclone et l'eau à passer par l'autre (Owens & Douglas, 2007). La figure ci-dessous illustre un hydro-cyclone type en opération

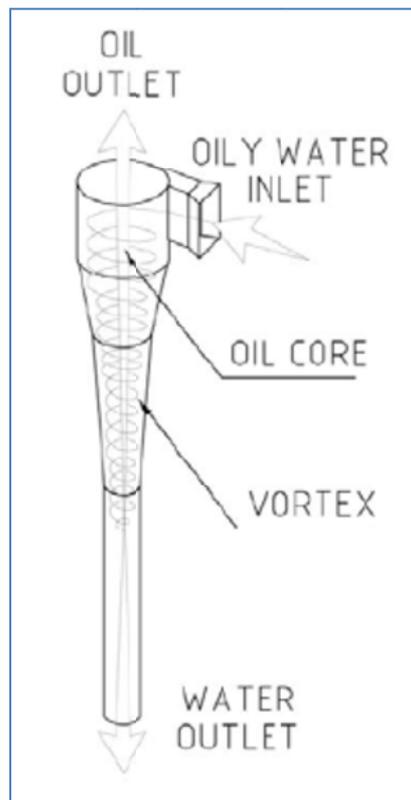


Figure 19 : hydro-cyclone type

Les hydro-cyclones sont utilisés depuis plusieurs années et présentent une multitude d'avantages dont le plus pertinent est probablement leur taille et leur poids. En effet, c'est un assemblage d'équipement assez compact, ce qui le rend très apprécié dans les applications Offshore où l'emprise spatiale ainsi que la charge sont les contraintes qui priment. Ils sont également capables de traiter des affluents avec de fortes concentrations en huile (> 2000 ppm), ce qui les rend très sollicités dans les installations de production (Owens & Douglas, 2007).

Le principal inconvénient de cette technologie est le fait qu'elle exige que la densité de l'huile soit nettement différente de celle de l'eau pour qu'elle soit efficace. L'huile ayant

un degré API inférieur à 15-17 ne peut être séparée par ce procédé et donne souvent lieu à des blocages à l'intérieur de l'appareil. Les émulsions de petite taille (<15 microns) peuvent également poser de sérieux problèmes aux hydro-cyclones et sont à l'origine d'une grande perte en efficacité (Owens & Douglas, 2007).

Considérant leur nature, des chutes de pression sont souvent associés au fonctionnement de l'hydro-cyclone et sans pression suffisante à l'entrée, les procédés en aval pourront être compromis. D'autres limites sont l'aptitude des hydro-cyclones à faire face aux fluctuations du procédé et à l'accumulation de solides qui peut obturer l'écoulement du fluide et créer ainsi une chute additionnelle de pression (Owens & Douglas, 2007)

La seconde technologie utilisée dans le Cyclo-Sep est la flottation par gaz dissous, où des bulles de gaz sont générées pour assister la flottation, elle basée sur l'utilisation des pompes de gaz dissous (DGF : *Dissolved Gas Flotation pumps*). Ces dernières fonctionnent avec de l'eau et du gaz acheminés vers le point d'aspiration. Par l'effet de forte pression, le gaz est dissous dans l'eau. Plus en aval, le flux rencontre une zone de dépression (au niveau d'un robinet à soupape « *Globe valve* ») où les bulles de gaz s'échappent de la solution et peuvent alors être utilisées pour la flottation. Le grand avantage de ce type de pompes est que les bulles générées sont nettement plus petites que celles générées par la méthode utilisant des éjecteurs, et sont donc plus efficaces dans la flottation. L'inconvénient majeur des pompes DGF est que leur utilisation devient restreinte dans le cas de gaz insolubles ou dans des conditions de haute température de l'eau. Ces conditions limitent l'aptitude de la pompe d'aspirer, dissoudre et générer sans risque de cavitation.

Cette technologie présente plusieurs avantages. Originellement développée et utilisée dans l'industrie minière durant des années. De nos jours, les unités à flottation par gaz sont devenues l'option préférée de plusieurs producteurs d'huile, pour la séparation secondaire huile-eau. La flottation par gaz est basée sur l'introduction de bulles de gaz dans un flux d'eau produite pour assister dans la séparation. Les bulles de gaz croissent et se lie aux gouttelettes d'huile et améliore la séparation sur les plans temps et efficacité. La polyvalence de la technologie de flottation ainsi que sa capacité à faire face aux perturbations liées au procédé lui a conférer une place de choix sur le marché des

technologies de séparation. Les équipements de flottation par gaz sont fournis sous divers types et configurations. (Owens & Douglas, 2007)

Par comparaison aux autres technologies de séparation par gravité, les unités de flottation par gaz sont typiquement plus petites pour un même débit à traiter, et sont de ce fait bien adaptées aux applications On-shore et Offshore(Owens & Douglas, 2007). Les principes et les facteurs d'influence de cette technologie sont :

(a) Contact entre la bulle de gaz et la gouttelette d'huile :

Quel que soit le type de flottation par gaz appliqué, la première chose qui doit survenir est le contact entre. Afin de s'assurer qu'il y ait une forte probabilité d'occurrence de ce contact entre les deux particules, il est souhaitable que le point de mélange et de diffusion des bulles soit situé à emplacement où l'intégralité du flux passe. Ceci préviendrait l'occurrence de mélange partiel entre les bulles et le flux à traiter (Owens & Douglas, 2007).

Le temps durant lequel les deux particules restent très proches est déterminant, et c'est pour cette raison que la taille des bulles devient un facteur pertinent. Si l'ascension des bulles est trop rapide, la probabilité de voir celles-ci entrer en contact avec des gouttelettes d'huile devient faible. L'ascension des petites bulles est plus lente que celle des plus grosse ce qui a pour conséquence d'améliorer le temps de contact entre les bulles et les gouttelettes. Aussi, la distribution à l'intérieur du ballon assure l'élimination des gouttelettes d'huile étant à la fois de même taille et plus volumineuse que les bulles de gaz. Avec le progrès technologique, les bulles de gaz générés sont de plus en plus petites et le terme « Flottation par Micro-Bulles » (MBF) est utilisé pour les bulles ayant un diamètre inférieur à 30 microns (Owens & Douglas, 2007).

(b) Adhésion ou encapsulation :

Une fois que la bulle de gaz et la gouttelette entrent en contact, il est important qu'elles s'unissent, et une fois combinées, elles restent ensemble. Il existe deux manières par lesquelles cette liaison survient, il s'agit de l'adhésion et de l'encapsulation.

- L'adhésion est une liaison relativement faible entre la bulle de gaz et la gouttelette d'huile, mais ce le type de liaison le plus probable dans un système de flottation. Il survient lorsqu'il y a contact entre des petites portions des surfaces respectives de la bulle et de la gouttelette, et donnent l'impression que les deux particules sont coincées ensemble. Du fait de sa fragilité, cette liaison peut facilement rompre en cas d'écoulement turbulent. La surface de la bulle de gaz peut aussi servir de coalescent, car si deux gouttelettes d'huile adhèrent à une même bulle, elles peuvent se combiner.
- L'encapsulation est une forte liaison et survient lorsqu'une gouttelette d'huile englobe entièrement une bulle de gaz. Cette situation est plus intéressante pour la flottation par gaz car il serait difficile et peu probable de séparer les deux particules, ceci signifie que leur chance de migrer jusqu'à la surface est décuplée. La figure 20 illustre le phénomène d'encapsulation.

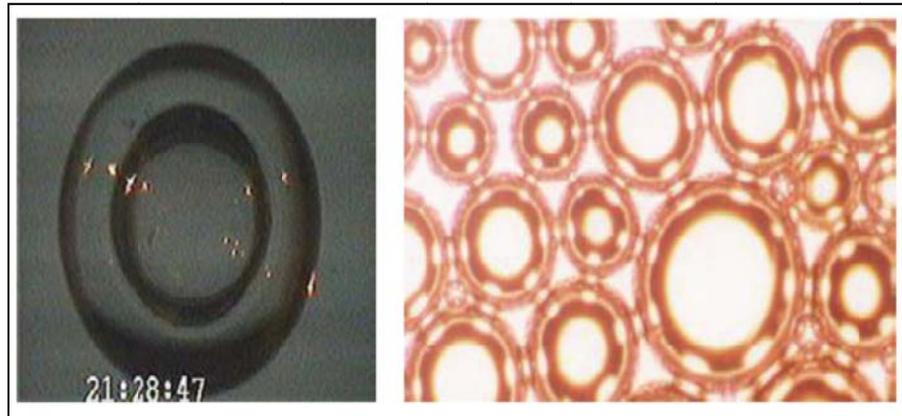


Figure 20 : Encapsulation des bulles de gaz par les gouttelettes d'huile

(c) Turbulence et force d'arrachement (shear force) :

Une fois que l'adhésion ou l'encapsulation survient entre une gouttelette d'huile et une bulle de gaz, il serait préférable que les deux particules restent en contact jusqu'à atteindre la surface. S'il y a détachement prématuré, la gouttelette sera entraînée à nouveau dans le ballon. Les causes les plus probables de cette séparation forcée sont : d'importantes forces d'arrachement ou des écoulements

turbulents à l'intérieur du ballon de flottation. Il y a deux conditions favorables à la génération de ces forces : la première concerne une conception non adéquate de l'intérieur du ballon de flottation, la seconde et la plus probable est due à la taille des bulles de gaz. En effet, les bulles de gaz volumineuses, induisent par leur ascension rapide, d'importantes turbulences dans leur sillage. Il est donc préférable d'avoir de petites bulles de gaz pour que ces forces soient moins importantes.

(d) Dynamique des fluides :

La bonne conception interne d'un ballon de flottation est un facteur ayant un impact considérable sur l'efficacité d'un système de flottation par gaz. Une conception médiocre peut conduire à des courts-circuits, où les gouttelettes d'huile sont directement emportées vers la sortie sans quelle croisent les bulles de gaz. Des chutes important de vitesse peuvent être à l'origine d'un entrainement vers le bas des bulles de gaz où elles seront emportées hors du ballon. Ceci est hautement préjudiciable, surtout s'il y a des pompes en aval car le gaz peut leur induire une cavitation. De nos jours, ces problèmes sont facilement ajustés avec des simulations par ordinateur, ou une modélisation CFD.

(e) Elimination séquentielle :

Une combinaison de CFD et de données expérimentales ont démontré la configuration interne « en compartiment » du ballon de flottation est hautement bénéfique. Une approche « multi-chambre » implique l'élimination d'une proportion de l'huile à chaque phase du procédé. Où chaque compartiment agit comme une cellule d'élimination à part. Cette approche permet également de faire face aux perturbations dans le procédé car ces dernières seraient limitées à la première chambre.

(f) Méthode d'écumage :

Quand une gouttelette d'huile et une bulle de gaz atteignent la surface, la bulle va généralement éclater, laissant une couche d'huile en surface et qui devrait être éliminée. Avoir une accumulation importante d'huile en surface n'est pas souhaitable car son entrainement dans le ballon peut facilement survenir. Aussi, un important taux d'huile va réduire le volume utile pour la séparation. Plusieurs méthodes d'écumage sont disponibles, mais un bon écumoire est généralement celui qui élimine l'huile sur une surface aussi large que possible, et n'écume pas par la même occasion d'importantes quantités d'eau.

Chapitre 03

Matériel et méthodes

Matériel et méthodes :

1. Stratégie de réalisation et approche de travail :

Rappelons que le présent travail intitulé « niveaux de contamination par les Eléments Traces Métalliques (Cd, Pb, Cu et Zn) de l'eau de production et des sédiments des champs pétroliers du complexe G.E.A –Hassi Messaoud » a pour objectif la fourniture d'outils d'aide à la décision pour l'équipe de gestion dans le but de l'amélioration continue des éléments constitutifs du plan de gestion environnementale.

L'élaboration de ces outils se fera par l'analyse des risques environnementaux associés aux éléments traces métalliques étudiés dans le contexte actuel de gestion de l'eau de production au niveau du complexe GEA.

2. Présentation de la méthode d'analyse choisie:

La méthode d'analyse des risques choisie dans le présent travail est une méthode d'analyse qualitative des risques dite « Nœud Papillon ». Les premières publications apparues sur cette méthode remontent à 1997 par l'université de Queensland (Australie), ensuite c'est la compagnie « SHELL » qui l'a introduite dans le secteur industriel dans les années 90s, dans le cadre de l'élaboration du « Safety Case » (équivalent de l'étude de danger). De nos jours, cette méthode est devenue incontournable dans l'élaboration des études de danger, et a été amélioré par l'introduction de logiciel tel que BowTieXP

2.1. Objectif de la méthode « Nœud Papillon » :

L'objectif de cette méthode est de visualiser concrètement des scénarios d'évènements redoutés qui pourraient survenir en partant des causes initiales de l'évènement jusqu'aux conséquences au niveau des cibles identifiées.

2.2. Démarche de la méthode « Nœud Papillon » :

Le Nœud Papillon est un outil qui combine un arbre de défaillance et un arbre d'évènement. Il se présente sous la forme illustré dans la figure ci-dessous

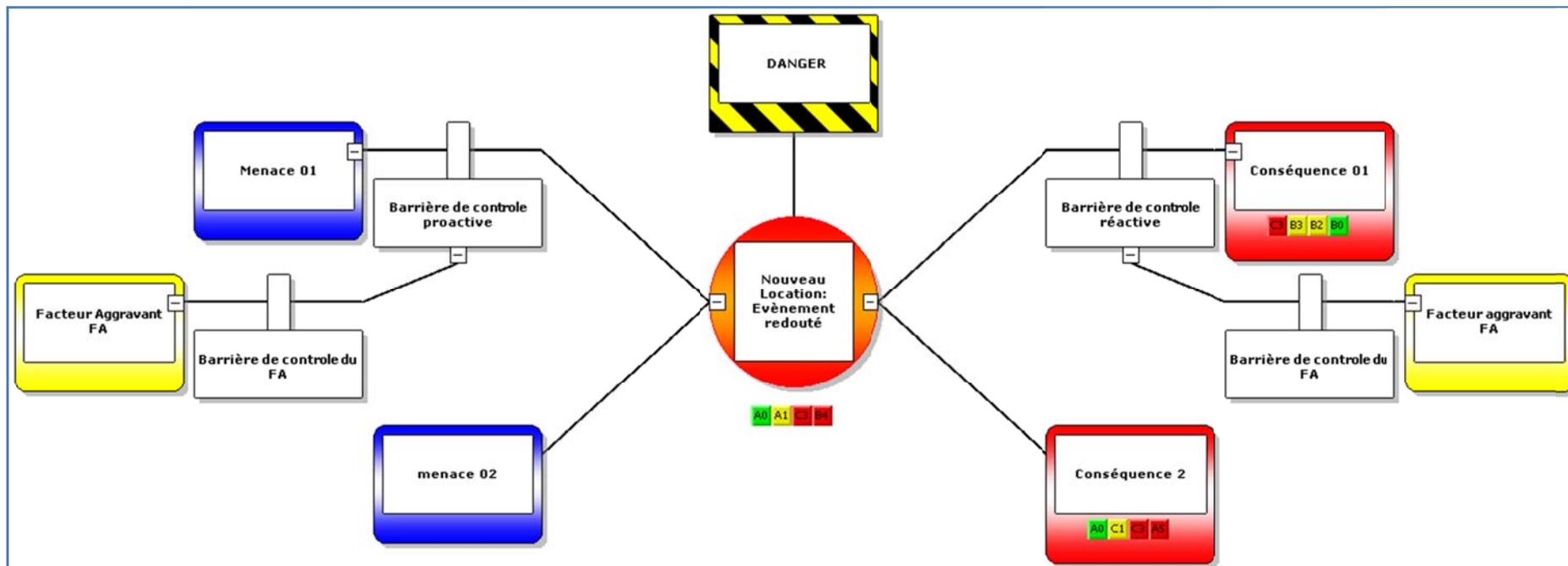


Figure 21 : Représentation du scénario d'un évènement redouté selon le modèle « Nœud Papillon »

Le point central du Nœud Papillon est l'événement redouté central. La partie gauche du Nœud Papillon s'apparente alors à un arbre des défaillances s'attachant à identifier les causes de cet événement redouté central.

La partie droite du Nœud Papillon s'attache quant à elle à déterminer les conséquences de cet événement redouté central tout comme le ferait un arbre d'évènement. Sur ce schéma, les barrières de sécurité sont représentées sous la forme de barres verticales pour symboliser le fait qu'elles s'opposent au développement d'un scénario.

De fait, dans cette représentation, chaque chemin conduisant d'une défaillance d'origine (Menace) jusqu'à l'apparition de dommages au niveau des cibles (Conséquence) désigne un scénario d'évènement redouté central.

Le Nœud Papillon se déroule en huit étapes schématisées dans la figure 22.

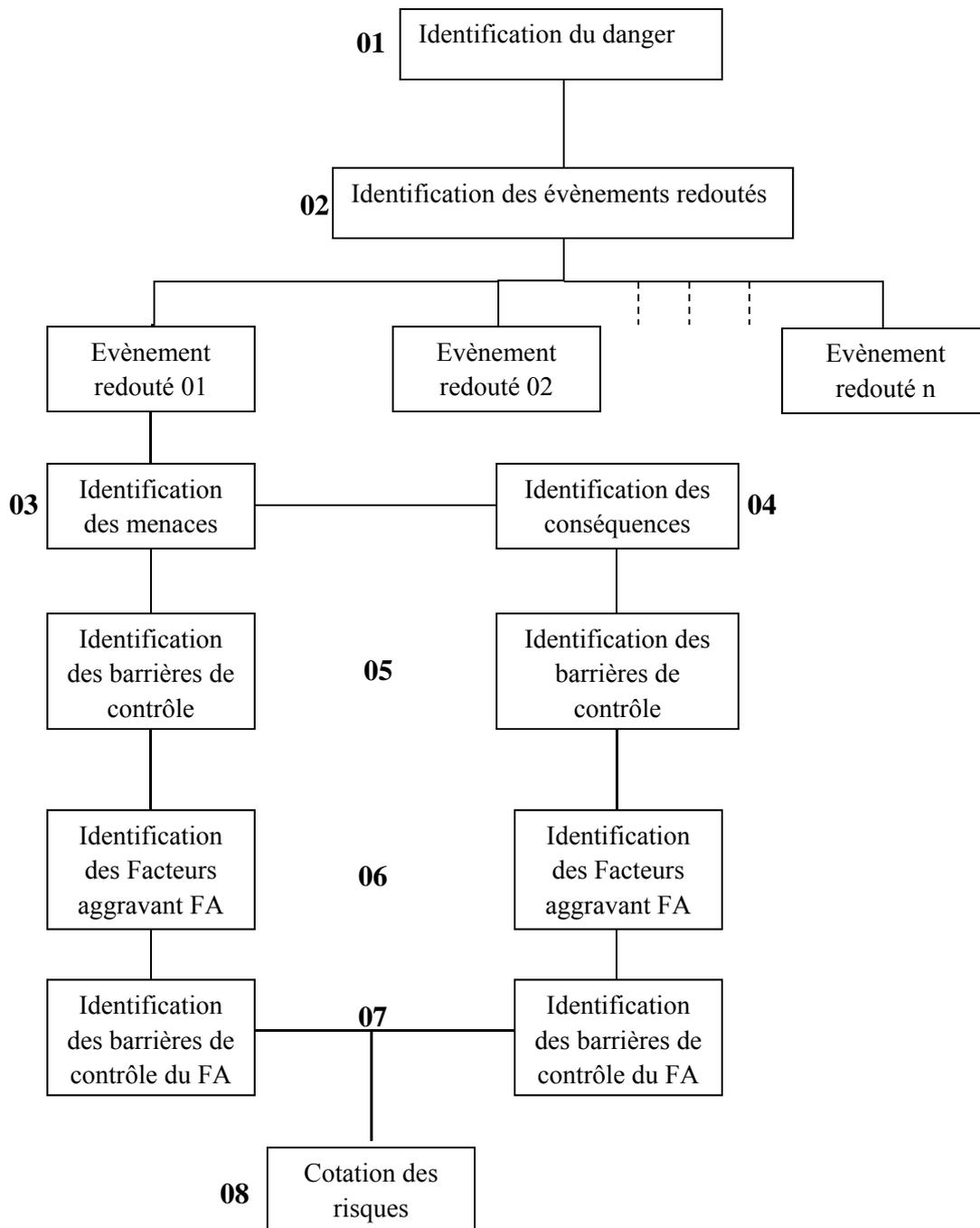


Figure 22 : Déroulement de l'analyse des risques par la méthode « Nœud papillon »

2.2.1. Identification du danger :

L'identification des dangers est le processus permettant de trouver, lister et caractériser les situations, conditions ou pratiques qui comportent en elles-mêmes un potentiel à causer des dommages aux personnes, aux biens, à l'environnement ou à la réputation.

2.2.2. Identification de l'évènement redouté :

L'identification de l'évènement redouté est le processus permettant de mettre caractériser des événements où le danger identifié devient hors de contrôle.

2.2.3. Identification des menaces :

L'identification des menaces est le processus permettant de caractériser les causes possibles ayant menées à la perte de contrôle du danger identifié. Les menaces doivent conduire directement à l'évènement redouté et agir indépendamment.

2.2.4. Identification des conséquences :

L'identification des conséquences est le processus permettant de caractériser les événements nuisible engendrés par la perte de contrôle du danger.

2.2.5. Identification des barrières de contrôle

L'identification des barrières de control est le processus permettant de caractériser les mesures prises pour empêcher ou atténuer les menaces, l'évènement redouté ou les conséquences.

Il existe deux types de barrières : Proactives et réactives. Les barrières proactives se trouvent en amont de l'évènement redouté, les barrières réactives se trouvent en aval de l'évènement redouté.

Les barrières proactives peuvent êtres des barrières d'élimination (pouvant éliminer la menace ou le danger) ou de prévention (n'éliminant pas la menace mais la contrôlant pour prévenir l'occurrence de l'évènement redouté).

Les barrières réactives peuvent être des barrières de réduction (pouvant réduire la probabilité d'occurrence d'une conséquence) ou d'atténuation (pouvant atténuer la gravité d'une conséquence)

Les barrières de contrôle sont caractérisées par une criticité et une efficacité. La criticité traduit la capacité intrinsèque de la barrière à contrôler la menace, l'évènement redouté ou la conséquence. L'efficacité quant à elle traduit l'état de fonctionnement de la barrière.

2.2.6. Identification des facteurs aggravant :

L'identification des facteurs aggravant est le processus permettant de caractériser les conditions qui vont à l'encontre des barrières de contrôle ou qui en réduisent l'efficacité. Il existe quatre catégories de facteurs aggravant : le facteur humain, le défaut mécanique, les conditions anormales et la perte de service cruciaux.

2.2.7. Identification des barrières de contrôle du facteur aggravant :

L'identification des barrières de contrôle du facteur aggravant est le processus qui permet de caractériser les mesures de contrôle agissant sur le facteur aggravant

2.2.8. Cotation du risque :

Le terme « risque » définit le produit entre la probabilité d'occurrence et la gravité d'un évènement redouté ($\text{Risque} = \text{Probabilité} \times \text{Gravité}$). La cotation du risque est le processus permettant d'attribuer un niveau de risque (faible, moyen, élevé, ...) sur la base d'une appréciation de ces deux composantes, à savoir : la probabilité et la gravité.

En général, cette appréciation se fait sur la base d'une matrice qualitative des risques où seront définis les différents attributs relatifs à la probabilité et à la gravité. Il convient de souligner ici que ces attributs sont relatifs et peuvent différer d'un établissement classé à un autre, autrement dit, chaque établissement classé devrait élaborer sa propre matrice des risques.

3. Application de la méthode d'analyse dans le présent travail :

L'objectif de cette section n'est pas de reprendre la démarche de la méthode d'analyse des risques déjà décrite plus haut, mais d'apporter des précisions que nous avons jugées utiles d'introduire dans ce chapitre.

3.1. Identification du danger :

Le danger identifié dans le présent travail est intitulé « Eléments traces métalliques dans l'effluent eau de production ». Dans le présent travail l'identification du danger revient à le caractériser puis à identifier sa source. La caractérisation vise à confirmer l'existence du danger. L'identification de la source permettra d'identifier les menaces et les barrières de contrôle.

Afin de caractériser ce danger, nous avons choisi des seuils nous permettant de dire que ce danger est avéré ou non.

Considérant le fait que notre effluent (eau de production) soit composé d'eau et solides (donnant lieu à des sédiments dans les bassins d'évaporation), nous avons défini des seuils pour l'eau et des seuils pour les sédiments. Si un des éléments étudiés présente des concentrations mesurées (dans l'eau ou dans les sédiments) supérieures aux seuils définis, le danger « Eléments traces métallique dans l'effluent eau de production » serait considéré comme avéré.

3.1.1. Seuils définis pour l'eau de production :

Les seuils définis pour l'eau de production correspondent aux valeurs limites définies par la réglementation algérienne en vigueur, notamment le décret exécutif 06-141 définissant les valeurs limites de rejets d'effluents liquides industriels.

Les valeurs définies pour les éléments traces métalliques étudiés dans l'eau de production sont rapportées dans le tableau 05.

Tableau 05 : seuils définis pour les éléments traces métalliques dans l'eau de production (Source : JORADP 26, 2006)

Paramètre	unité	Valeur limite
Cadmium	mg/l	0,2
Cuivre	mg/l	0,5
Plomb	mg/l	0,5
Zinc	mg/l	3

3.1.2. Seuils définis pour les sédiments :

Les seuils définis pour les sédiments associés à l'eau de production correspondent aux teneurs limites en éléments traces métalliques dans les déchets ou effluents définies par l'arrêté français du 02 février 1998 modifié et complété relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation. Il va sans dire que ces seuils ne revêtent aucun caractère d'obligation légale. Néanmoins, en l'absence de seuils définis dans la réglementation Algérienne relative aux déchets (notamment le décret exécutif 06-104, fixant la nomenclature des déchets y compris les déchets spéciaux dangereux), ces valeurs seront considérées à titre indicatif.

Les valeurs définies pour les éléments traces métalliques étudiés dans les sédiments sont rapportées dans le tableau 06.

Tableau 06 : seuils définis pour les éléments traces métallique dans les sédiments associés à l'eau de production

Elément trace métallique	unité	Valeur limite
Cadmium	mg/kg (MS)	10
Cuivre	mg/kg (MS)	1000
Plomb	mg/kg (MS)	800
Zinc	mg/kg (MS)	3000
MS : Matière Sèche		

3.2. Cotation du risque :

Dans le présent travail, la cotation du risque se fera pour l'évènement redouté ainsi que les conséquences.

3.2.1. Matrice qualitative du risque :

Dans le présent travail, nous avons utilisé la matrice qualitative du risque utilisée à SONAHESS (figure 23)

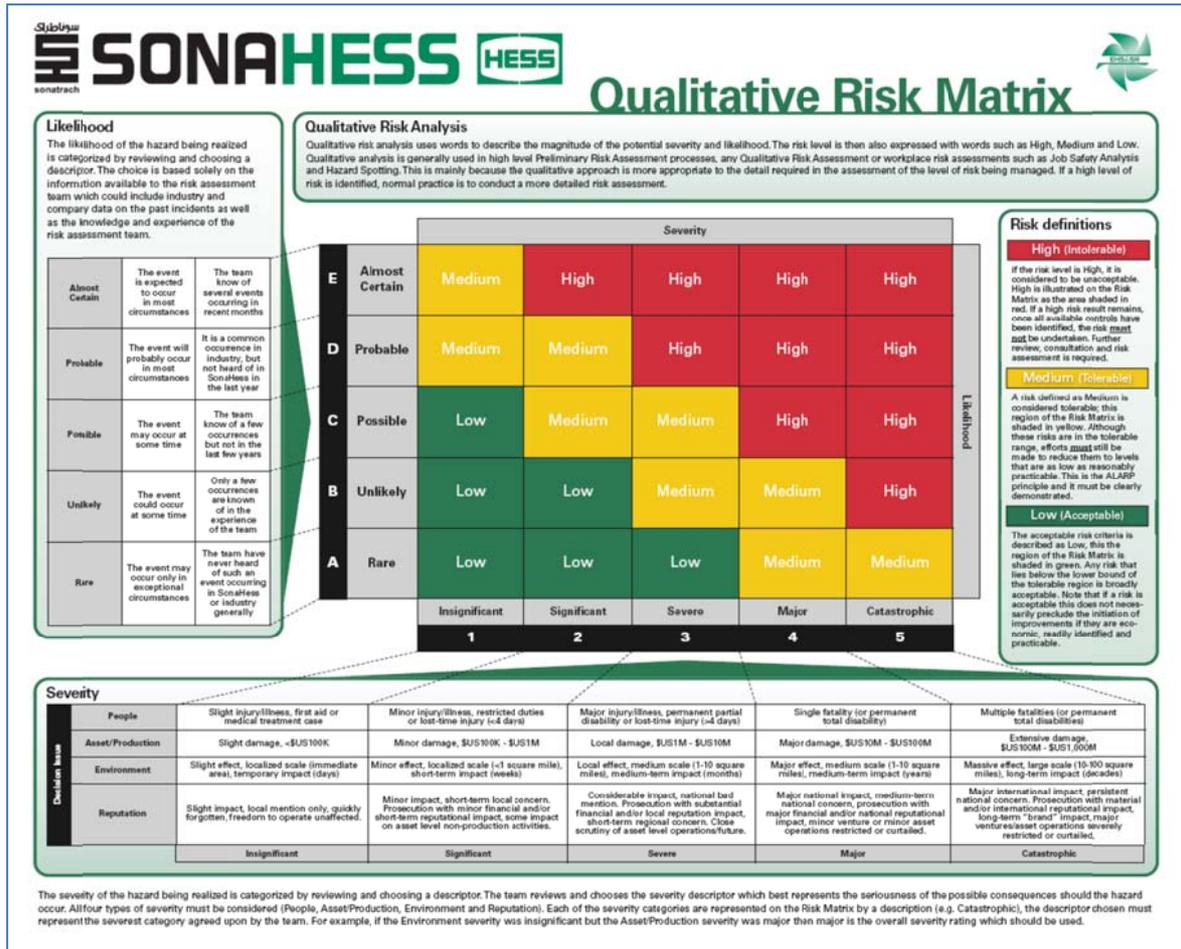


Figure 23 : Matrice qualitative du risque (Source : SONAHESS, 2009)

La cotation du risque (relatif à l'évènement redouté et aux conséquences), est obtenue par la définition la définition de la probabilité d'occurrence (axe des coordonnées) puis par la définition d'une classe de gravité (axe des abscisses).

Les classes de « Probabilité » sont au nombre de cinq (A : Rare ; B : Improbable ; C : Possible ; D : probable et E : Quasi-certain), chacune caractérisée par un ensemble de descripteurs que l'équipe d'évaluation analysera pour définir la classe de Probabilité.

Les classes de « Gravité » sont aussi au nombre de cinq (1 : Insignifiant ; 2 : Signifiant ; 3 : Sévère ; 4 : Majeur et 5 : Catastrophique), chacune caractérisée par un ensemble de descripteurs que l'équipe d'évaluation analysera pour définir la classe de Gravité.

Une fois les classes de probabilité et de gravité définies, leur produit, obtenu par projection au centre de la matrice définira le niveau de risque associé à l'évènement redouté ou à la conséquence analysés. Lequel niveau peut être faible, moyen ou élevé.

Le risque faible est qualifié dans la matrice comme étant « acceptable », il correspond à la zone « verte » dans la matrice. Si ce niveau de risque est obtenu, aucune action d'amélioration ne sera requise.

Le risque moyen est qualifié dans la matrice comme étant « tolérable », il correspond à la zone « jaune » dans la matrice. Si ce niveau de risque est obtenu, bien qu'il soit tolérable, des actions d'amélioration restent requises afin d'amener le risque à un niveau aussi bas que raisonnablement praticable (principe ALARP).

Le risque élevé est qualifié dans la matrice comme étant « intolérable », il correspond à la zone « rouge » dans la matrice. Si ce niveau de risque est obtenu, les opérations doivent être arrêtées, une réévaluation des risques est impérative pour définir en urgence des moyens de contrôle supplémentaires.

3.2.2. Approche adoptée pour l'analyse des descripteurs de probabilité et gravité :

Selon Lawrence (2007), il existe trois approches pour déterminer la signification d'un impact environnemental. Une approche technique (basée sur des analyses élémentaires puis une synthèse en se basant sur des méthodes techniques et scientifiques) une approche collaborative (basée sur les préoccupations et les attentes des parties prenantes et intéressées) et une approche d'argumentation raisonnée (basée sur jugement raisonnée soutenu par des évidences techniques et non-technique)

Cet auteur souligne qu'une combinaison d'approche est envisageable et même souhaitée pour pallier aux lacunes propres à chaque approche prise individuellement.

L'approche adoptée dans le présent travail est une combinaison des trois approches citées, il s'agit d'une approche d'argumentation raisonnée structurée par des seuils et appuyée à la fois par une analyse technique et une prise en compte inquiétude des membres du public.

4. Plan d'assurance et de contrôle qualité :

4.1. Procédure d'échantillonnage:

4.1.1. Stratégie et collecte d'information :

Après avoir procédé à la revue des données existantes sur la zone d'étude, des visites de reconnaissance ont été effectuées pour compléter les informations permettant de définir la stratégie d'échantillonnage qui cadre avec l'objectif de l'étude.

Ainsi il a été décidé de procéder comme suit :

- Pour la caractérisation du danger « éléments traces métalliques dans l'effluent eau de production », nous avons décidé de procéder à l'échantillonnage de l'eau de production au niveau des installations de traitement et réinjection
- Pour la caractérisation du danger « éléments traces métalliques dans l'effluent eau de production », nous avons décidé de procéder à l'échantillonnage des sédiments associés à l'eau de production
- Pour fournir une assise technique pour la cotation des risques associés aux conséquences, nous avons décidé de procéder à l'échantillonnage du sol et de la végétation

4.1.1.1. Echantillonnage de l'eau de production :

Dans chacune des deux installations de traitement et réinjection d'eau de production, nous avons procédé à des prélèvements au niveau des quatre points de prélèvement (figure 24) :

- Entrée du cyclo séparateur : P01
- Sortie du cyclo séparateur : P02
- Sortie du bac de stockage d'eau : P03
- Sortie du compartiment filtres : P04

Pour chaque point, un échantillon par jour fut prélevé pendant 03 jours consécutifs dans des bouteilles en polyéthylène blanches à bouchons blancs et fixé par HNO₃ à pH =2.

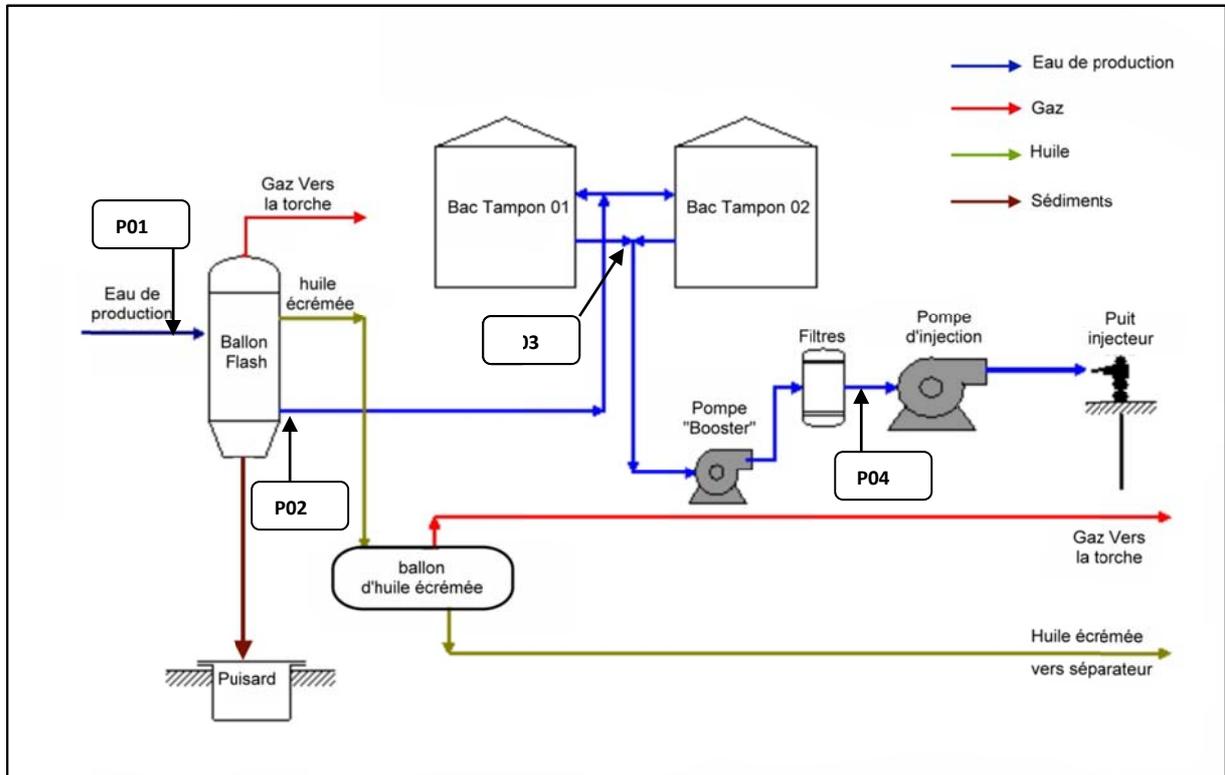


Figure 24 : localisation des points d'échantillonnage de l'eau de production

4.1.1.2. Echantillonnage des sédiments associés à l'eau de production :

L'échantillonnage des sédiments s'est effectué aux niveaux des bassins d'évaporation des centres de production : GS-01 (figure 25-1), Zotti (figure 25-2), AR-06 (figure 25-3) WA (Figure 25-4). Nous avons également procédé au prélèvement d'échantillon de sédiment dans le puisard d'eau de production du centre GS-01 (Figure 26).

A chaque fois, nous avons prélevé aléatoirement trois échantillons composés.



(1)



(3)



(2)



(4)

Figure 25 : localisation des points de prélèvement des échantillons de sédiments associés à l'eau de production au niveau des bassins d'évaporation

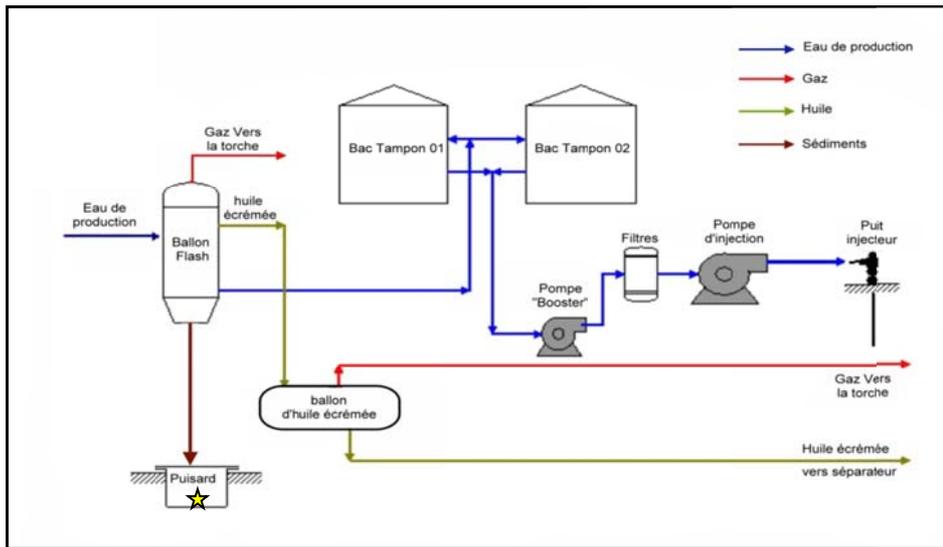


Figure 26 : localisation du point de prélèvement des échantillons de sédiment dans le puisard d'eau de production à GS-01

4.1.1.3. Echantillonnage du sol :

L'échantillonnage du sol s'est fait au niveau de deux zones. La première zone (Figure 27) se situe près des bassins d'évaporation d'El-Gassi (exposé aux déversements d'eau de production) où trois échantillons composés ont été prélevés aléatoirement. La seconde zone située dans le gisement d'El-Gassi (figure 28) est prise comme témoin. Un seul échantillon composé y a été prélevé.



Figure 27 : location du point de prélèvement des échantillons de sol dans la zone exposée aux déversements d'eau de production (El-Gassi)

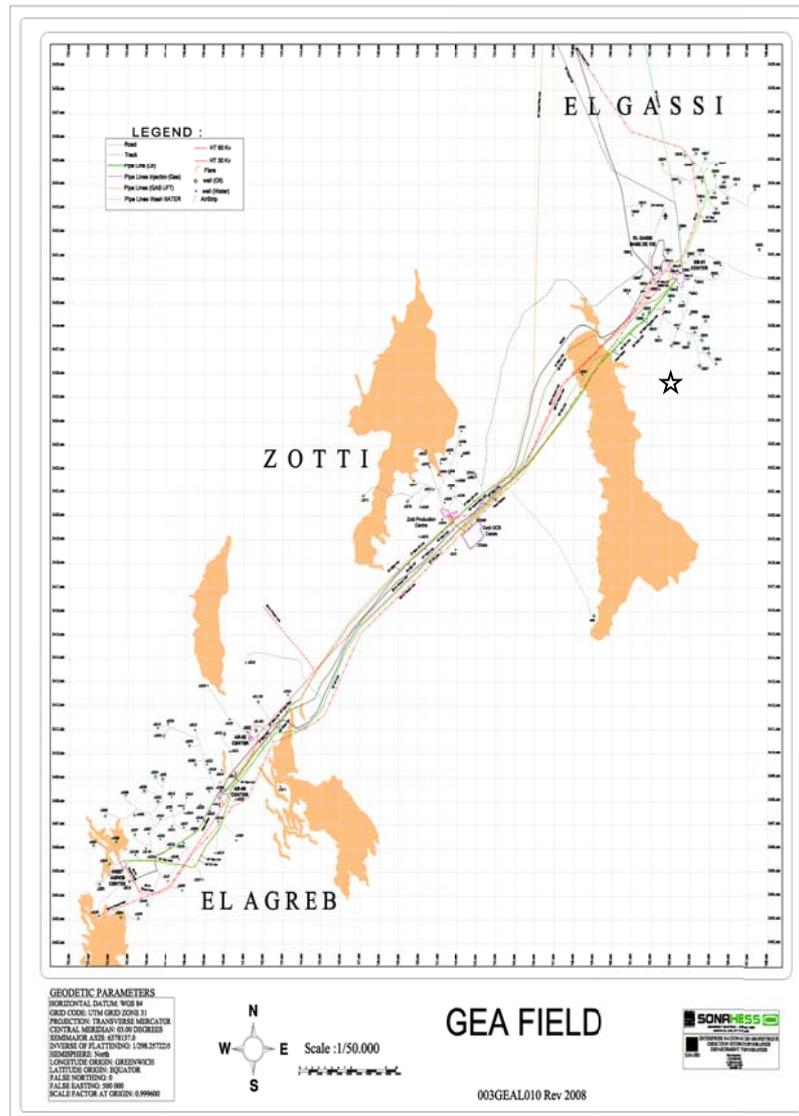


Figure 28 : localisation du point de prélèvement de l'échantillon du sol témoin

4.1.1.4. Echantillonnage de la végétation :

Les prélèvements étaient effectués dans deux zones (figure 29). La première est location près des anciens bourniers d'El-Gassi, la seconde à proximité du puits d'eau GSM-07. Pour chaque zone. Au niveau de chaque zone, nous avons fait des prélèvements de racine, tiges, feuilles et fruits pour obtenir trois échantillons composés de chaque organe.



Figure 29 : localisation des points de prélèvement de la végétation

4.2. Travail au laboratoire :

4.2.1. Eléments traces métalliques :

4.2.1.1. Echantillons de végétation :

L'extraction des ETM de la végétation suit la méthode de Perkin-Elmer qui consiste à peser 1g de végétation broyée dans un Becher de 100 ml, puis d'y ajouter 10 ml d'acide nitrique pur et de laisser agir pendant une nuit.

Au lendemain, le bécher est mis dans un bain de sable jusqu'à la disparition totale de la fumée rouge dégagée. Après refroidissement, 3 ml d'acide perchlorique sont ajoutés puis l'échantillon est remis dans le bain de sable jusqu'à l'obtention d'un petit volume.

Le contenu du bécher est filtré dans une fiole de 20 ml par du papier filtre sans cendre (Wattman 540). Le volume est ensuite ajusté par de l'eau distillée.

Les teneurs des éléments traces métalliques sont déterminées par spectrophotométrie d'absorption atomique à flamme de type PERKIN-ELMER. AAnalyst 100.

Lorsque les atomes d'un élément ont été excités, leur retour à l'état fondamental s'accompagne de l'émission de photons, de fréquence bien définie et propre à cet élément. Le même élément dispersé à l'état atomique dans une flamme possède également la propriété d'absorber tout rayonnement de même fréquence. Il en résulte une absorption du rayonnement incident liée à la concentration de l'élément considéré (Rodier et *al.* 2005). Avant de procéder au dosage des éléments métalliques dans les échantillons et pour établir les courbes d'étalonnage, des solutions étalons sont préparées pour chaque métal.

4.2.1.2. Echantillons d'eau de production :

Les échantillons d'eau destinés au dosage des métaux lourds, après acidification par l'HNO₃ Concentré jusqu'à un pH inférieur à 2, sont filtrés sur une membrane filtrante avec une porosité de 0.45 µm (membrane SARTORIUS) en utilisant une pompe à vide

4.2.1.3. Echantillons de sol et de sédiments :

La technique utilisée est une combinaison de deux méthodes (Rodier, 1984 ; Grumiaux et *al.* 1997). Il s'agit d'une minéralisation par calcination à 450°C en présence de nitrate d'ammonium suivie d'une solubilisation des métaux par un mélange de deux acides oxydants : l'acide nitrique et l'acide chlorhydrique.

Dans un creuset, 2ml de solution de nitrate d'ammonium sont ajoutés à 1g d'échantillons de terre. Le mélange est séché dans une étuve à 110°C. ensuite, le creuset est mis dans un four à mouffles et son contenu calciné par augmentation progressive de la température afin d'éviter les inflammations brutales de l'échantillon qui provoqueraient des pertes : soit à 150°C pendant 1heure, puis à 300°C pendant 1heure et enfin à 450°C pendant 2 heures, suite à quoi le four est éteint pendant toute la nuit pour le refroidissement de l'échantillon.

La solubilisation des métaux se fait en ajoutant 10 ml d'eau régale (mélange de 1volume d'acide nitrique pur avec 3 volumes d'acide chlorhydrique pur), ensuite le contenu du creuset est transvasé dans un bécher de 100 ml et porté à douce ébullition dans un bain de sable à 150°C pendant 2heures. Le résidu découvert est amené à sec puis repris deux fois par 10ml d'acide chlorhydrique 1N. Le liquide obtenu est transféré par filtration (papier Wattman sans cendres) dans une fiole de 50ml et complété avec l'eau distillée.

Les teneurs des éléments traces métalliques sont déterminées par spectrophotométrie d'absorption atomique à flamme de type PERKIN-ELMER. AAnalyst 100.

Lorsque les atomes d'un élément ont été excités, leur retour à l'état fondamental s'accompagne de l'émission de photons, de fréquence bien définie et propre à cet élément. Le même élément dispersé à l'état atomique dans une flamme possède également la propriété d'absorber tout rayonnement de même fréquence. Il en résulte une absorption du rayonnement incident liée à la concentration de l'élément considéré (Rodier et al. 2005). Avant de procéder au dosage des éléments métalliques dans les échantillons et pour établir les courbes d'étalonnage, des solutions étalons sont préparées pour chaque métal.

4.2.2. pH du sol :

Dans un bécher, 50 ml d'eau distillée sont ajoutés à 20 g de sol secs tamisés à 2 mm (Rapport 1/2.5). Après agitation pendant 2 minutes suivie d'une décantation pendant 30 minutes, le pH de l'échantillon est mesuré au niveau du surnageant (Rodier et al. 2005) à l'aide d'un pH mètre Modèle (WTW HI 8014) étalonné avec des solutions à pH 4.7 et 9 à 20°C (AFNOR, NFT 90-008, Avril 1953). Les lectures sont exprimées en unité pH.

4.2.3. Calcaire dans le sol :

Le calcaire total est déterminé selon la méthode du calcimètre de Bernard décrite par Duchauffour (1977). Cette technique est basée sur le dosage des carbonates dont la quantité est proportionnelle au volume du CO₂ dégagé lors de leur réaction avec l'acide chlorhydrique selon la réaction suivante : $\text{CaCO}_3 + 2\text{HCl} \rightarrow \text{CaCl}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$. Les résultats sont exprimés en mg/l de CT.

4.2.4. Conductivité du sol :

La conductivité électrique est un paramètre qui traduit par une estimation, la concentration des sels solubles dans un échantillon. Dans un bécher, 50 ml d'eau distillée sont ajoutés à 10 g de sédiments secs broyés et tamisés à 2 mm (rapport 1/5). Après agitation pendant 1 heure à l'aide d'un agitateur réglé à la vitesse 6, et après un temps de repos d'environ 30 minutes, l'échantillon est centrifugé par la suite pendant 2 minutes à 2000 tours / minute. La mesure de la conductivité électrique s'effectue sur le surnageant obtenu après

centrifugation à l'aide d'un conductimètre modèle (WTW HI 801). Les lectures sont exprimées en $\mu\text{S}/\text{cm}$.

4.2.5. Matière organique dans le sol :

Méthode de WALKLEY et BLAK

$$\% \text{ MO} = \% \text{ C} * 1.72$$

$$\% \text{C} = 4 (a - b) / a$$

a = N ml de Feso_4 ajoutés au blanc.

b = N ml de Feso_4 ajoutés à l'échantillon de sol.

4.3. Statistiques :

4.3.1. Test pour échantillon unique :

Le test pour échantillon unique a été utilisé lors des comparaisons faites entre les concentrations moyennes mesurées et les valeurs seuils ou références choisies. L'application de ce test c'est fait via le logiciel SPSS V17

4.3.2. ANOVA à 2 facteurs :

L'analyse de variance à 2 facteurs (zone et organe) a été utilisée pour comparer les concentrations en ETM des organes (racines, tiges, feuilles et fruits) de la végétation située en zone exposée aux déversements d'eau de production à celles des organes de la végétation se situant en zone non exposée aux déversements. Cette analyse est systématiquement suivie de test post-hoc pour définir les sous-ensembles homogènes. L'application s'est fait via le logiciel SPSS V17

Chapitre 04

Résultats & discussion

1. Identification du danger « Teneurs en ETM dans l’effluent –Eau de production- »

1.1. Caractérisation du danger :

1.1.1. Concentrations des ETM dans l’eau de production :

1.1.1.1. Installation de traitement et réinjection d’El-Gassi :

Le tableau 07 renseigne sur les concentrations moyennes des éléments traces métalliques étudiés (Cd, Pb, Zn et Cu) mesurées dans l’eau de production au niveau des différentes phases de traitement avant réinjection.

Tableau 07 : Comparaison entre les concentrations moyennes des ETM dans l’eau de production affluent vers El-Gassi et les limites de rejet d’effluents liquides industriels

lieu	point de prélèvement	Elément	seuil Décret exécutif 06-141 (mg.l ⁻¹)	concentration moyenne (mg.l ⁻¹)	Dépassement du seuil		
					Oui	Non	degré de signification
Centre GS-01	Amont cyclopes	Cd	0,2	0,5	x		**
		Pb	0,5	41,91	x		*
		Zn	3	50,07	x		*
		Cu	0,5	0,17		x	/
	Sortie cyclopes	Cd	0,2	0,46	x		***
		Pb	0,5	31,52	x		*
		Zn	3	69,67	x		*
		Cu	0,5	0,14		x	/
	Sortie bac tampon	Cd	0,2	0,44	x		***
		Pb	0,5	25,14	x		*
		Zn	3	74,25	x		*
		Cu	0,5	0,08		x	/
	Sortie filtres	Cd	0,2	0,4	x		**
		Pb	0,5	22,24	x		*
		Zn	3	50,1	x		***
		Cu	0,5	0,08		x	/

* : Différence significative ; ** : différence hautement significative ; *** : différence très hautement significative

Les résultats consignés dans le tableau 07 qu’à l’exception des concentrations moyenne mesurées pour le Cu, les concentrations moyennes des autres ETM (Cd, Pb et Zn) mesurées au niveau des différentes phases de traitement dépassent de manière significative à très hautement significative les seuils définis respectivement pour chacun.

De ce fait, nous dirons que le danger « Teneurs en ETM dans l'eau de production » est avéré pour l'eau affluant vers El-Gassi.

1.1.1.2. Installation de traitement et de réinjection d'El Agreb :

Le tableau 08 renseigne sur les concentrations moyennes des éléments traces métalliques étudiés (Cd, Pb, Zn et Cu) mesurées dans l'eau de production au niveau des différentes phases de traitement avant réinjection.

Tableau 08 : Comparaison entre les concentrations moyennes des ETM dans l'eau de production affluant vers El-Agreb et les limites de rejet d'effluents liquides industriels

lieu	point de prélèvement	Elément	seuil mg.l ⁻¹ (Decertexecut if 06-141)	concentration moyenne (mg.l ⁻¹)	Dépassement du seuil		
					Oui	Non	degré de signification
Centre WA	Amont cyclosep	Cd	0,2	0,41	x		**
		Pb	0,5	31,24	x		*
		Zn	3	76,68	x		***
		Cu	0,5	0,12		x	***
	sortie cyclosep	Cd	0,2	0,39	x		**
		Pb	0,5	24,91	x		*
		Zn	3	68,1	x		**
		Cu	0,5	0,1		x	***
	sortie bac tampon	Cd	0,2	0,37	x		**
		Pb	0,5	18,48	x		**
		Zn	3	56,37	x		*
		Cu	0,5	0,08		x	***
	sortie filtres	Cd	0,2	0,32	x		*
		Pb	0,5	17,14	x		**
		Zn	3	42,49	x		*
		Cu	0,5	0,07		x	***

* : Différence significative ; ** : différence hautement significative ; *** : différence très hautement significative

Les résultats consignés dans le tableau 08 qu'à l'exception des concentrations moyenne mesurées pour le Cu, les concentrations moyennes des autres ETM (Cd, Pb et Zn) mesurées au niveau des différentes phases de traitement dépassent de manière significative à très hautement significative les seuils définis respectivement pour chacun.

De ce fait, nous dirons que le danger « Teneurs en ETM dans l'eau de production » est avéré pour l'eau affluant vers El-Agreb.

1.1.2. Concentrations des ETMS dans les sédiments :

Le tableau 09 renseigne sur les concentrations moyennes des éléments traces métalliques étudiés (Cd, Pb, Zn et Cu) mesurées au niveau des différents lieux d'accumulation de sédiments associés à l'eau de production.

Tableau 09 : Comparaison entre les concentrations moyennes des ETM dans les sédiments associés à l'eau de production et les valeurs limites dans les déchets

Lieu	Elément	seuil (arrêté du 02 02 1998 modifié et complété-mg.kg ⁻¹)	concentration moyenne (mg.kg ⁻¹)	Dépassement du seuil		
				Oui	Non	degré de signification
puisard GS-01	Cd	10	10		x	N.S
	Pb	800	19523,81	x		*
	Zn	3000	794		x	**
	Cu	1000	50,76		x	***
bassins GS-01	Cd	10	2,12		x	**
	Pb	800	2238,1	x		**
	Zn	3000	188,69		x	***
	Cu	1000	3,79		x	***
Bassins Zotti	Cd	10	0,91		x	***
	Pb	800	129,22		x	***
	Zn	3000	97,15		x	***
	Cu	1000	0		x	N/A
Bassins AR-06	Cd	10	0,76		x	**
	Pb	800	59,81		x	**
	Zn	3000	279,79		x	***
	Cu	1000	0		x	N/A
BassinsWA	Cd	10	0,6		x	**
	Pb	800	57,14		x	***
	Zn	3000	52,07		x	***
	Cu	1000	0		x	N/A

N/A : Test T pour échantillon unique non applicable en raison de l'absence de différence entre les concentrations relatives au trois échantillons prélevés. N.S : Différence non significative ;

* : Différence significative ; ** : différence hautement significative ; *** : différence très hautement significative

Les résultats consignés dans le tableau 09 nous permettent de dégager les constatations suivantes :

Au niveau du puisard d'eau de production du centre GS-01, les concentrations moyennes en Zn et Cu restent en deçà des valeurs seuils définies, la différence étant hautement significative pour Zn et très hautement significative pour Cu. La concentration moyenne du Cd est égale au seuil défini, et enfin la concentration moyenne du Pb dépasse de manière significative celle défini comme seuil. Donc, nous dirons que le danger « Teneurs en ETM dans les sédiments » est avéré au niveau du puisard d'eau de production du centre GS-01.

Au niveau des bassins d'évaporation du centre GS-01, les concentrations moyennes relatives aux Cd, Zn et Cu sont en deçà des seuils définis, les différences étant respectivement hautement significative pour Cd et très hautement significatives pour Zn et Cu. Par contre la concentration moyenne en Pb dépasse de manière hautement significative celle définie comme seuil. Donc, nous dirons que le danger « Teneurs en ETM dans les sédiments » est avéré au niveau des bassins d'évaporation du centre GS-01.

Au niveau des bassins d'évaporation du centre de production Zotti, les concentrations moyennes relatives aux quatre éléments étudiés reste en deçà des seuils respectifs définis. Donc, nous dirons que le danger « Teneurs en ETM dans les sédiments » n'est pas avéré au niveau des bassins d'évaporation du centre de production Zotti.

Au niveau des bassins d'évaporation du centre de production AR-06, les concentrations moyennes relatives aux quatre éléments étudiés reste en deçà des seuils respectifs définis. Donc, nous dirons que le danger « Teneurs en ETM dans les sédiments » n'est pas avéré au niveau des bassins d'évaporation du centre de production AR-06.

Au niveau des bassins d'évaporation du centre de production WA, les concentrations moyennes relatives aux quatre éléments étudiés reste en deçà des seuils respectifs définis. Donc, nous dirons que le danger « Teneurs en ETM dans les sédiments » n'est pas avéré au niveau des bassins d'évaporation du centre de production WA.

1.2. Identification des sources du danger :

Si l'on se réfère au diagramme de flux du procédé « eau de production », nous pouvons supposer 03 sources possibles des contaminants, à savoir : le gisement, les tubes de conduites (de production et de réinjection) ainsi que les additifs chimiques.

1.2.1. Hypothèse « tubes de conduites comme source des ETM » :

Cette hypothèse suppose la présence des éléments traces métalliques étudiés dans la composition chimique des tubes de conduite et leur libération suite à une corrosion progressive du tube. Les tableaux 10 et 11 correspondent respectivement aux compositions chimiques relatives aux tubes des conduites de production (type ASTM A 106-95, consignées dans la première ligne du tableau 10) et ceux des conduites d'injection (Type API 5 L, consignées dans la dernière ligne du tableau 11).

Tableau 10 : spécifications du tube des conduites de production type ASTM A 106-95 (Source : Trouvay & Cauvin, 1998)

ASTM A 106-95										
Tube acier au carbone sans soudure pour service à haute température										
Composition chimique en %										
Nuance	C	Mn	S	P	Si	Cr	Cu	Mo	Ni	V
	Maxi (a)		maxi	maxi	mini	Maxi (b)				
A	0,25	0,27 à 0,93	0,035	0,035	0,10	0,40	0,40	0,15	0,40	0,08
B	0,30	0,29 à 1,06	0,035	0,035	0,10	0,40	0,40	0,15	0,40	0,08
C	0,35	0,29 à 1,06	0,035	0,035	0,10	0,40	0,40	0,15	0,40	0,08
(a) Pour chaque réduction de 0,01% en-dessous de la teneur maximale spécifiée en carbone, la teneur en manganèse peut être augmentée de 0,06 % au-dessus de maximum spécifié, sans pouvoir dépasser 1,35%										
(b) La teneur de ces cinq éléments combinés ne doit pas dépasser 1%										

Tableau 11 : spécifications du tube des conduites d'injection type API 5L (Source : Trouvay & Cauvin, 1998)

API 5L					
Type de tube sans soudure	Nuance	Carbone	manganèse	phosphore	Soufre
		Max%	Max%	Max%	Max%
Non-expansé ou expansé à froid	A	0,22	0,90	0,030	0,030
	B	0,27	1,15	0,030	0,030
Non-expansé	X42	0,29	1,25	0,030	0,030
	X46, X52	0,31	1,35	0,030	0,030
Expansé à froid	X42, X46, X52	0,29	1,25	0,030	0,030
Non-expansé ou expansé à froid	X56, X60	0,26	1,35	0,030	0,030
	X65, X70, X80	(par accord)			

Nous y notons l'absence des éléments traces métallique étudiés mis à part le Cu qui est l'un des constituants du tube de conduite de production. Néanmoins nous avons déjà vu

que la concentration de cet élément ne dépasse pas le seuil défini aussi bien dans l'eau de production affluant vers El-Gassi qu'au niveau de celle affluant vers El-Agreb.

Par conséquent l'hypothèse qui considère les tubes de conduites comme source d'ETM est à écarter.

1.2.2. Hypothèse « additifs chimiques comme source des ETM » :

Cette hypothèse suppose la présence des éléments traces métalliques étudiés dans la composition chimiques des additifs utilisés et ils sont incorporés dans le procédé lors de l'injection de ces additifs. La liste des additifs chimiques injectée tout au long du flux du procédé « eau de production » est consignée dans le tableau 12

Tableau 12 : Composition chimique des additifs utilisé dans le flux de procédé « eau de production »

Code produit	Usage	Composition chimique
CRO80147	Inhibiteur de corrosion	1,2,4-TRIMETHYLBENZENE ; ALKYL BENZENES (C9-10) ; AMIDE/IMIDAZOLINES; ETHOXYLATED TALL OIL; MESITYLENE; NAPHTHALENE; PROPAN-2-OL
CRW82353	Inhibiteur de corrosion / dépôt	Polyphosphatebasedchemistry
CRW82600	Inhibiteur de corrosion	SODIUM HYDROXIDE ; SODIUM NITRITE
CRW83133	Inhibiteur de corrosion	ETHANEDIOL ; 2-(2-BUTOXYETHOXY)ETHANOL ; TALL OIL ROSIN; QUATERNARY AMMONIUM COMPOUND; AMINE ALKOXYLATE
DMO86441	Dés-émulsifiant	SODIUM ALKYL BENZENE SULPHONATE ; OXYALKYLATED AMINES ; 1,2,4-TRIMETHYLBENZENE; ALKYL (C3-4) BENZENES; ALKYL BENZENES (C9-10)
HIW85330	Inhibiteur d'hydrate	2-BUTOXYETHANOL ; ALIPHATIC ALCOHOLS ; ETHANEDIOL ; ETHANOL
OSW80490	Scarificateur d'oxygène	AMMONIUM BISULPHITE
PAO80033	Tensioactif (dispersant de paraffine)	2-AMINOETHANOL
PAO80072	Dispersant d'asphaltes	ALKYLBENZENE SULPHONIC ACID, TOLUENE
PAO80100	Solvant de paraffine	Aliphatic and Naphtenichydrocarbon
RBW85608	Coagulant	Chlorure polyallumine
SCW85372	Inhibiteur de dépôt	2-AMINOETHANOL
SCW85488	Inhibiteur de dépôt	Sels d'acide phosphorique
XC80120	Biocide	Sel de phosphonium quaternaire
XC80209	Bactéricide	GLUTARALDEHYDE ; METHANOL ; FORMALDEHYDE

Les composants chimiques consignés dans le tableau 12 confirme l'absence des éléments traces métalliques étudiés. Par conséquent, l'hypothèse qui considère les additifs chimiques comme source des ETM est à écarter.

1.2.3. Hypothèse « gisement » comme source des ETM » :

Par élimination, la seule source probable des éléments traces métallique étudiés reste le Gisement. Cette hypothèse est confortée par les résultats consignés dans le tableau 13 et qui correspondent aux résultats d'analyse d'échantillons de fond d'eau de formation prélevés sur différents puits producteurs d'huile entre 2002 et 2011, donc bien avant le début de la réinjection d'eau de production.

Tableau 13 : composition chimique l'eau de formation dans les gisements de GEA (Source : Sonahess, 2002)

Well location	AR6	AR6	AR45	GS 22	GS 22
Sample location	D/H sample	D/H sample	D/H sample	D/H sample	D/H sample
Samplingdepth	3090.4m	3085.1m	3143.8m	3319.5m	3319.5m
Samplingdate	21-juin-01	21-juin-01	04-août-01	19-févr-02	19-févr-02
Cylindernumber			Cyl A369002	Cyl 369002	Cyl 369017
Parameter / concentration	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)
Sodium	93 400	90 150	90 840	75 740	71 920
Potassium	2 003	2 011	2 440	2 660	2 550
Calcium	16 650	16 450	22 620	36 290	36 310
Magnesium	5 442	5 356	6 700	7 410	7 050
Barium	12	12	9	545	485
Strontium	328	323	390	885	840
Iron II	1 473	1 225	1 560	2 650	2 570
Chloride	193 290	187 300	204 540	209 660	210 250
Bromide			830	2 110	
Sulphate	336	334	180	15	17
pH measured (unit)	2,30	2,90	5,31	4,67	3,33
Phosphorus			2	<1	
Boron			25	26	25
Aluminium			<2	<2	<2.5
Zinc			195	190	
lead			53	37	
Manganese			180	300	
Iodide			10	<10	
Ammonium			135	NA	
TDS	312 934	303 161	329 470	338 002	331 992

En effet, les résultats consignés dans le tableau 13, confirment la présence de Zn et Pb dans le gisement. Ces derniers pourraient être acheminés vers la surface suite au phénomène d'oxydation des minéraux sulfurés, connus pour être abondant dans le gisement, d'ailleurs, le pH acide de l'eau de formation est un bon indicateur de la présence de ce phénomène. La figure 30 illustre par exemple la présence de galène (sulfure de Pb) dans un dépôt au niveau du puits GS-15 converti ultérieurement en puits injecteur d'eau de production.

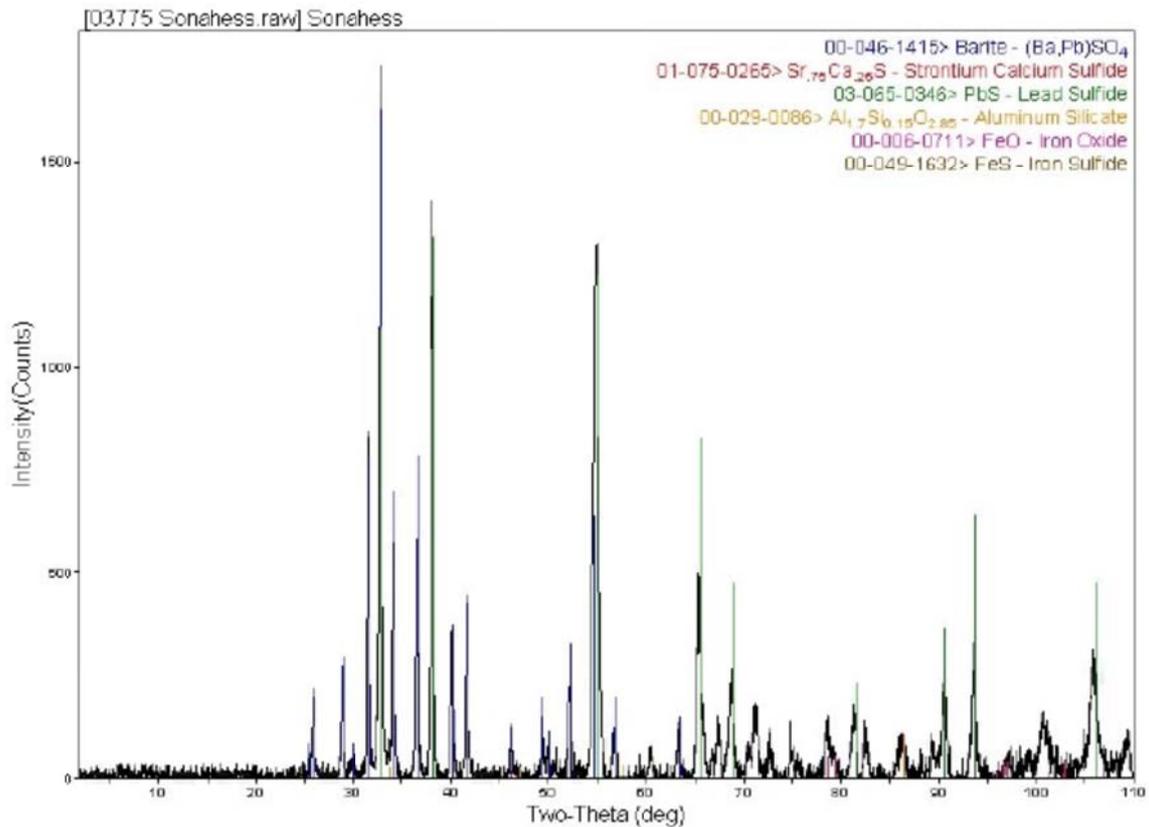


Figure 30 : Analyse minéralogique par DRX d'un dépôt au niveau du puits GS-15 (Source : TRICAN, 2009)

2. Définition de l'évènement redouté :

A l'issue de toutes les informations collectées dans ce travail (littérature & zone d'étude), et après avoir identifié le danger. Nous avons défini les évènements redoutés suivants :

1. Débordement d'eau de production dans les bassins d'évaporation d'El-Gassi
2. Infiltration de l'eau de production à travers la membrane des bassins d'El-Gassi
3. Communication entre l'eau de production et les eaux souterraines lors de la réinjection au niveau d'El-Gassi
4. Perte de confinement dans la ligne d'injection d'eau de production d'El- Gassi
5. Débordement d'eau de production dans les bassins d'évaporation d'El-Agreb
6. Infiltration de l'eau de production à travers la membrane des bassins d'El-Agreb
7. Communication entre l'eau de production et les eaux souterraines lors de la réinjection au niveau d'El-Agreb
8. Perte de confinement dans la ligne d'injection d'eau de production d'El-Agreb

Dans le présent travail nous allons procéder à l'analyse du premier évènement redouté, à savoir « Débordement d'eau de production dans les bassins d'évaporation d'El-Gassi »

2.1. Identification des menaces :

Pour cet évènement, nous avons identifié 02 menaces : la première est que l'eau de production déchargée dans un bassin sous-dimensionné. La seconde est que l'eau de production soit déchargée dans un bassin dont la capacité utile est réduite par l'accumulation de solide.

2.2. Identification des conséquences :

Parmi les 10 composantes de l'environnement tel que défini par la loi 03-10 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable, 05 sont susceptibles d'être présentes et affectées par l'évènement « *Débordement de l'eau de production dans les bassins d'évaporation d'El-Gassi* », à savoir : l'eau, le sol, le sous-sol, la faune et la flore (tableau 14)

Tableau 14: Composantes susceptibles d'être présentes et affectées par l'évènement redouté N°1

Composantes de l'environnement définies par la Loi 03-10	Composante susceptible d'être présente et affectée par l'évènement redouté N°1		Observation
	Oui	Non	
Air		X	
Atmosphère		X	
Eau	X		Eau souterraine
sol	X		
Sous-sol	X		
Faune	X		Micro-organismes du sol/ invertébrés du sol/ mammifères/ peuplement avien.
Flore	X		Une espèce végétale présente (<i>Oudneya africana</i>)
sites		X	
Paysages		X	
Monuments naturels		X	

2.3. Identification des barrières existantes :

2.3.1. Barrières proactives et facteurs aggravants :

2.3.1.1. Menace 01 :

Pour la première menace identifiée (l'eau de production déchargée dans un bassin sous-dimensionné), la barrière identifiée est « Dimensions conçues en fonction de la quantité d'eau de production prévue par les calculs procédés », il s'agit de barrière « critique » mais avec une efficacité « faible ». Cette faible efficacité est due à un facteur aggravant qui est « augmentation du volume d'eau de production déchargée sans redimensionnement des bassins existant » et à un contrôle défaillant de ce facteur aggravant par une mauvaise gestion du changement (figure 31).

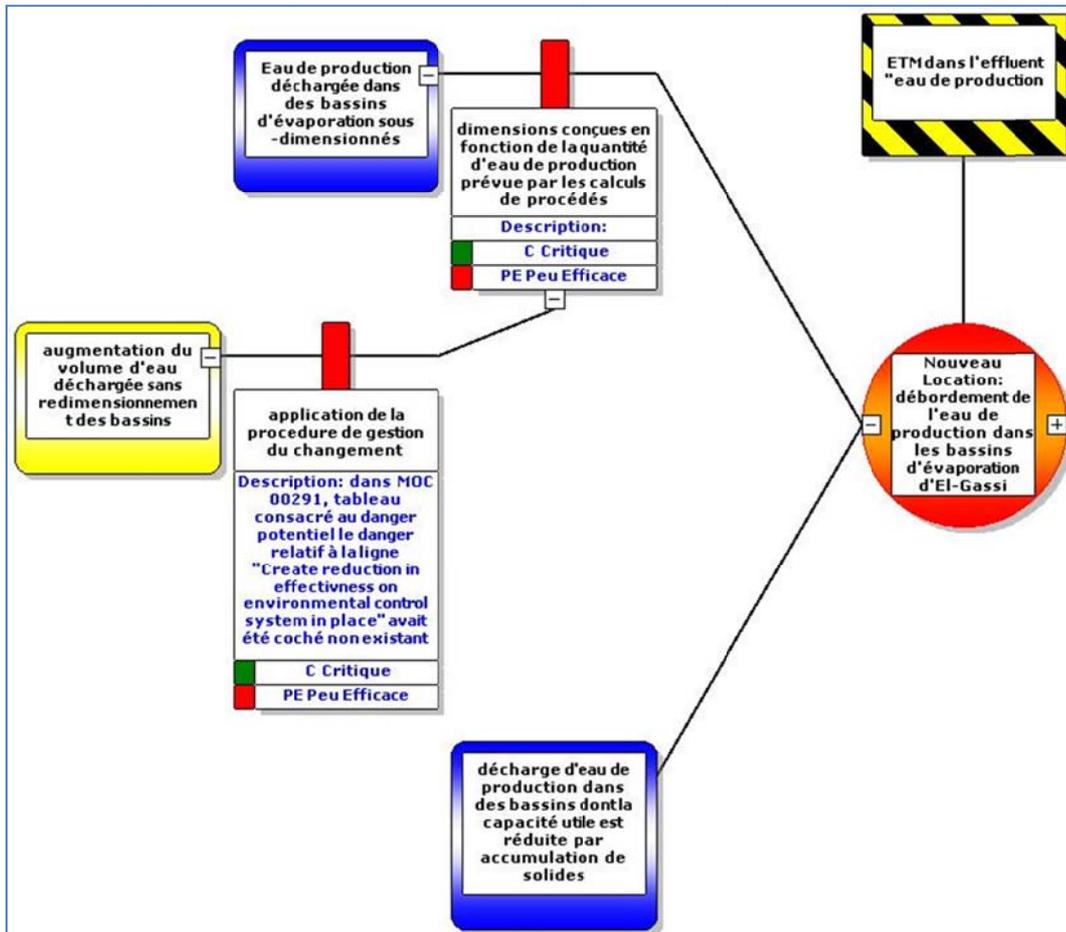


Figure 31 : Menaces, barrières proactive

En effet, depuis 2011 (début de l'injection d'eau de production au niveau d'El-Gassi), l'eau de production du gisement Zotti est acheminée (en mélange avec l'huile) vers la séparation LP du centre GS-01 afin d'y être séparée.

Ce changement (Réf MN-MOC-00291), fait conformément la procédure de gestion du changement, a négligé cependant la prise en charge de l'eau de production supplémentaire lors de non disponibilité de l'injection. Autrement dit, les bassins d'évaporation du centre GS-01, conçus initialement pour contenir l'eau de production du gisement d'El-Gassi, devraient avec la même capacité contenir l'eau de production affluant des gisements d'El-Gassi et de Zotti.

2.3.1.2. Menace 02 :

Pour la seconde menace identifiée (décharge de l'eau de production dans des bassin dont la capacité utile est réduit par l'accumulation de solides (sédiments), nous avons noté l'absence de barrières de control en place.

2.3.2. Barrières réactives et facteurs aggravants :

Pour les conséquences définies, nous avons noté l'absence de barrières de contrôle.

2.4. cotation du risque :

2.4.1. Risque associé à l'évènement redouté:

2.4.1.1. Probabilité d'occurrence :

Le sol environnant les bassins d'évaporation d'El-Gassi atteste de l'occurrence de débordement d'eau de production, durant le deuxième semestre 2013, deux débordements d'eau de production ont été rapportés (Synergi case 12008 et Synergi case 12386). Donc, la probabilité d'occurrence conformément à la matrice des risque de SONAHCESS serait « E : Quasi-certain ».

2.4.1.2. Gravité :

Nous avons vu dans le tableau 07 que les concentrations moyennes en Cd, Pb et Zn de l'eau de production affluent vers El-Gassi étaient supérieures aux seuils définis correspondant aux valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels définies par le décret exécutif 06-141 (JOARDP 26, 2006).

L'article 04 du décret exécutif 06-141 stipule que toutes installations générant des rejets d'effluent liquides industriels doivent être conçues, construites et exploitées de manière à ce que leurs rejets d'effluents liquides industriels ne dépassent à la sortie de l'installation les valeurs limites de rejet définie par ce décret et doivent être doté d'un dispositif de traitement approprié de manière à limiter la charge de pollution rejetée.

L'article 05 du même décret, rajoute que les installations de traitement doivent être conçues, exploitées et entretenues de manière à réduire à leur minimum les durées d'indisponibilité pendant lesquelles elles ne peuvent assurer pleinement leur fonction. L'article 05 précise que si une indisponibilité est susceptible de conduire à un dépassement des valeurs limites imposées, l'exploitant doit prendre les dispositions nécessaires pour réduire la pollution émise en réduisant ou en arrêtant, si besoin les activités concernées.

Donc, au vu de ce qui vient d'être mentionné, et vu le fait que les bassins d'évaporation d'El-Gassi ne soient plus conçus pour contenir l'eau de production affluent vers El-Gassi, nous pouvons considérer que tout débordement d'eau de production constitue en lui-même une non-conformité à l'article 04 du décret exécutif 06-141.

Face à cette situation, et conformément à l'article 05 du même décret, la prévention du débordement d'eau de production s'impose, et considérant les moyens actuels de gestion

de l'eau de production, ceci ne peut être obtenu que par deux options, la première est la reprise de la réinjection avant débordement et la seconde est la fermeture progressive des puits producteurs au niveau des gisements d'El-Gassi et de Zotti, ce qui impliquerait une restriction sévère des opérations aux champs induisant une perte de production dépassant les 10M\$, ce qui correspond à une échelle de gravité 4 soit « Majeur ».

Donc, le risque associé à l'évènement redouté « débordement de l'eau des bassins d'évaporation d'El-Gassi » a une cotation « **4E** », ce qui le qualifie d'élevé.

2.4.2. Risques associés aux conséquences :

2.4.2.1. Conséquence 01 « contamination du sol & sous-sol » :

2.4.2.1.1. Probabilité d'occurrence :

Afin d'apprécier la probabilité d'occurrence d'une contamination du sol par les éléments traces métalliques suite aux débordements d'eau de production dans les bassins d'El-Gassi, nous avons comparés les concentrations moyennes en ETM mesurées au niveau du sol présentant des traces de déversement d'eau de production avec celles mesurées au niveau d'un Solon exposé aux déversements d'eau de production. Ce sol sera qualifié de « non exposé ». Avant de discuter les résultats de comparaison entre les concentrations moyennes en ETM du sol « exposé » aux déversements d'eau de production et celui « non exposé ». Nous avons jugé utile de présenter les résultats d'analyse des paramètres physico-chimiques des deux sols. Lesquels résultats peuvent être utilisés lors de la comparaison des concentrations relatives aux ETM.

a. Paramètres physico-chimiques :

Les paramètres physico-chimiques relatifs au sol « exposé » aux déversements d'eau de production ainsi que du sol « non exposé » sont consignés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 15 : paramètres physico-chimiques des sols exposé et non exposé aux déversements d'eau de production d'El-Gassi

Paramètre	Sol exposé aux déversements d'eau de production					Sol non exposé
	Statistiques descriptives					
	n	Min	Max	Moyenne	Ecart Type	
pH	3	4,79	5,38	5,1467	0,31374	7,7
CaCo₃ total (%)	3	0,08	0,56	0,2933	0,24440	0,56
C.E (mS/cm)	3	4,78	26,70	13,2167	11,79929	0,1733
M.O (%)	3	5,55	6,69	6,1433	0,57143	0

Le pH :

La valeur moyenne du pH relative au sol exposé aux déversements d'eau de production est de 5,15 ce qui classe ce sol dans le domaine de pH « peu acide » (référentiel pédologique cité par Baize, 1988). Nous notons une acidification par rapport au sol non exposé qui avec un pH de 7,7 s'intègre dans le domaine de pH « basique ».

Il nous paraît probable que le caractère « acide » de l'eau de production (valeur moyenne de 4,6) soit à l'origine de cette baisse de pH. Laquelle baisse augmente le risque de mobilité des ETM, donc de biodisponibilité ou de migration vers la nappe. En effet, plusieurs auteurs s'accordent à dire qu'à un $\text{pH} > 6,5$ tous les ETM deviennent non disponibles.

Le Calcaire total :

La valeur moyenne du calcaire total relative au sol exposé aux déversements d'eau de production est de 0,24% ce qui lui attribue le caractère « non calcaire ». Ce faible taux de calcaire total est plutôt dû à la nature géologique du site qu'à un quelconque effet de l'eau de production car le sol non exposé s'intègre dans la même catégorie (non calcaire).

La Conductivité électrique :

La valeur moyenne de la conductivité électrique relative au sol exposé aux déversements d'eau de production est de 13,22 mS/cm ce qui correspond à la classe de salinité « modérément salin » (USDA NRCS, 2011). Par comparaison au sol non exposé aux déversements d'eau de production dont la Conductivité électrique est de 0,17 mS/cm lui octroyant le caractère « non salin » (USDA NRCS, 2011).

Donc, il est probable qu'une salinisation du sol exposé aux déversements d'eau de production soit induite par la salinité caractéristique de cette dernière.

b. Les éléments traces métalliques :

Les résultats de comparaison entre les concentrations moyennes en ETM du sol exposé aux déversements d'eau de production d'El-Gassi à celles relatives à un sol non exposé sont consignés dans le tableau ci-dessous

Tableau 16 : comparaison entre les concentrations moyennes en ETM du sol exposé au déversement d'eau de production et un sol non exposé

Paramètre	Sol exposé aux déversements d'eau de production					Sol non exposé	Test t pour échantillon unique
	Statistiques descriptives						
	n	Min (mg.kg ⁻¹)	Max (mg.kg ⁻¹)	Moyenne (mg.kg ⁻¹)	Ecart Type		
Cd	3	0,00	0,45	0,15	0,25981	0,00	N.S
Cu	3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	N/A
Pb	3	221,43	314,29	261,9067	47,56124	< 50,00 ⁽¹⁾	*
Zn	3	48,68	67,40	56,7567	9,62031	0,22	**

(1) : le résultat est obtenu à partir de la concentration calculée par l'équation de la droite d'étalonnage du Plomb avec une absorbance de 0.004 était de 28,57 mg.kg⁻¹, or l'absorbance relative à la plus petite concentration utilisée dans l'élaboration de la courbe d'étalonnage est de 0,007 qui correspond à une concentration de sol de 50 mg.kg⁻¹. Donc, il est plus correct de dire que la concentration en Pb du sol non contaminé est < 50 mg.kg⁻¹.

N/A : test non applicable car il la moyenne est nulle ; N.S : différence non significative ; * : différence significative ; ** : différence hautement significative

Le cadmium :

La concentration moyenne du Cd dans le sol exposé aux déversements d'eau de production est de 0,15 mg.kg⁻¹, elle ne présente pas de différence significative par rapport au sol « non exposé » qui n'en contient pas (concentration moyenne 0,00mg.kg⁻¹).

Néanmoins, nous pouvons supposer un apport de Cd dans le sol sujet aux déversements, dont la source la plus probable serait l'eau de production qui déborde des bassins d'évaporation d'El-Gassi.

Deux mécanismes d'apport du Cd sont envisageables : le premier mécanisme est l'apport direct du Cd contenu dans l'eau de production au point de rejet (concentration moyenne 0,5 mg/l) ; le second est l'apport du Cd contenu dans l'eau de production avec relargage du Cd contenu dans les sédiments des bassins d'évaporation d'El-Gassi (concentration moyenne 2,12 mg.kg⁻¹).

Donc, ce qu'il convient de retenir, est que la concentration moyenne actuelle en Cd du sol exposé aux déversements d'eau de production ne permet pas de parler de contamination par le Cd. Laquelle contamination devient effective à partir de 0,22 mg.kg⁻¹ pour les sols sableux (KabataPendias et Pendias, 1999 in Kabata-Pendias&Mukherjee, 2007).

Le cuivre :

Les résultats du tableau 16 indiquent le sol exposé aux déversements d'eau de production ne contient pas de cuivre.

Nous avons vu que les concentrations moyennes du Cu mesurées dans l'eau de production d'El-Gassi (Tableau 07) et les sédiments des bassins d'évaporation d'El-Gassi (tableau 09) correspondent respectivement aux valeurs 0,17 mg.l⁻¹ et 3,79 mg.kg⁻¹.

L'absence de Cu dans le sol exposé aux déversements d'eau de production d'El-Gassi, pourrait selon nous être expliquée de manières : soit les sédiments des bassins d'El-Gassi ont joué le rôle de filtre pour le Cu, soit ce dernier a été apporté par l'eau déversée puis a migré en profondeur vu les conditions favorable du pH relative au sol exposé aux déversements d'eau de production (pH = 5,2).

Dans un cas comme dans l'autre, nous ne pouvons parler de contamination du sol par le Cu suite aux déversements d'eau de production. Nous dirons même que d'un point de vue agronomique, ce sol présente une carence en Cu qui est admise selon Kabata-Pendias & Mukherjee (2007) pour toute concentration inférieure à 10 mg.kg⁻¹.

Le plomb :

La concentration moyenne du Pb dans le sol exposé aux déversements d'eau de production est de 261,91 mg.kg⁻¹. Considérant le fait que cette concentration moyenne soit significativement supérieure à celle du sol non exposé aux déversements d'eau de production (28,57 mg.kg⁻¹), nous pouvons parler d'apport de Pb par les déversements d'eau de production.

Considérant le fait que les concentrations moyennes en Pb de l'eau de production de GS-01 ainsi que des sédiments contenus dans les bassins d'évaporation correspondent respectivement à 41,91 mg/l et 2238,1 mg.kg⁻¹, nous dirons qu'il est probable que cet apport en Pb soit sous forme dissoute (Pb originellement dissous dans l'eau de production ou relargué par les sédiments des bassins d'évaporation) ou encore sous forme particulaire (scénario envisagé surtout pour le Pb fixé sous forme d'oxydes ou de silicates).

Il convient également de souligner que la concentration moyenne en Pb du sol exposé aux déversements d'eau de production dépasse de manière significative les valeurs de 100 et 110 mg.kg⁻¹, correspondant respectivement à la valeur traduisant une pollution par le Pb selon Agelone & Bini (1992) cité par Kabata-Pendias&Mukherjee (2007), et à la valeur traduisant l'existence d'une source polluante à proximité selon Juste et al (1995) cité par Kadem (2005). Enfin, la concentration moyenne en Pb du sol exposé aux déversements d'eau de production (261,91 mg.kg⁻¹) s'intègre dans la gamme de concentration 100-500 mg.kg⁻¹, laquelle gamme est généralement admise comme étant excessive pour les plantes (Kabata -Pendias&Pendias, 2001 in Kabata-Pendias&Mukherjee, 2007).

Donc, nous pouvons dire que les déversements de l'eau de production suite aux débordements des bassins d'El-Gassi ont induit une contamination du sol par le Pb.

Le zinc :

La concentration moyenne du Zn dans le sol exposé aux déversements d'eau de production est de 56,76 mg.kg⁻¹. Cette moyenne dépasse de manière hautement significative celle relative au sol non exposé (0,22 mg.kg⁻¹).

Considérant le fait que les concentrations moyennes en Zn de l'eau de production de GS-01 ainsi que des sédiments contenus dans les bassins d'évaporation correspondent respectivement à 50,07 mg/l et 188,69 mg.kg⁻¹, nous dirons qu'il est probable que cet apport en Zn soit sous forme dissoute (Zn originellement dissous dans l'eau de production ou relargué par les sédiments des bassins d'évaporation) ou encore sous forme particulaire (scénario envisagé surtout pour le Zn fixé sous forme d'oxydes ou de silicates).

Néanmoins, la concentration moyenne en Zn du sol exposé aux déversements d'eau de production reste en deçà des valeurs citées dans la littérature ATSDR, 1194 in Kabata-Pendias & Mukherjee, 2007). Lesquelles valeurs varient entre 443 et 1112 mg.kg⁻¹ au niveau des sites dits « contaminés ». Donc, nous ne pouvons parler de contamination du sol par le Zn suite aux déversements d'eau de production.

Donc, pour la probabilité d'occurrence de la conséquence 01 « contamination du sol & sous-sol », nous dirons qu'elle est avérée (notamment pour Pb) et est cotée « E : Quasi-certain »

2.4.2.1.2. Gravité :

L'article 59 de la loi 03-10 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable (JORADP 43, 2003) stipule que la terre, le sol et le sous-sol et les richesses qu'elles contiennent en tant que ressources limitées, renouvelables ou non, sont protégés contre toute forme de dégradation ou de pollution.

D'autre part, les résultats exposés plus haut, indiquent que la contamination du sol suite aux déversements d'eau de production dus aux débordements des bassins d'évaporation d'El-Gassi est avérée. Donc, il s'agit bien d'une non-conformité à l'article 05 de la loi 03-10 et impose de ce fait une action corrective. Laquelle action correspond à la réhabilitation du site conformément au plan de gestion des sols et sites contaminés.

La figure ci-dessous montre que les coûts opérationnels relatifs aux technologies disponibles pour la réhabilitation des sites contaminés par les métaux varient entre 100 et 900 US\$ par tonne de sol traité.

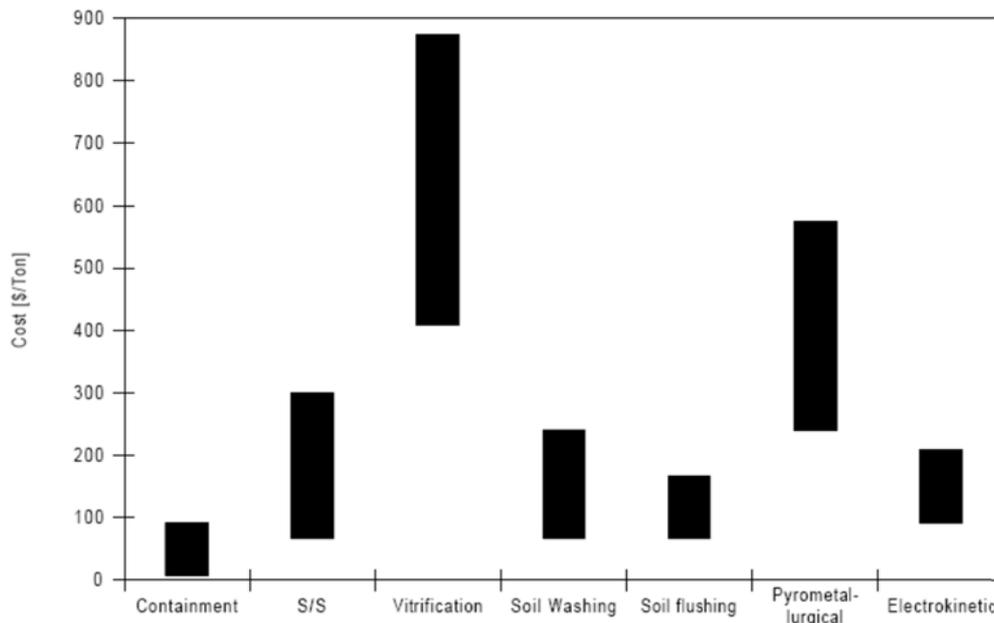


Figure 32: coûts opérationnels estimés des technologies disponibles pour la réhabilitation des sites contaminés par les métaux (Source : USEPA, 1996c)

La superficie estimée de la surface du sol exposée aux déversements d'eau de production dus aux débordements des bassins d'évaporation d'El-Gassi est d'environ 2500 m². Si l'on suppose une contamination du sous-sol jusqu'à 1 m, ceci nous donnerait un volume de

2500 m³ correspondant à une masse de sol approximative de 4500 tonnes. Le cout global pour la réhabilitation de cette quantité serait entre 450 000 et 4 050 000 US\$. Ce cout de traitement classerait la gravité de la conséquence 01 « contamination du sol & sous-sol » entre signifiant « 2 » et sévère « 3 ». Avec une probabilité d'occurrence définie « Quasi-certain E », la cotation du risque associé à cette conséquence varierait entre « E2 » et « E3 » ce qui signifie que cette conséquence présente un risque élevé.

2.4.2.2. Conséquence 02 « impact sur la flore » :

2.4.2.2.1. Probabilité d'occurrence :

Lors de la visite du terrain au niveau du sol environnant les bassins d'évaporation d'El-Gassi, nous avons noté la présence d'une vingtaine d'individus appartenant à la même espèce végétale, à savoir *Oudneya africana*.

Nous avons noté que les traces de déversements d'eau de production suite aux débordements des bassins d'évaporation d'El-Gassi n'avaient pas atteint la zone où se trouvent ces individus. Par contre au niveau des anciens bourbiers (utilisés avant la création du groupement SONAHCESS) nous avons noté qu'une dizaine d'individus de cette espèce se trouve dans une portion de sol exposée aux débordements passés des anciens bourbiers (figure 33). Par conséquent, la probabilité d'occurrence serait « D : Probable »



Figure 33 : individus d'*Oudneya africana* (site contaminé par les débordements d'eau de production des anciens bourbiers d'El-Gassi)

2.4.2.2.2. Gravité :

Afin de mieux apprécier la Gravité de l'impact par les éléments traces métalliques suite aux débordements d'eau de production dans les bassins d'El-Gassi, nous avons procédé à deux types de comparaison :

La première est la comparaison des concentrations moyennes en ETM mesurées au niveau du sol présentant des traces de déversement d'eau de production aux valeurs références pour les récepteurs écologiques « végétaux terrestres » adoptées respectivement par l'agence américaine de protection de l'environnement (USEPA) et le gouvernement du Québec. Les résultats de ces comparaisons sont consignés dans les tableaux 17 et 18.

La seconde est une ANOVA à deux facteurs (facteur « zone » et facteur « organe ») où sont comparées les concentrations moyennes des différents éléments traces métalliques dans la végétation localisée dans la zone exposée aux déversements d'eau de production suite aux débordements passés des anciens borbiers d'El-Gassi à celles mesurée dans la végétation localisée dans une zone non exposée aux déversements d'eau de production suite aux débordements des bassin.

(a) Résultats de comparaison aux valeurs référence :

Tableau 17 : Comparaison entre les concentrations moyennes en ETM mesurées dans le sol exposé aux déversements d'eau de production et les valeurs références pour les végétaux terrestres adoptés par l'USEPA

Elément Trace	Concentration moyenne mesurée dans le sol (mg.kg ⁻¹)	Valeur Référence pour les végétaux (mg.kg ⁻¹ en poids sec du sol)	Dépassement de la valeur référence		
			Non	Oui	Test t pour échantillon unique
Cd	0,15	32 ⁽¹⁾	X		/
Cu	0,00	70 ⁽²⁾	X		/
Pb	261,91	120 ⁽³⁾		X	*
Zn	56,76	160 ⁽⁴⁾	X		/
* : différence significative					
⁽¹⁾ : Source USEPA, 2005a					
⁽²⁾ : Source USEPA, 2007a					
⁽³⁾ : Source USEPA, 2005b					
⁽⁴⁾ : Source USEPA, 2007b					

Les résultats consignés dans le tableau ci-dessus indiquent que la concentration moyenne en Pb mesurée dans le sol exposé aux déversements d'eau de production dans les bassins d'El-Gassi (261,91 mg.kg⁻¹) dépasse de manière significative la valeur référence recommandée par l'USEPA pour la protection des végétaux (120 mg.kg⁻¹). Laquelle valeur correspond à la concentration maximale acceptable pour les végétaux (USEPA, 2005b)

Tableau 18 : Comparaison entre les concentrations moyennes en ETM mesurées dans le sol exposé aux déversements d'eau de production et les valeurs références pour les végétaux terrestres adoptées par le Gouvernement du Québec (CEAEQ, 2012).

Élément trace	Concentration moyenne mesurée dans le sol (mg.kg ⁻¹)	Valeur Référence (mg kg ⁻¹ en poids sec du sol)			Dépassement de la valeur référence		
		Récepteur écologique	Type d'usage	Valeur Référence	Non	Oui	Test t pour échantillon unique
Cd	0,15	Végétaux terrestres	N1	0,33	X		/
			N2	13	X		/
			N3	34	X		/
Cu	0,00	Végétaux terrestres	N1	11,6	X		/
			N2	65	X		/
			N3	121	X		/
Pb	261,91	Végétaux terrestres	N1	16,7		X	*
			N2	172		X	N.S
			N3	343	X		/
Zn	56,76	Végétaux terrestres	N1	15,4		X	*
			N2	124	X		N/A
			N3	287	X		N/A

N.S : différence non significative ; * : différence significative

N1 : la valeur référence pour les milieux sensibles, disponible pour les végétaux, les oiseaux et les mammifères, qui correspond à 10% d'effets néfastes acceptés

N2 : la valeur de référence pour les usages résidentiel, récréatif et institutionnel, qui correspond à 20% d'effets néfastes acceptés

N3 : la valeur référence pour les usages commercial et industriel, qui correspond à 40% d'effets néfastes acceptés

Les résultats consignés dans le tableau 18 nous permettent de dégager les constatations suivantes :

- La concentration moyenne en Pb mesurée dans le sol exposé aux déversements d'eau de production (261,91 mg.kg⁻¹) dépasse de manière significative la valeur référence pour les milieux sensibles (N1) recommandée par le gouvernement du Québec pour la protection des végétaux terrestres ;

- La concentration moyenne en Pb mesurée dans le sol exposé aux déversements d'eau de production ($261,91 \text{ mg.kg}^{-1}$) dépasse la valeur référence pour les usages résidentiel, récréatif et institutionnel (N2) recommandée par le gouvernement du Québec pour la protection des végétaux terrestres. Néanmoins la différence n'est pas significative ;
- La concentration moyenne en Pb mesurée dans le sol exposé aux déversements d'eau de production ($261,91 \text{ mg.kg}^{-1}$) est en deçà de la valeur référence pour les usages commercial, et institutionnel (N3) recommandée par le gouvernement du Québec pour la protection des végétaux terrestres.
- La concentration moyenne en Zn mesurée dans le sol exposé aux déversements d'eau de production ($56,76 \text{ mg.kg}^{-1}$) dépasse de manière significative la valeur référence pour les milieux sensibles (N1) recommandée par le gouvernement du Québec pour la protection des végétaux terrestres
- La concentration moyenne en Zn mesurée dans le sol exposé aux déversements d'eau de production ($56,76 \text{ mg.kg}^{-1}$) reste en deçà de la valeur référence pour les usages résidentiel, récréatif et institutionnel (N2) recommandée par le gouvernement du Québec pour la protection des végétaux terrestres
- La concentration moyenne en Zn mesurée dans le sol exposé aux déversements d'eau de production ($56,76 \text{ mg.kg}^{-1}$) reste en deçà de la valeur référence pour les usages commercial, et institutionnel (N3) recommandée par le gouvernement du Québec pour la protection des végétaux terrestres.

Les constatations dégagées du tableau 18 nous amène à dire que : considérant le fait que l'activité au champ est à caractère industriel, donc d'un niveau 3, nous pouvons dire que les concentrations moyennes des ETM étudiés sont inférieures aux valeurs références adopté pour ce niveau par le gouvernement du Québec pour les végétaux terrestres. Par conséquent, il n'y aurait pas d'impact sur la flore dus aux déversements d'eau de production suite aux débordements des bassins d'évaporation d'El-Gassi.

Cependant, conformément au chapitre 05 de la loi 03-10 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable, les milieux désertiques sont protégés par cette loi. L'article 64 stipule que les modalités et mesures de préservation des écosystèmes et de la diversité biologique des milieux désertiques, et de compensation de la fragilité et de la vulnérabilité des composants de leur environnement ainsi que les zones concernées par cette protection, sont fixés par voie réglementaire.

Donc, conformément au chapitre 05 de la loi 03-10, notre site (situé en milieu désertique) est un milieu sensible, même s'il fait l'objet d'un usage industriel. D'ailleurs, ceci est typique des industries extractives qui prennent place là où se trouve la ressource (le pétrole dans notre cas). Par conséquent, il convient de prendre en considération les valeurs référence recommandée pour les milieux sensibles et donc, nous dirons que les concentrations en Pb et Zn du sol exposé aux déversements dus aux débordements des bassins d'évaporation d'El-Gassi peuvent avoir un impact négatif sur l'espèce végétale présente, à savoir *Oudneya africana* qui rappelons-le est représentée par une dizaine d'individus, dans cette zone.

(b) Résultats de comparaison par ANOVA à 2 facteurs :

Les résultats de cette comparaison sont consignés dans le tableau 19

Tableau 19 : effets des facteurs zone et organe sur les concentrations en ETM dans la végétation

Elément	Facteur	Effet inter-sujet
Zn	zone	***
	organe	***
	Zone*organe	***
Pb	zone	***
	organe	***
	Zone*organe	*
Cd	zone	***
	organe	***
	Zone*organe	***
Cu	zone	***
	organe	***
	Zone*organe	***

Le zinc :

L'ANOVA à deux facteurs montre que les concentrations moyennes relatives au Zn présentent :

- Des différences très hautement significative liées à l'action du facteur « zone »
- Des différences très hautement significatives liées à l'action du facteur « organe »
- Des différences très hautement significatives liées à l'interaction « zone*organe»

La figure 34 illustre la distribution des concentrations en Zn dans les différents organes (racines, tiges, feuilles, fruits) d'*Oudneya africana* pour chacune des deux zones (contaminée et non contaminée par les déversements d'eau de production

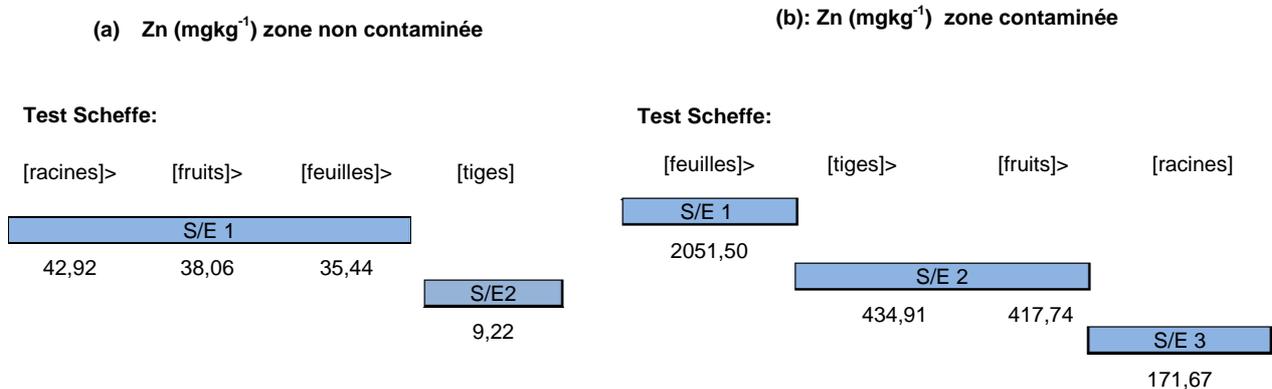


Figure 34 : Distribution des concentrations en Zn dans les différents organes d'*Oudneya africana* en zone exposée et non exposée aux déversements d'eau de production

Le test de Scheffé montre que l'organisation des organes en sous-ensembles homogènes diffère entre la zone contaminée par les déversements et la zone non contaminée.

Dans la zone non contaminée (Figure34.a), les concentrations en Zn des différents organes forment deux sous-ensembles homogène avec un l'ordre décroissant suivant : racines > fruits > feuilles > tiges. Le premier sous ensemble regroupe les concentrations relatives aux racines (42,92 mg.kg⁻¹), fruits (38,06 mg.kg⁻¹) et feuilles (35,44 mg.kg⁻¹), alors que le second sous ensemble homogène comprend la concentration en Zn des tiges (9,22 mg.kg⁻¹). Bien que les concentrations en Zn des fruits et feuilles ne présentent pas de différences

significatives par rapport à celle des racines, celle-ci restent les plus concentrées en Zn par rapport aux autres organes. Cette tendance du Zn à s'accumuler dans les racines a déjà été soulignée par Mengel & Kirkbay (1978) in Kadem (2005) ou encore par Eisler (1997) in Kabata-Pendias & Mukherjee (2007). Enfin il est à noter aussi que la concentration moyenne en Zn mesurée dans les feuilles ($35,44 \text{ mg.kg}^{-1}$) s'intègre dans la gamme de niveau « normal » de Zn relatif au feuillage des plantes fourragères ($15-150 \text{ mg.kg}^{-1}$) citée par Langmuir et al (2005).

Dans la zone contaminée par les déversements d'eau de production, (figure 34.b) le test de Scheffe a fait ressortir trois sous-ensembles homogènes :

- Le premier sous ensemble est constitué de l'organe « feuilles » avec une concentration moyenne en Zn de $2051,50 \text{ mg.kg}^{-1}$
- Le deuxième sous ensemble homogène regroupe les organes « tiges » et « fruits » avec des concentrations moyennes respectives de $434,91$ et $417,74 \text{ mg.kg}^{-1}$
- Le troisième sous ensemble est constitué de l'organe « racines » avec une concentration moyenne en Zn de $171,67 \text{ mg.kg}^{-1}$

Nous notons que l'ordre décroissant de concentration en Zn dans les différents organes diffère de celui observé en zone non contaminée ou ceux cités dans la littérature et qui admettent que le Zn s'accumule généralement dans les racines. En effet, dans la zone contaminée par les déversements d'eau de production, la tendance s'inverse car le Zn semble s'accumuler dans la partie aérienne avec des proportions plus importantes que celle observées dans les racines. Cette tendance a été observée par Bouhadjera (2005) pour la même espèce (*Oudneya africana*) dans la région de Ouargla où l'ordre décroissant de concentration en Zn était : Rameaux tertiaires ($67,817 \text{ mg.kg}^{-1}$) > Rameaux secondaires ($25,125 \text{ mg.kg}^{-1}$) > Feuilles ($16,676 \text{ mg.kg}^{-1}$) > Racines ($3,831 \text{ mg.kg}^{-1}$) > Rameaux primaires ($2,880 \text{ mg.kg}^{-1}$). Cet auteur a souligné que la tendance générale d'accumulation des métaux dans les racines ne s'appliquait pas aux plantes métallophytes où l'essentiel de l'accumulation se fait dans les tiges.

Dans la zone contaminée par les déversements d'eau de production, c'est l'organe « feuilles » d'*Oudneya africana* qui présente la plus forte concentration moyenne en Zn ($2051,50 \text{ mg.kg}^{-1}$), cette concentration dépasse de manière hautement à très hautement significative la gamme de concentrations en Zn des feuilles : $500-1500 \text{ mg.kg}^{-1}$, citée par

Langmuir et al (2005), comme étant des niveaux phyto-toxiques pour les plantes fourragères. Elle dépasse également de manière très hautement significative la gamme de concentration en Zn des feuilles : 200-300 mg.kg⁻¹ citée par Pahlsson (1989) comme concentration critique en Zn affectant la croissance de la majorité des plantes vasculaires.

Le plomb :

L'ANOVA à deux facteurs montre que les concentrations moyennes relatives au Pb présentent :

- Des différences très hautement significatives liées à l'action du facteur « zone »
- Des différences très hautement significatives liées à l'action du facteur « organe »
- Des différences significatives liées qu'à l'interaction « zone*organe »

La figure 35 illustre la distribution des concentrations en Pb dans les différents organes (racines, tiges, feuilles, fruits) d'*Oudneya africana* pour chacune des deux zones (contaminée et non contaminée par les déversements d'eau de production

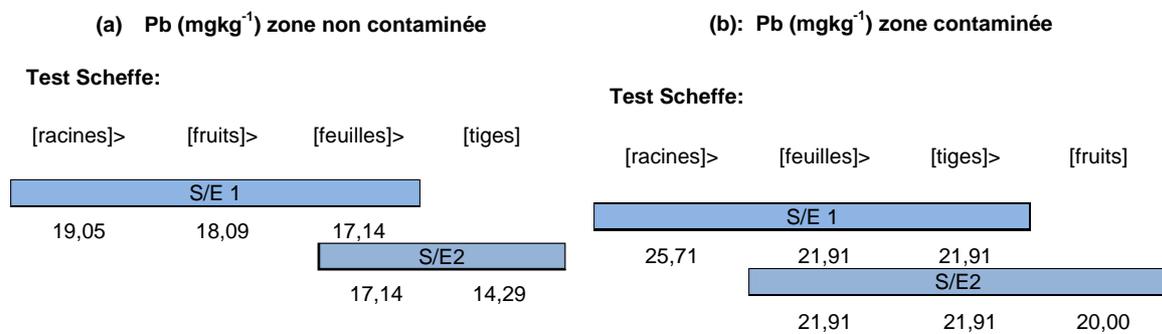


Figure 35 : Distribution des concentrations en Pb dans les différents organes d'*Oudneya africana* en zone exposée et non exposée aux déversements d'eau de production

Dans la zone non contaminée (Figure35.a), les concentrations en Pb des différents organes forment deux sous-ensembles homogène avec l'ordre décroissant suivant : racines > fruits > feuilles > tiges. Le premier sous ensemble regroupe les concentrations relatives aux racines (19,05 mg.kg⁻¹), fruits (18,09 mg.kg⁻¹) et feuilles (17,14 mg.kg⁻¹), alors que le second sous ensemble homogène regroupe les concentrations relatives aux feuilles (17,14

mg.kg⁻¹) et aux tiges (14,29 mg.kg⁻¹). Si ce résultat conforte ce qui est cité dans la littérature sur l'accumulation du Pb dans l'organe « racines », il n'en est pas de même sur sa translocation vers les parties aériennes. En effet, plusieurs auteurs ont souligné que le transfert du Pb dans les parties épigées de la plante était très limité. Or, nous rappelons que le test de Scheffe (figure35.a) montre que les concentrations en Pb des « racines », « fruits » et « feuilles » appartiennent à un même sous ensemble homogène et ne présentent donc pas de différences significatives.

Par ailleurs, il est à noter que la concentration moyenne en Pb de des feuilles (17,14 mg.kg⁻¹) dépasse de manière très hautement significative la gamme de concentration en Pb des feuilles : 2-5 mg.kg⁻¹ citée par Langmuir et al (2005), comme des valeurs maximales « normales » pour les plantes fourragères.

Dans la zone contaminée par les déversements d'eau de production (figure35.b), les concentrations en Pb des différents organes forment deux sous-ensembles homogènes avec l'ordre décroissant suivant : racines > feuilles > tiges > fruits. Le premier sous ensemble homogène regroupe les concentrations relatives aux racines (25,71 mg.kg⁻¹), feuilles (21,91 mg.kg⁻¹) et tiges (21,91 mg.kg⁻¹), alors que le second sous ensemble homogène regroupe les concentrations relatives aux feuilles (21,91 mg.kg⁻¹), tiges (21,91 mg.kg⁻¹) et fruits (20,00mg.kg⁻¹). Comme pour la zone non contaminée, l'organe « racines » présente la plus forte concentration. Si ce résultat conforte ce qui est cité dans la littérature sur l'accumulation du Pb dans l'organe « racines », il n'en est pas de même sur sa peu probable translocation vers les parties épigées de la plante comme en atteste l'absence de différences significatives entre la concentration en Pb des « racines » et celles des organes « feuilles » et « tiges » d'*Oudneya africana*.

Par ailleurs, il est à noter que la concentration moyenne en Pb de des feuilles d'*Oudneya africana* (21,91 mg.kg⁻¹) dépasse de manière très hautement significative la gamme de concentration en Pb des feuilles : 2-5 mg.kg⁻¹ citée par Langmuir et al (2005), comme étant les valeurs maximales « normales » pour les plantes fourragères

Le cadmium :

L'ANOVA à deux facteurs montre que les concentrations moyennes relatives au Cd présentent :

- Des différences très hautement significative liées à l'action du facteur « zone »
- Des différences très hautement significatives liées à l'action du facteur « organe »
- Des différences très hautement significatives liées à l'interaction « zone*organe »

La figure 36 illustre la distribution des concentrations en Cd dans les différents organes (racines, tiges, feuilles, fruits) d'*Oudneya africana* pour chacune des deux zones (contaminée et non contaminée par les déversements d'eau de production

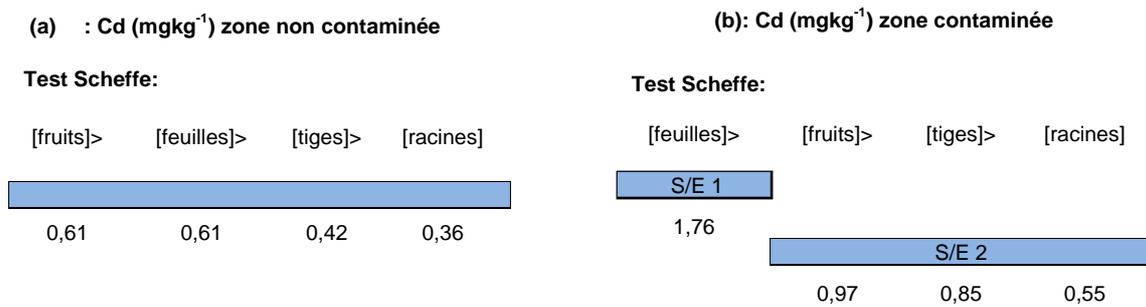


Figure 36 : Distribution des concentrations en Cd dans les différents organes d'*Oudneya africana* en zone exposée et non exposée aux déversements d'eau de production

Dans la zone non contaminée (Figure36.a), les concentrations en Cd des différents organes présentent l'ordre décroissant suivant : fruits (0,61 mg.kg⁻¹)= feuilles (0,61 mg.kg⁻¹)> tiges (0,42 mg.kg⁻¹)> racines (0,36 mg.kg⁻¹). Le test de Scheffe indique qu'il n'y a qu'un seul ensemble homogène ce qui signifie que le Cd serait uniformément réparti dans les différents organes. Ce résultat diffère de celui de Diserens (1996) cité par Kadem (2005), qui souligne que les plus fortes concentrations en Cd se trouvent dans les racines, qui selon lui contiennent généralement 10 fois plus de Cd que les tiges.

Nous notons que la concentration en Cd de l'organe « feuilles » ($0,61 \text{ mg.kg}^{-1}$) s'intègre dans la gamme : $0,01-1,00 \text{ mg.kg}^{-1}$, citée par Langmuir et al (2005) comme étant les concentrations « normales » du Cd dans le feuillage des plantes fourragères.

Dans la zone contaminée par les déversements d'eau de production (figure 36.b), les concentrations en Cd des différents organes forment deux sous-ensembles homogènes avec l'ordre décroissant suivant : feuilles > fruits > tiges > racines. La concentration en Cd de l'organe « feuilles » ($1,76 \text{ mg.kg}^{-1}$) constitue le premier sous-ensemble homogène, alors que celles relatives aux organes « fruits » ($0,97 \text{ mg.kg}^{-1}$), « tiges » ($0,85 \text{ mg.kg}^{-1}$) et « racines » ($0,55 \text{ mg.kg}^{-1}$) constituent le second sous-ensemble homogène. Donc, il semblerait que dans la zone contaminée, le Cd se concentre dans les feuilles plus que dans les autres organes. Néanmoins, la concentration en Cd des feuilles d'*Oudneya africana* dans la zone contaminée par les déversements d'eau de production ($1,76 \text{ mg.kg}^{-1}$) reste inférieure à la gamme de concentrations en Cd des feuilles : $5-700 \text{ mg.kg}^{-1}$, citée par Langmuir et al (2005), comme étant des niveaux phyto-toxiques pour les plantes fourragères. Elle est également inférieure à la gamme de concentration en Cd des feuilles : $8-12 \text{ mg.kg}^{-1}$ citée par Pahlsson (1989) comme concentration critique en Cd affectant la croissance de la majorité des plantes vasculaires.

Le cuivre :

L'ANOVA à deux facteurs montre que les concentrations moyennes relatives au Cu présentent :

- Des différences très hautement significatives liées à l'action du facteur « zone »
- Des différences très hautement significatives liées à l'action du facteur « organe »
- Des différences très hautement significatives liées à l'interaction « zone*organe »

La figure 37 illustre la distribution des concentrations en Cu dans les différents organes (racines, tiges, feuilles, fruits) d'*Oudneya africana* pour chacune des deux zones (contaminée et non contaminée par les déversements d'eau de production

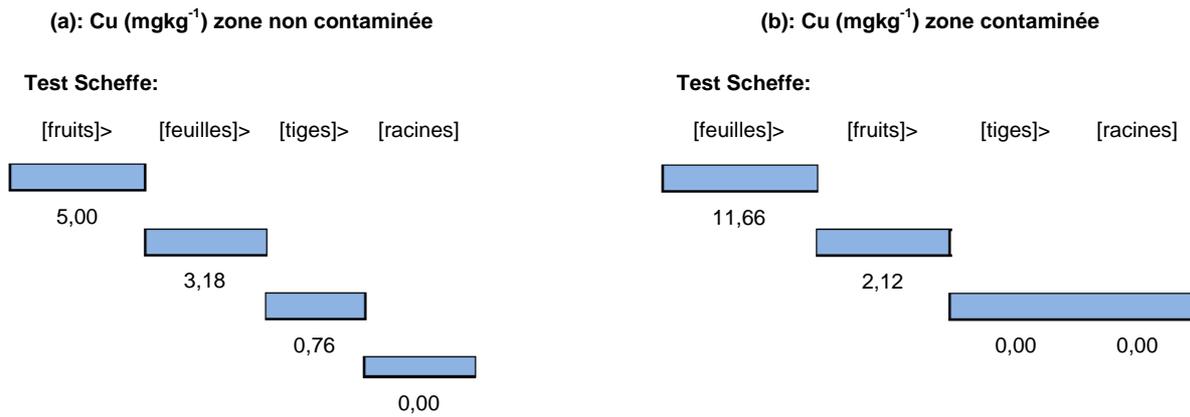


Figure 37 : Distribution des concentrations en Cu dans les différents organes d'*Oudneya africana* en zone exposée et non exposée aux déversements d'eau de production

Dans la zone non contaminée (figure 37.a), les concentrations en Cu des différents organes présentent l'ordre décroissant suivant : fruits > feuilles > tiges > racines. Le test de Scheffe indique que chaque organe constitue un sous ensemble homogène distinct. Ainsi :

- Le premier sous ensemble homogène est constitué de l'organe « fruits » avec une concentration moyenne en Cu de 5,00 mg.kg⁻¹
- Le deuxième sous ensemble homogène est constitué de l'organe « feuilles » avec une concentration moyenne en Cu de 3,18 mg.kg⁻¹
- Le troisième sous ensemble homogène est constitué de l'organe « tiges » avec une concentration moyenne en Cu de 0,76 mg.kg⁻¹
- Le quatrième sous ensemble homogène est constitué de l'organe « racines » qui ne contient pas de cuivre

Il est à noter que la concentration en Cu de l'organe « feuilles » (3,18 mg.kg⁻¹) s'intègre dans la gamme : 3-20 mg.kg⁻¹, citée par Langmuir et al (2005) comme étant les concentrations « normales » du Cu dans le feuillage des plantes fourragères.

Dans la zone contaminée par les déversements d'eau de production (Figure 37.b), les concentrations en Cu des différents organes présentent l'ordre décroissant suivant : feuilles > fruits > tiges > racines. Le test de Scheffe indique l'existence de trois sous-ensembles homogènes :

- Le premier sous ensemble homogène est constitué de l'organe « feuilles » avec une concentration moyenne en Cu de 11,66 mg.kg⁻¹
- Le deuxième sous ensemble homogène est constitué de l'organe « fruits » avec une concentration moyenne en Cu de 2,12 mg.kg⁻¹
- Le troisième sous ensemble homogène regroupe les organes « tiges » et « racines » dont les concentrations moyennes en Cu sont nulles.

Il est à noter également que la concentration en Cu des feuilles d'*Oudneya africana* dans la zone contaminée par les déversements d'eau de production (11,6 mg.kg⁻¹) reste inférieure à la gamme de concentrations en Cu des feuilles : 25-40 mg.kg⁻¹, citée par Langmuir et al (2005), comme étant des niveaux phyto-toxiques pour les plantes fourragères. Elle est également inférieure à la gamme de concentration en Cd des feuilles : 15-20 mg.kg⁻¹ citée par Pahlsson (1989) comme concentration critique en Cu affectant la croissance de la majorité des plantes vasculaires.

Donc, à l'issue de ces deux comparaisons (comparaison aux valeurs références et ANOVA à 2 facteurs), nous notons que leurs résultats convergent. La première indique que les concentrations en Zn et Pb sont suffisante pour provoquer des effets négatifs chez cette espèce. La seconde indique que les concentrations en Pb et Zn pourrait atteindre des niveaux anormaux, voir phyto-toxiques.

Ajoutant à cela le fait que cette espèce végétale (*Oudneya africana*) soit protégée par la loi 03-10 notamment ces articles 40 et 41 (ce dernier mis en application par le décret exécutif 12-03 (JORADP 03, 2012) fixant la liste des espèces végétales non cultivées protégées. Nous dirons que le niveau de gravité adéquat serait « 3 : Sévère ». Donc, avec une cotation de risque « D3 », le risque d'impact sur la flore est élevé.

2.4.2.3. Conséquence 03 « impact sur les micro-organismes du sol » :

2.4.2.3.1. Probabilité d'occurrence :

Les micro-organismes sont omni présents dans les sols, de ce fait la probabilité d'occurrence pour qu'il y ait un impact serait « C : Possible »

2.4.2.3.2. Gravité :

Afin d'apprécier la Gravité de l'impact par les éléments traces métalliques suite aux débordements d'eau de production dans les bassins d'El-Gassi, nous avons comparé les concentrations moyennes en ETM mesurées au niveau du sol présentant des traces de déversement d'eau de production aux valeurs références pour les récepteurs écologiques « micro-organismes » adoptées le gouvernement du Québec. Les résultats de cette comparaison sont consignés dans le tableau 20

Tableau 20 : Comparaison entre les concentrations moyennes en ETM mesurées dans le sol exposé aux déversements d'eau de production et les valeurs références pour les Micro-organismes adoptées par le Gouvernement du Québec (CEAEQ, 2012).

Elément trace	Concentration moyenne mesurée dans le sol (mg.kg ⁻¹)	Valeur Référence (mg kg ⁻¹ en poids sec du sol)			Dépassement de la valeur référence		
		Récepteur écologique	Type d'usage	Valeur Référence	Non	Oui	Test t pour échantillon unique
Cd	0,15	Micro-organismes du sol	N1	/	/	/	/
			N2	257,9	X		/
			N3	487	X		/
Cu	0,00	Micro-organismes du sol	N1	/	/	/	/
			N2	447	X		/
			N3	861,8	X		/
Pb	261,91	Micro-organismes du sol	N1	/	/	/	/
			N2	1834,9	X		/
			N3	3423	X		/
Zn	56,76	Micro-organismes du sol	N1	/	/	/	/
			N2	387	X		/
			N3	734,2	X		/

N1 :la valeur référence pour les milieux sensibles, disponible pour les végétaux, les oiseaux et les mammifères, qui correspond à 10% d'effets néfastes acceptés

N2 :la valeur de référence pour les usages résidentiel, récréatif et institutionnel, qui correspond à 20% d'effets néfastes acceptés

N3 :la valeur référence pour les usages commercial et industriel, qui correspond à 40% d'effets néfastes acceptés

Les résultats consignés dans le tableau 20 indiquent qu'aucune des concentrations moyennes mesurées pour les ETM étudiés ne dépasse la valeur référence correspondante au même élément, adoptée par le gouvernement du Québec pour le récepteur « micro-organisme du sol ». Par conséquent, le niveau de gravité le plus approprié nous paraît être « 1 : insignifiant ».

Donc, avec une cotation « C1 », le risque associé à la conséquence 03 serait « Faible »

2.4.2.4. Conséquence 04 « impact sur les invertébrés du sol » :

2.4.2.4.1. Probabilité d'occurrence :

Les invertébrés du sol sont omni présents dans les sols, de ce fait la probabilité d'occurrence pour qu'ils subissent un impact serait « C : Possible »

2.4.2.4.2. Gravité :

Afin d'apprécier la Gravité de l'impact par les éléments traces métalliques suite aux débordements d'eau de production dans les bassins d'El-Gassi, nous avons comparé les concentrations moyennes en ETM mesurées au niveau du sol présentant des traces de déversement d'eau de production aux valeurs références pour les récepteurs écologiques « végétaux terrestres » adoptées respectivement par l'agence américaine de protection de l'environnement (USEPA) et le gouvernement du Québec. Les résultats de ces comparaisons sont consignés dans les tableaux 21 et 22.

Tableau 21 : Comparaison entre les concentrations moyennes en ETM mesurées dans le sol exposé aux déversements d'eau de production et les valeurs références pour les invertébrés du sol adoptés par l'USEPA

Elément Trace	Concentration moyenne mesurée dans le sol (mg.kg ⁻¹)	Valeur Référence pour les invertébrés du sol (mg.kg ⁻¹ en poids sec du sol)	Dépassement de la valeur référence		
			Non	Oui	Test t pour échantillon unique
Cd	0,15	140 ⁽¹⁾	X		/
Cu	0,00	80 ⁽²⁾	X		/
Pb	261,91	1700 ⁽³⁾	X		/
Zn	56,76	79 ⁽⁴⁾	X		/

⁽¹⁾ : Source USEPA, 2005a
⁽²⁾ : Source USEPA, 2007a
⁽³⁾ : Source USEPA, 2005b
⁽⁴⁾ : Source USEPA, 2007b

Tableau 22: Comparaison entre les concentrations moyennes en ETM mesurées dans le sol exposé aux déversements d'eau de production et les valeurs références pour les invertébrés du sol adoptés par le gouvernement du Québec (CEAEQ, 2012).

Élément trace	Concentration moyenne mesurée dans le sol (mg.kg ⁻¹)	Valeur Référence (mg kg ⁻¹ en poids sec du sol)			Dépassement de la valeur référence		
		Récepteur écologique	Type d'usage	Valeur Référence	Non	Oui	Test t pour échantillon unique
Cd	0,15	Invertébrés du sol	N1	/	/	/	/
			N2	65	X		/
			N3	122	X		/
Cu	0,00	Invertébrés du sol	N1	/	/	/	/
			N2	122	X		/
			N3	180	X		/
Pb	261,91	Invertébrés du sol	N1	/	/	/	/
			N2	645	X		/
			N3	930	X		/
Zn	56,76	Invertébrés du sol	N1	/	/	/	/
			N2	251	X		/
			N3	357	X		/

N.S : différence non significative ; * : différence significative

N1 : la valeur référence pour les milieux sensibles, disponible pour les végétaux, les oiseaux et les mammifères, qui correspond à 10% d'effets néfastes acceptés

N2 : la valeur de référence pour les usages résidentiel, récréatif et institutionnel, qui correspond à 20% d'effets néfastes acceptés

N3 : la valeur référence pour les usages commercial et industriel, qui correspond à 40% d'effets néfastes acceptés

Les résultats consignés dans les tableaux 21 et 22 indiquent qu'aucune des concentrations moyennes mesurées pour les ETM étudiés ne dépasse la valeur référence correspondante au même élément, adoptée par le gouvernement du Québec pour le récepteur « invertébrés du sol ». Par conséquent, le niveau de gravité le plus approprié nous paraît être « 1 : insignifiant ».

Donc, avec une cotation « C1 », le risque associé à la conséquence 03 serait « Faible »

2.4.2.5. Conséquence 05 « impact sur le peuplement avien » :

2.4.2.5.1. Probabilité d'occurrence :

Il a déjà été mentionné (tableau 04, chapitre 02) la présence de plusieurs espèces avifaunes au niveau du complexe GEA, dont quelque unes près des bassins d'évaporation. Donc, la probabilité d'occurrence d'impact sur le peuplement aviens nous paraît Probable « D »

2.4.2.5.2. Gravité :

Afin d'apprécier la Gravité de l'impact par les éléments traces métalliques suite aux débordements d'eau de production dans les bassins d'El-Gassi, nous avons comparé les concentrations moyennes en ETM mesurées au niveau du sol présentant des traces de déversement d'eau de production aux valeurs références pour les récepteurs écologiques « peuplement avien » adoptées respectivement par l'agence américaine de protection de l'environnement (USEPA)

Tableau 23 : Comparaison entre les concentrations moyennes en ETM mesurées dans le sol exposé aux déversements d'eau de production et les valeurs références pour le peuplement avien adoptés par l'USEPA

Elément Trace	Concentration moyenne mesurée dans le sol (mg.kg ⁻¹)	Valeur Référence pour le peuplement avien (mg.kg ⁻¹ en poids sec du sol)	Dépassement de la valeur référence		
			Non	Oui	Test t pour échantillon unique
Cd	0,15	0,77 ⁽¹⁾	X		/
Cu	0,00	28 ⁽²⁾	X		/
Pb	261,91	11 ⁽³⁾		X	*
Zn	56,76	46 ⁽⁴⁾		X	N.S

* : différence significative ; N.S : différence non significative

⁽¹⁾ : Source USEPA, 2005a
⁽²⁾ : Source USEPA, 2007a
⁽³⁾ : Source USEPA, 2005b
⁽⁴⁾ : Source USEPA, 2007b

Les résultats consignés dans le tableau ci-dessus indiquent que la concentration moyenne en Pb mesurée dans le sol exposé aux déversements d'eau de production dans les bassins d'El-Gassi (261,91 mg.kg⁻¹) dépasse de manière significative la valeur référence recommandée par l'USEPA pour la protection des peuplements aviens (11 mg.kg⁻¹). Laquelle valeur correspond à la concentration maximale acceptable pour les peuplements aviens (USEPA, 2005b). Nous notons également que la concentration moyenne en Zn

mesurée dans le sol exposé aux déversements d'eau de production dans les bassins d'El-Gassi ($56,76 \text{ mg.kg}^{-1}$) dépasse de manière significative la valeur référence recommandée par l'USEPA pour la protection des peuplements aviens (46 mg.kg^{-1}). Néanmoins la différence n'est pas significative.

Nous avons comparé la liste des espèces observée à GEA (consignée dans le tableau 04 du chapitre 02) avec la liste des espèces animales non domestiques protégées en Algérie conformément au décret présidentiel 12-235, nous avons noté une espèce qui a été observée à GEA et est protégée par la réglementation en vigueur, à savoir le rouge-queue noir (*Phoenicurus ochruros*).

Au vue de ces résultats, la classe de gravité appropriée serait « 2 : signifiant ». Par conséquent, avec une cotation « D2 », nous dirons que le risque associé à l'impact sur le peuplement avien est « moyen ».

2.4.2.6. Conséquence 06 « impact sur les mammifères » :

2.4.2.6.1. Probabilité d'occurrence :

Le dromadaire est le seul mammifère observé près des bassins, ajoutant à cela le fait qu'il consomme les feuilles d'*Oudneya africana*, nous dirons que la probabilité d'occurrence est « D : probable »

2.4.2.6.2. Gravité :

Afin d'apprécier la Gravité de l'impact par les éléments traces métalliques suite aux débordements d'eau de production dans les bassins d'El-Gassi, nous avons comparé les concentrations moyennes en ETM mesurées au niveau du sol présentant des traces de déversement d'eau de production aux valeurs références pour les récepteurs écologiques « mammifères » adoptées respectivement par l'agence américaine de protection de l'environnement (USEPA)

Tableau 24 : Comparaison entre les concentrations moyennes en ETM mesurées dans le sol exposé aux déversements d'eau de production et les valeurs références pour les mammifères adoptés par l'USEPA

Elément Trace	Concentration moyenne mesurée dans le sol (mg.kg ⁻¹)	Valeur Référence pour les mammifères (mg.kg ⁻¹ en poids sec du sol)	Dépassement de la valeur référence		
			Non	Oui	Test t pour échantillon unique
Cd	0,15	0,36 ⁽¹⁾	X		/
Cu	0,00	49 ⁽²⁾	X		/
Pb	261,91	56 ⁽³⁾		X	*
Zn	56,76	79 ⁽⁴⁾	X		/
* : différence significative					
⁽¹⁾ : Source USEPA, 2005a					
⁽²⁾ : Source USEPA, 2007a					
⁽³⁾ : Source USEPA, 2005b					
⁽⁴⁾ : Source USEPA, 2007b					

Les résultats consignés dans le tableau ci-dessus indiquent que la concentration moyenne en Pb mesurée dans le sol exposé aux déversements d'eau de production dans les bassins d'El-Gassi (261,91 mg.kg⁻¹) dépasse de manière significative la valeur référence recommandée par l'USEPA pour la protection des mammifères (56 mg.kg⁻¹). Laquelle valeur correspond à la concentration maximale acceptable pour les mammifères (USEPA, 2005b). Nous avons comparé la liste des espèces observée à GEA avec la liste des espèces

animales non domestiques protégées en Algérie conformément au décret présidentiel 12-235. Nous n'en avons recensé aucun. Néanmoins, les dromadaires sont la première préoccupation des parties affectées, à savoir les associations d'éleveurs. Or, l'espèce végétale présente autours des bassins d'évaporation (*Oudneya africana*) est connue pour être un fourrage très apprécié des dromadaires. Considérant la possibilité que cette plante puisse accumuler les éléments traces notamment dans les parties aériennes (voir section consacrée à l'impact sur la flore), la gravité de l'impact sur les mammifères devient « Sévère ». Donc, avec une cotation « D3 », la conséquence 06 « impact sur les mammifères » présente un risque élevé.

2.4.2.7. Conséquence 07 « contamination des eaux souterraines » :

2.4.2.7.1. Probabilité d'occurrence :

En passant en revue les données existantes sur la zone d'étude, nous avons noté qu'il y avait deux puits d'eau miopliocène (GSM-14 et GSM-15) qui ont été forés puis immédiatement abandonnés en raison la salinité importante due aux déversement d'eau de production des anciens bourbiers d'El-Gassi (exploités depuis les années 60s). Il faudra souligner que les anciens bourbiers n'étaient pas étanchéifiés. Néanmoins, la probabilité d'occurrence d'une contamination des eaux souterraines suite aux déversements d'eau de production dus aux débordements des nouveaux bassins d'évaporation d'El-Gassi reste possible d'où une classe de probabilité « C »

2.4.2.7.2. Gravité :

Conformément aux dispositions des lois 03-10 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable et 05-12 relative à l'eau. Les eaux souterraines sont une composante de l'environnement protégées quantitativement et qualitativement. Par conséquent leur contamination constitue en soi non-conformité majeur imposant une action corrective pouvant coûter des dizaines de millions d'US dollars. De ce fait, nous considérons que la gravité appropriée est « 4 : Majeur ». Donc avec une cotation « C4 » le risque associé à la conséquence « contamination des eaux souterraines » serait Elevé.

**Synthèse des résultats,
Recommandations et
conclusion**

1. Synthèse des résultats, Recommandations et conclusion :

Les résultats obtenus dans l'analyse, nous permettent de produire le diagramme Nœud papillon relatif à l'évènement redouté « débordement d'eau de production dans les bassins d'évaporation d'El-Gassi (figure 38). Nous y notons que :

- il y a deux conséquences à risque acceptable (conséquences 03 et 04 correspondant respectivement à l'impact sur les microorganismes et l'impact sur les invertébrés du sol). Donc, n'imposant aucune action d'amélioration ;
- il y a une conséquence tolérable (conséquence 05 correspondant à l'impact sur le peuplement avien). Donc ne compromettant pas l'activité mais nécessitant des actions supplémentaires pour réduire le risque à niveau aussi bas que raisonnablement praticable ;
- les quatre autres conséquences présentent un risque intolérable. Elles imposent de ce fait la suspension de l'activité (décharge d'eau de production dans les bassins d'El-Gassi) et une réévaluation du risque afin de définir des mesures de contrôle permettant de réduire le risque à un niveau acceptable ;
- l'évènement redouté présente un risque intolérable. ceci impose la suspension de l'activité (décharge d'eau de production dans les bassins d'El-Gassi) et une réévaluation du risque afin de définir des mesures de contrôle permettant de réduire le risque à un niveau acceptable ;

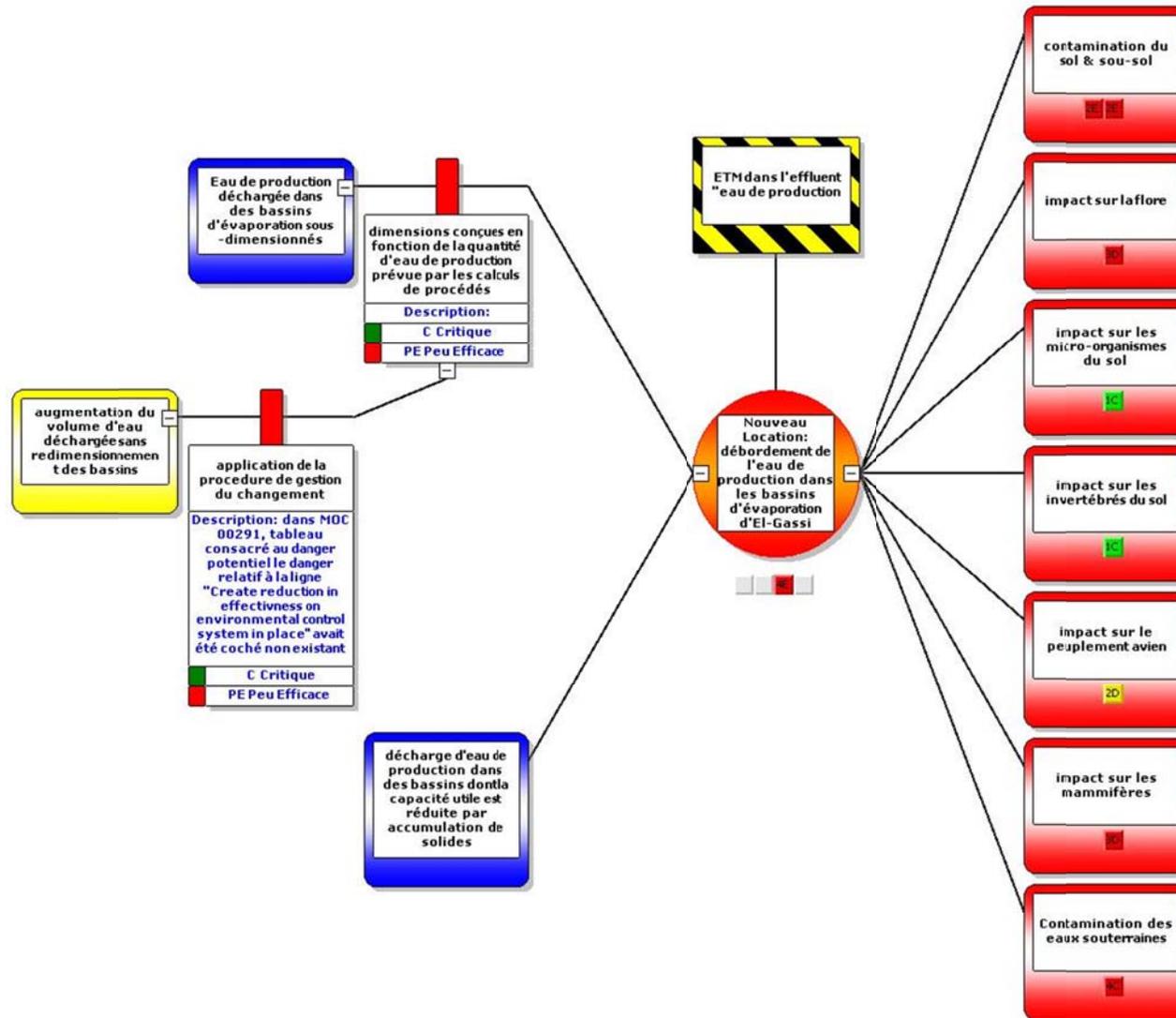


Figure 38 : Digramme Nœud papillon relative à l'évènement « débordement d'eau de production dans les bassins d'évaporation d'El-Gassi »

2. Recommandations et conclusion :

- recommandations à court terme :

Le risque associé à l'évènement redouté est en soi intolérable. Donc, l'urgence est de prévenir tout débordement futur d'eau de production des bassins d'El-Gassi. Vu l'efficacité actuelle des barrières existantes (figure 38). L'action qui s'impose est la suivante : en cas de non disponibilité d'injection d'eau de production affluant vers El-Gassi (ce qui signifie sa décharge vers les bassins d'évaporation), et si les bassins atteignent un niveau de remplissage de 90%, il faudra procéder à la fermeture progressive des puits producteur d'huile à forte teneur en eau dans les gisements d'El-Gassi et de Zotti. Cette action devra être concrétisée par une procédure approuvée par l'équipe de direction et dument communiquée aux parties intéressées.

- recommandation à moyen terme :

A moyen terme, il faudra préconiser de nouvelles barrières proactives et non réactives. En effet, l'évènement redouté étant à risque intolérable, sa prévention s'impose d'où la nécessité de travailler en amont (figure 38) par l'introduction de barrières proactive en considérant la hiérarchie suivante :

1. Barrières d'élimination du danger
2. Barrière d'élimination des menaces
3. Barrières de contrôle des menaces

Une proposition de barrières à considérer par l'équipe de direction est illustrée dans la figure 39.

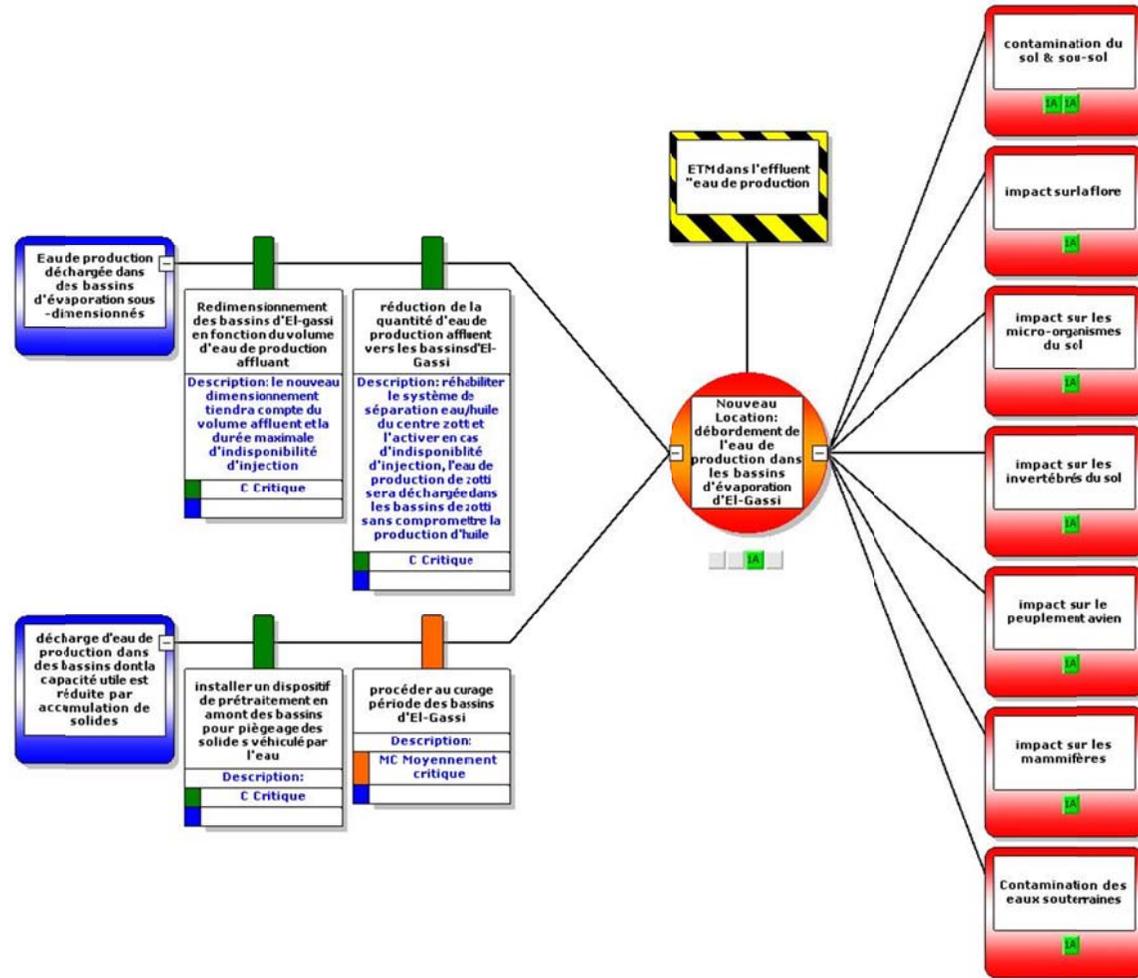


Figure 39 : diagramme nœud papillon relative à l'évènement redouté « débordement d'eau de production des bassins d'El-Gassi

Ainsi, la barrière d'élimination du danger serait par l'installation de dispositif de traitement permettant le rabattement des concentrations en éléments traces métalliques après la séparation.

Comme barrières d'élimination de la menace 01 (eau de production déchargée dans des bassins d'évaporation sous-dimensionnés), nous préconisons la réduction du volume d'eau de production affluant vers les bassins d'El-Gassi. Ceci pourrait se faire par la réhabilitation du système de séparation eau/huile du centre zotti et son activation en cas d'indisponibilité d'injection au niveau d'El-Gassi. Ainsi, l'eau de production de zotti sera séparée et déchargée dans les bassins d'évaporation de zotti (conçus initialement à cet effet) prévenant le débordement au niveau des bassins d'El-Gassi sans pour autant pénaliser la production d'huile.

Comme barrière d'élimination de la menace 02 (décharge d'eau de production dans des bassins dont la capacité utile est réduite par l'accumulation de solides), nous préconisons l'installation d'un dispositif de piégeage des solides en aval immédiat du point de rejet et en amont du bassin d'évaporation.

Comme barrière de prévention de la menace 01(eau de production déchargée dans des bassins d'évaporation sous-dimensionnés), nous préconisons l'installation de nouveaux bassins dont le dimensionnement devrait tenir compte du volume total affluant durant la durée maximale correspondant aux pire scénario relatif à l'indisponibilité d'injection d'eau de production

Comme barrière de prévention de la menace 02 (décharge d'eau de production dans des bassins dont la capacité utile est réduite par l'accumulation de solides), nous préconisons de mettre en place un programme de maintenance préventive relatif au curage des bassins d'évaporation d'El-Gassi.

Enfin, il est important de souligner que l'analyse des risques des autres évènements redoutés identifiés comme associés au danger « éléments traces métalliques dans l'effluent eau de production » devrait se faire avant que l'équipe de direction n'arrête un choix de barrière parmi celles préconisées dans la figure 39. En effet, les résultats de ces analyses pourraient réorienter la prise de décision fait sur la base d'analyse d'un seul évènement redouté.

En conclusion, nous espérons que le présent travail aura réussi (du moins pour l'évènement redouté analysé) à mettre en exergue le danger relatif aux éléments traces métalliques présents dans l'effluent « eau de production » et aura fourni à l'équipe de direction des outils d'aide à la décision pouvant contribuer à implémenter l'amélioration continue des constituants du plan de gestion environnemental de l'entreprise.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Adriano, D.C. 1986. Trace elements in the terrestrial environment. Springer-Verlag, New York.

Allinson, D.W. et C. Dzialo. 1981. The influence of lead, cadmium and nickel on the growth of ryegrass and oats. *Plant Soil* 62:81–89.

Alloway, B.J. 1990. Soil processes and the behaviour of metals, dans *Heavy metals in soils*, B.J. Alloway, éd. Blackie and Son Ltd., Glasgow.

Alloway, B.J. et A.P. Jackson. 1991. The behaviour of heavy metals in sewage sludge-amended soils. *Sci. Total Environ.* 100:151–176.

Balba, A.M., G. El Shibiny et S. El-Khatib. 1991. Effect of lead increments on the yield and lead content of tomato plants. *Water Air Soil Pollut.* 57/58:93–99.

Bengtsson, G. et S. Rundgren. 1984. Ground-living invertebrates in metal polluted forest soils. *Ambio* 13:29–33.

Benjamin, M.M. et J.O. Leckie. 1981a. Competitive adsorption of Cd, Cu, Zn and Pb on amorphous iron oxyhydroxide. *J. Colloid Interface Sci.* 83:410–419.

Benjamin, M.M. et J.O. Leckie. 1981b. Multiple-site adsorption of Cd, Cu, Zn and Pb on amorphous iron oxyhydroxide. *J. Colloid Interface Sci.* 79:209–221.

Bhuiya, M.R.H. et A.H. Cornfield. 1974. Incubation study on effect of pH on nitrogen mineralisation and nitrification in soils treated with 1000 ppm lead and zinc as oxides. *Environ. Pollut.* 7:161–164.

Bingham, F.T., A.L. Page, R.J. Mahler et T.J. Ganje. 1975. Growth and cadmium accumulation of plants grown on a soil treated with a cadmium-enriched sewage-sludge. *J. Environ. Qual.* 4:207–211.

Bollag, J.-M. et J. Czaban. 1989. Effect of microorganisms on extractability of cadmium from soil with sodium hydroxide and DTPA. *J. Soil Sci.* 40:451–460.

Bollag, J.-M. et J. Czaban. 1989. Effect of microorganisms on extractability of cadmium from soil with sodium hydroxide and DTPA. *J. SoilSci.* 40:451–460.

Bollag, J.-M. et W. Barabasz. 1979. Effect of heavy metals on the denitrification process in soil. *J. Environ. Qual.* 8:196–201.

Bruemmer, G.W., J. Gerth et K.G. Tiller. 1988. Reaction kinetics of the adsorption and desorption of nickel, zinc and cadmium by goethite. I. Adsorption and diffusion of metals. *J. Soil Sci.* 39:37–52.

Carlson, C.L. et H.L. Ragsdale. 1988. Effects of simulated acid precipitation on cadmium and zinc-amended soil and soil-pine systems. *Water Air Soil Pollut.* 42:329–340.

Christensen, T.H. 1989a. Cadmium soil sorption at low concentrations: VII, Effect of stable solid waste leachate complexes. *Water Air Soil Pollut.* 44:43–56.

CCME (Conseil canadien des ministres de l'environnement). 1999. Critères provisoires canadiens de qualité environnementale pour les lieux contaminés. CCME, Winnipeg.

—1996b. Document d'orientation sur l'établissement d'objectifs particuliers à un terrain en vue d'améliorer la qualité du sol des lieux contaminés au Canada. CCME, Winnipeg. [Repris dans les Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement, chapitre 7, Conseil canadien des ministres de l'environnement, 1999, Winnipeg.]

CCME (Conseil canadien des ministres de l'environnement). 1991. Critères provisoires canadiens de qualité environnementale pour les lieux contaminés. CCME, Winnipeg.

———. 1993. Guide pour l'échantillonnage, l'analyse des échantillons et la gestion des données des lieux contaminés. Vol. II : Sommaire des méthodes d'analyse. CCME, Winnipeg.

———. 1996a. Protocole d'élaboration de recommandations pour la qualité des sols en fonction de l'environnement et de la santé humaine. CCME, Winnipeg. [Un résumé du protocole figure au chapitre 7 des Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement, Conseil canadien des ministres de l'environnement, 1999, Winnipeg.]

———. 1996b. Document d'orientation sur l'établissement d'objectifs particuliers à un terrain en vue d'améliorer la qualité du sol des lieux contaminés au Canada. CCME, Winnipeg. [Repris dans les Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement, chapitre 7, Conseil canadien des ministres de l'environnement, 1999, Winnipeg.]

———. 1997. Canadian soil quality guidelines for copper: Environmental and human health. Ébauche.

CCMRE (Conseil canadien des ministres des ressources et de l'environnement). 1987. Recommandations canadiennes pour la qualité des eaux. Groupe de travail sur les recommandations pour la qualité des eaux. Ottawa. ON.

CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUEBEC, 2012, valeurs de référence pour les récepteurs terrestres, Québec, Ministère du Développement durable, de l'environnement et des parcs, centre d'expertise en analyses environnementales du Québec, 28p.

Chanmugathas, P. et J.M. Bollag. 1987. Microbial mobilization of cadmium in soil under aerobic and anaerobic conditions. *J. Environ. Qual.* 16:161–167.

Clark, C.E., Veil, J.A. 2009. Produced water volumes and management practices in the United States. Prepared by Environmental science division, Argonne National Laboratory. Prepared for U.S. Department of energy, Office of fossil Energy, National Energy Technology Laboratory. 64 p.

Cole, M.A. 1979. Solubilization of heavy metal sulfides by heterotrophic bacteria. *SoilSci.* 127:313–317.

Cornfield, A.H. 1977. Effects of addition of 12 metals on carbon dioxide release during incubation of an acid sandy soil. *Geoderma* 19:199–203.

Cornfield, A.H. 1977. Effects of addition of 12 metals on CO₂ Release during incubation of an acid sandy soil. *Geoderma* 19:199–203.

Dang, Y.P., R. Chhabra et K.S. Verma. 1990. Effect of Cd, Ni, Pb and Zn on growth and chemical composition of onion and fenugreek. *Commun. SoilSci. Plant Anal.* 21(9&10):717–735.

Doelman, P. et L. Haanstra. 1979. Effect of lead on soil respiration and dehydrogenase activity. *Soil Biol. Biochem.* 11:475–479.

Duffus, J.H. 2002. « Heavy metals » - A meaningless Term ? (IUPAC Technical Report). *Pure Appl. Chem.*, Vol.74, No5, pp. 793-807, 2002. Available at <http://pac.iupac.org/publications/pac/pdf/2002/pdf/7405x0793.pdf>

Duquette, M. et W.H. Hendershot. 1990. Copper and zinc sorption on some B horizons of Quebec soils. *Commun. SoilSci. Plant Anal.* 21:377–394.

e-CFR. 2012 Electronic Code Of Federal regulation. www.ecfr.gov

Eisler, R. 1985. Cadmium Hazards to fish, wildlife, and invertebrates: A synoptic review. *Contaminant Hazard reviews Report No.2.* p.30.

Environnement Canada. 1996. Canadian soil quality guidelines for lead: Environmental. Supporting document — Final draft. December 1996. Direction de la qualité de l'environnement et de la politique scientifique, Division des recommandations, Ottawa.

Environnement Canada. 1995. Toxicity testing of National Contaminated Sites Remediation Program priority substances for the development of soil quality criteria for contaminated sites. Service de la conservation de l'environnement, Direction de l'évaluation et de l'interprétation, Division des recommandations, Ottawa. Inédit.

Environnement Canada. 1996. Canadian soilquality guidelines for zinc: Environmental. Supporting document — Final draft. December 1996. Direction de la qualité de l'environnement et de la politique scientifique, Division des recommandations, Ottawa.

EPA. 2010. U.S. Environmental Protection Agency. 2010. National Pollutant Discharge Elimination system (NPDES) writer's manual. EPA-833-K-10-001. 269 p. Available at http://www.epa.gov/npdes/pubs/pwm_2010.pdf

Environmental Protection Agency. 2012. Available at <http://cfpub1.epa.gov/npdes/generalissues/watertechnology.cfm>

Evans, L.J. 1989. Chemistry of metal retention by soils. Environ. Sci. Technol. 23:1046–1056.

Fu, G., H.E. Allen et C.E. Cowan. 1991. Adsorption and copper by manganese oxide. Soil Sci. 152:72–81.

Fuller, W.H. 1977. Movement of selected metals, asbestos, and cyanide in soil: Applications to waste disposal problems. EPA-600/2-77-020. Préparé pour le Municipal EnvironmentalResearchLab, Cincinnati, OH.

Fuller, W.H. 1977. Movement of selected metals, asbestos, and cyanide in soil: Applications to waste disposal problems. EPA-600/2-77-020. Préparé pour le Municipal EnvironmentalResearchLab, Cincinnati, OH.

Gibson, M.J. et J.G. Farmer. 1984. Chemical partitioning of trace metal contaminants in urban street dirt. Sci. Total Environ. 33:49–57.

Haghiri, F. 1973. Cadmium uptake by plants. J. Environ. Qual. 2:93–96.

Hartenstein, R., E.F. Neuhauser et J. Collier. 1981. Effects of heavy metals and other elemental additives to activated sludge on growth of Eiseniafoetida . J. Environ. Qual. 10(3):372–376.

Hassett, J.J., J.E. Miller et D.E. Koeppe. 1976. Interaction of lead and cadmium on maize root growth and uptake of lead and cadmium by roots. Environ. Pollut. 11:297–302.

Hinz, C. et H.M. Selim. 1994. Transport of zinc and cadmium in soils: Experimental evidence and modelling approaches. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:1316–1327.

Hopkin, S.P. et M.H. Martin. 1984. Assimilation of zinc, cadmium, lead and copper by the centipede *Lithobiusveriegatus* (chilopoda). *J. Appl. Ecol.* 21:535-546.

Hunter, B.A., M.S. Johnson et D.J. Thompson. 1987. Ecotoxicology of copper and cadmium in a contaminated grassland ecosystem: I, Soil and vegetation contamination. *J. Appl. Ecol.* 24:573–586.

INERIS.2006. Eléments Traces métalliques- Guide méthodologique : Recommandations pour la modélisation des transferts des éléments traces métalliques dans les sols et les eaux souterraines. p. 138.

Available at www.ineris.fr/centredoc/6624-DESP-R01a_.pdf

Ireland, M.P. 1979. Metal accumulation by the earthworms *Lumbricus rubellus*, *Dendrobaena veneta*, and *Eiseniella tetraedra* living in heavy metal polluted sites. *Environ. Pollut.* 19:201–207.

Jones, K.C. et A.E. Johnston. 1991. Significance of atmospheric inputs of lead to grassland at one site in the United Kingdom since 1860. *Environ. Sci. Technol.* 25:1174–1178.

Kabata-Pendias, A. et H. Pendias. 1991. Trace elements in soils and plants. 2e éd. CRC Press, Boca Raton, FL.

Kabata-Pendias, A. et H. Pendias. 1992. Trace elements in soils and plants. 2e éd. CRC Press, Londres.

Kabata-Pendias, A. and Mukherjee, A.B. 2007. Trace Elements from soil to human. 561 p.

Kelly, J.M., G.R. Parker et W.W. McFee. 1979. Heavy metal accumulation and growth of seedlings of five forest species as influenced by soil cadmium level. *J. Environ. Qual.* 8:361–364.

Khan, D.H. et B. Frankland. 1984. Cellulolytic activity and root biomass production in some metal-contaminated soils. *Environ. Pollut. (Sér. A)* 33:63–74.

Kim, S.J., A.C. Chang, A.L. Page et J.E. Warneke. 1988. Relative concentrations of cadmium and zinc in tissue of selected food plants grown on sludge-treated soils. *J. Environ. Qual.* 17:568–573.

Kuboi, T., A. Noguchi et J. Yazaki. 1986. Family-dependent cadmium accumulation characteristics in higher plants. *Plant Soil* 92:405–415.

Koplos et al, 2006. UIC program mechanical integrity testing. Available at <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/06/carbon-seq/Tech%20Session%20139.pdf>

- Leita, L. et M. De Nobili. 1991. Water-soluble fractions of heavy metals during composting of municipal solid waste. *J. Environ. Qual.* 20:73-78.
- Liang, C.N. et M.A. Tabatabai. 1977. Effects of trace elements on nitrogen mineralization in soils. *Environ. Pollut.* 12:141–147.
- Liang, C.N. et M.A. Tabatabai. 1978. Effects of trace elements on nitrification in soils. *J. Environ. Qual.* 7:291-293.
- Lide, D.R. (éd.). 1992. *CRC handbook of chemistry and physics.* 72 éd. CRC Press, Cleveland, OH.
- Lindsay, W.L. 1972. Zinc in soils and plant nutrition. *Adv. Agron.* 24:147–186.
- Lindsay, W.L. 1979. *Chemical equilibria in soils.* John Wiley and Sons, New York.
- Ma, W. 1988. Toxicity of copper to lumbricid earthworms in sandy agricultural soils amended with Cu-enriched organic waste materials. *Ecol. Bull.* 39:53–56.
- Ma, W.C. 1982. The influence of soil properties and worm-related factors on the concentration of heavy metals in earthworms. *Pedobiologia* 24:109–119.
- Martien, P.M.J. et R.F. Hogervorst. 1993. Metal accumulation in soil arthropods in relation to micro-nutrients. *Environ. Pollut.* 79:181–189.
- McBride, M.B., L.D. Tyler et D.A. Hovde. 1981. Cadmium adsorption by soils and uptake by plants as affected by soil chemical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:739–744.
- MEEO (Ministry of Environment and Energy of Ontario). 1994. Scientific criteria for multimedia environmental standards development: Lead. P.378. available at <http://ia600406.us.archive.org/10/items/scientificcriter00flemuoft/scientificcriter00flemuoft.pdf>
- Miller, J.E., J.J. Hassett et D.E. Koeppe. 1977. Interactions of lead and cadmium on metal uptake and growth of corn plants. *J. Environ. Qual.* 6:18–20.
- Naidu, C.K. et T.K. Reddy. 1988. Effect of cadmium on microorganisms and microbe-mediated mineralization process in the soil. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 41:657–663.
- Nakos, G. 1979. Lead pollution: Fate of lead in the soil and its effect on *Pinushalepensis* . *Plant Soil* 53:427–443.
- National Energy Technology Laboratory. 2012. Produced Water Management Information System. <http://www.netl.doe.gov/technologies/PWMIS/index.html>

Nriagu, J.O. 1979. The global copper cycle, dans *Copper in the environment: Part 1, Ecological cycling*, J.O. Nriagu, éd. John Wiley and Sons, Toronto.

OGP. 2000. Guidelines for produced water injection. Available at <http://www.ogp.org.uk/pubs/302.pdf>

Pahlsson, A.B. 1989. Toxicity of heavy metals (Zn, Cu, Cd, Pb) to vascular plants. *Water Air Soil Pollut.* 47:287–319.

Patterson W.A., III et J.J. Olson. 1982. Effects of heavy metals on radicle growth of selected woody species germinated on filter paper, mineral and organic soil substrates. *Can. J. For. Res.* 13:233–238.

Puder, M.G. and Veil, J.A. 2006. Offsite Commercial Disposal of Oil and Gas Exploration and Production Waste: Availability, Options, and Costs, ANL/EVS/R-06/5, prepared by the Environmental Science Division, Argonne National Laboratory for the U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy and National Energy Technology Laboratory.

Available at http://www.evs.anl.gov/pub/dsp_detail.cfm?PubID=2006

Reddy, K.R. et W.H. Patrick, Jr. 1983. Effects of aeration on reactivity and mobility of soil constituents, dans *Chemical mobility and reactivity in soil systems*, SSSA Special Publication Number 11. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy. Madison, WI.

Sachdev, P., W.L. Lindsay et D.L. Deb. 1992. Activity measurements of zinc in soils of different pH using EDTA. *Geoderma* 55:247–257.

Santillan-Medrano, J. et J.J. Jurinak. 1975. The chemistry of lead and cadmium in soil: Solid-phase formation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 39:851–856.

Seiler, J.R. et D. Paganelli. 1987. Photosynthesis and growth response of red spruce and loblolly pine to soil-applied lead and simulated acid rain. *For. Sci.* 33(3):668–675.

Seiler, J.R. et D. Paganelli. 1987. Photosynthesis and growth response of red spruce and loblolly pine to soil-applied lead and simulated acid rain. *For. Sci.* 33(3):668–675.

Sheppard, S.C., W.G. Evenden, S.A. Abboud et M. Stephenson. 1993. A plant life-cycle bioassay for contaminated soil, with comparison to other bioassays: Mercury and zinc. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 25:27–35.

Shuman, L.M. 1975. The effect of soil properties on zinc adsorption by soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 39:454–459.

Singh, B.R. 1990. Cadmium and fluoride uptake by oats and rape from phosphate fertilizers in two different soils: Cadmium and fluoride uptake by plants from phosphorus fertilizers. *Norw. J. Agric. Sci.* 4:239–250.

Slooff, W., R.F.M.J. Clever, J.A. Janus et J.P.M. Ros. 1989. Integrated criteria document copper. Rapport no . 758474009. National Institute of Public Health and Environmental Protection, Bilthoven, Pays-Bas.

Thornhill et al. 1982. Application of area of review concept. Available at <http://info.ngwa.org/gwol/pdf/820611455.PDF>

Trouvay & Cauvin .1998. Piping equipment / Matériel Pétrole. p.365.

Van Straalen, N.M. et J.H. van Meerendonk. 1987. Biological half-lives of lead in *Orchesellacincta* (L.) (Collembola). Bull. Environ.Contam. Toxicol. 38:213–219.

U.S. Environmental Protection Agency. 1996c. Engineering Bulletin: Technology Alternatives for the Remediation of Soils Contaminated with Arsenic, Cadmium, Chromium, Mercury, and Lead, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Emergency and Remedial Response, Cincinnati, OH, draft.

U.S. Environmental Protection Agency. 2005a. Ecological Soil Screening levels for Cadmium. Interim Final. OSWER Directive 9285.7-65. March 2005. P. 236. Available at http://www.epa.gov/ecotox/ecossl/pdf/eco-ssl_cadmium.pdf

U.S. Environmental Protection Agency. 2005b. Ecological Soil Screening levels for Lead. Interim Final. OSWER Directive 9285. 7-70. March 2005. P. 242. Available at http://www.epa.gov/ecotox/ecossl/pdf/eco-ssl_lead.pdf

U.S. Environmental Protection Agency. 2007a. Ecological Soil Screening levels for Copper. Interim Final. OSWER Directive 9285. 7-68. February 2007. P. 313. Available at http://www.epa.gov/ecotox/ecossl/pdf/eco-ssl_copper.pdf

U.S. Environmental Protection Agency. 2007b. Ecological Soil Screening levels for Zinc. Interim Final. OSWER Directive 9285. 7-73. June 2007. P. 808. Available at http://www.epa.gov/ecotox/ecossl/pdf/eco-ssl_zinc.pdf

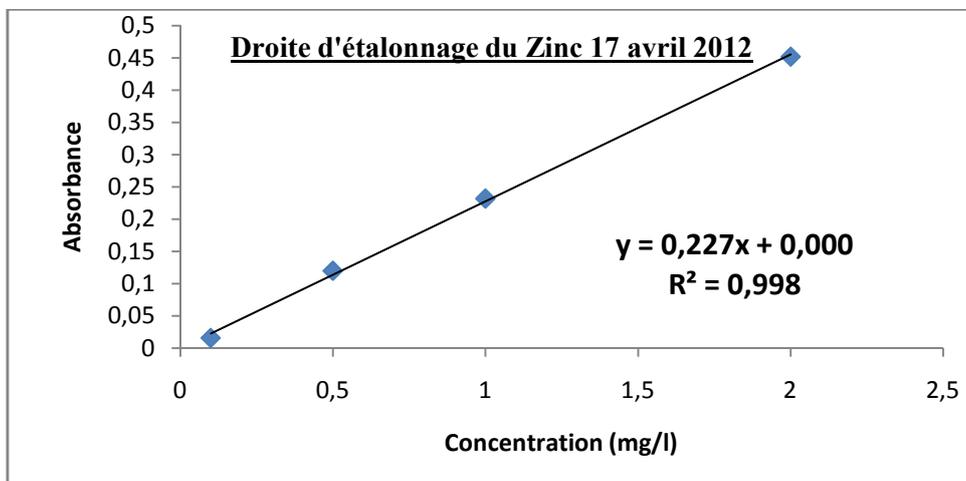
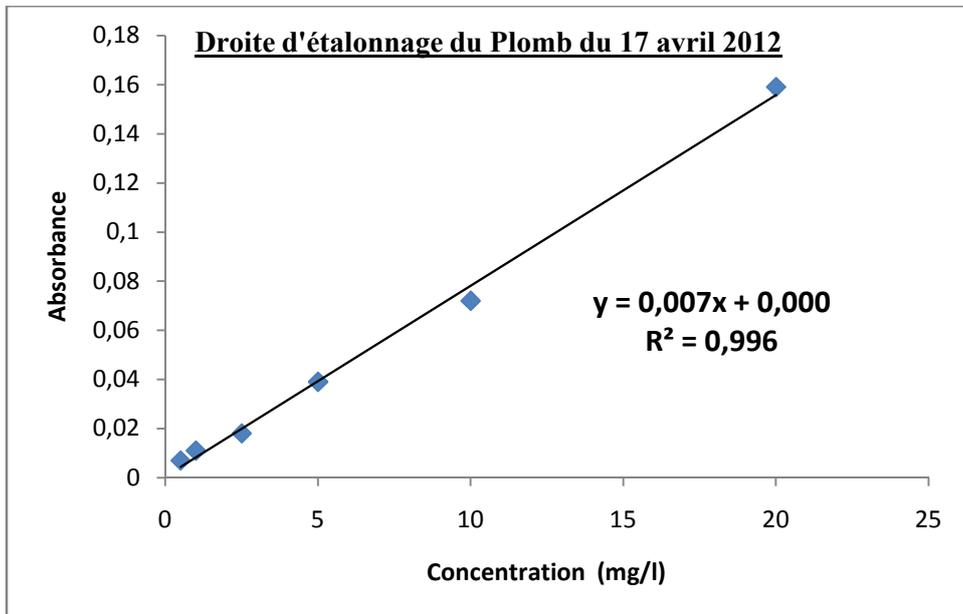
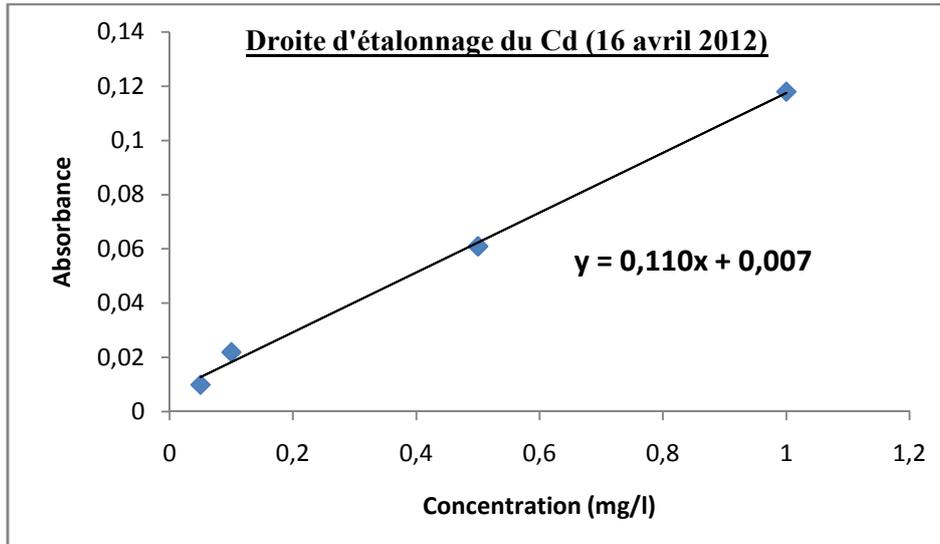
Van Straalen, N.M., T.B.A. Burghouts et M.J. Doornhof. 1985. Dynamics of heavy metals in populations of *Collembola* in a contaminated pine forest soil. International Conference on Heavy Metals in the Environment, Athens 1985, vol 1. CEP Consultants, Edinburgh.

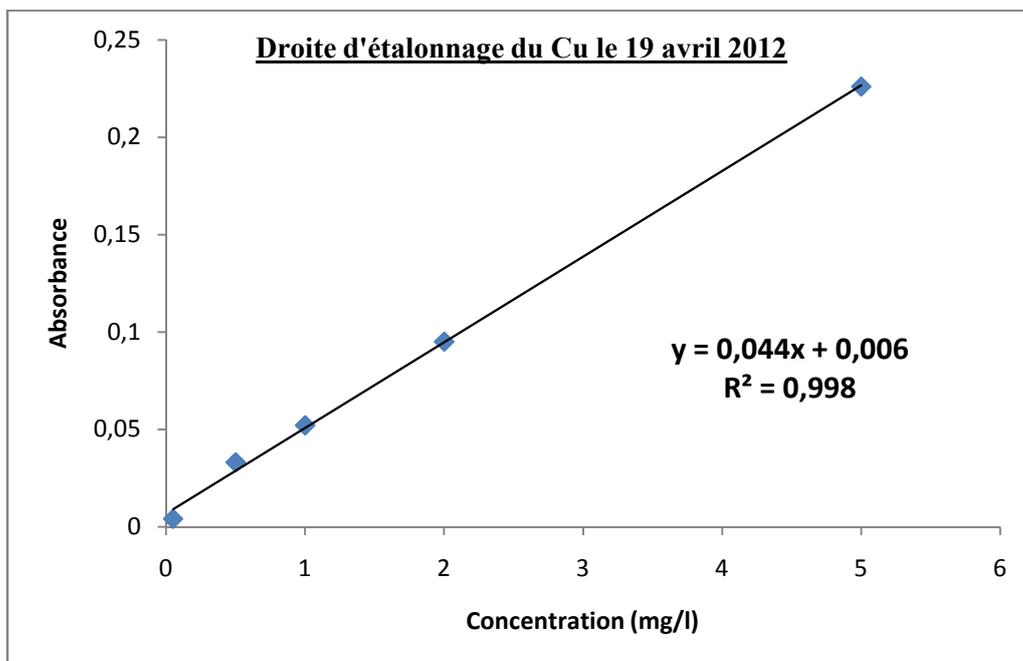
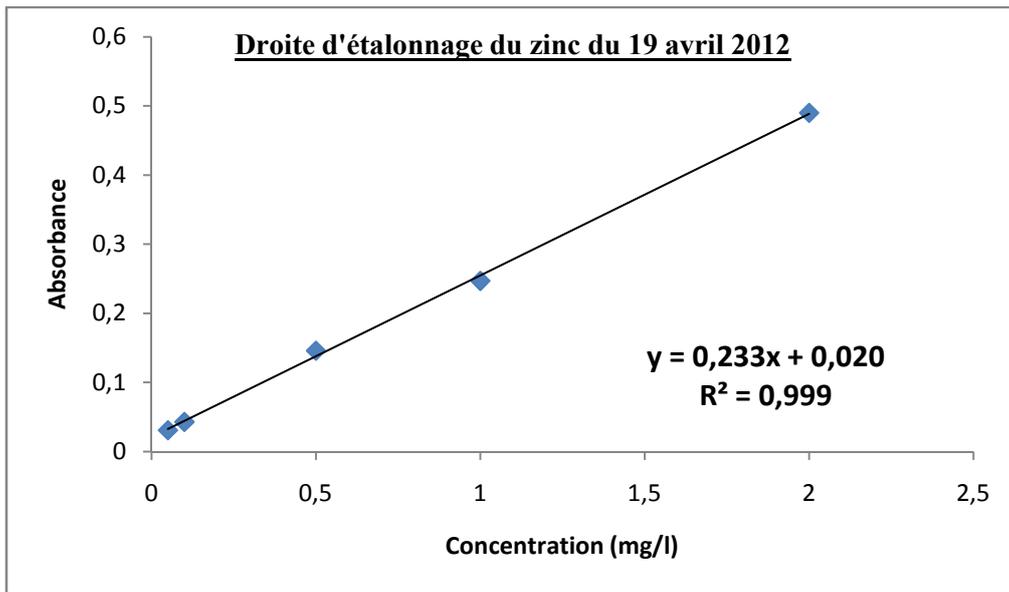
Veil, J.A., Puder, M.G., Elcock, D., Redweik, R.J. 2004. A white paper describing produced water from production of crude oil, natural gas and coal bed methane. Prepared by Argonne National Laboratory. Prepared for U.S. Department of energy, National Energy Technology Laboratory . 87 p.

Wilke, B.-M. 1989. Long-term effects of different inorganic pollutants on nitrogen transformations in a sandy cambisol. Biol. Fertil. Soils7:254-258.

Liste des annexes

Annexe 01





Annexe 02

Qualitative Risk Matrix

Likelihood

The likelihood of the hazard being realized is categorized by reviewing and choosing a descriptor. The choice is based solely on the information available to the risk assessment team which could include industry and company data on the past incidents as well as the knowledge and experience of the

Almost Certain	The event is expected to occur in most circumstances	The team know of several events occurring in recent months
Probable	The event will probably occur in most circumstances	It is a common occurrence in industry, but not heard of in SonaHess in the last year
Possible	The event may occur at some time	The team know of a few occurrences but not in the last few years
Unlikely	The event could occur at some time	Only a few occurrences are known of in the experience of the team
Rare	The event may occur only in exceptional circumstances	The team have never heard of such an event occurring in SonaHess or industry generally

Qualitative Risk Analysis

Qualitative risk analysis uses words to describe the magnitude of the potential severity and likelihood. The risk level is then also expressed with words such as High, Medium and Low. Qualitative analysis is generally used in high level Preliminary Risk Assessment processes, any Qualitative Risk Assessment or workplace risk assessments such as Job Safety Analysis and Hazard Spotting. This is mainly because the qualitative approach is more appropriate to the detail required in the assessment of the level of risk being managed. If a high level of risk is identified, normal practice is to conduct a more detailed risk assessment.

		Gravité					
E	Quasi-Certain	Moyen	Elevé	Elevé	Elevé	Elevé	Probabilité
	Probable	Moyen	Moyen	Elevé	Elevé	Elevé	
	Possible	Faible	Moyen	Moyen	Elevé	Elevé	
	Improbable	Faible	Faible	Moyen	Moyen	Elevé	
	Rare	Faible	Faible	Faible	Moyen	Moyen	
		Non-Significatif	Significatif	Sevère	Majeur	Catastrophique	
			1	2	3	4	5

Risk definitions

High (Intolerable)

If the risk level is High, it is considered to be unacceptable. High is illustrated on the Risk Matrix as the area shaded in red. If a high risk result remains, once all available controls have been identified, the risk **must not** be undertaken. Further review, consultation and risk assessment is required.

Medium (Tolerable)

A risk defined as Medium is considered tolerable; this region of the Risk Matrix is shaded in yellow. Although these risks are in the tolerable range, efforts **must** still be made to reduce them to levels that are as low as reasonably practicable. This is the ALARP principle and it must be clearly demonstrated.

Low (Acceptable)

The acceptable risk criteria is described as Low, this region of the Risk Matrix is shaded in green. Any risk that lies below the lower bound of the tolerable region is broadly acceptable. Note that if a risk is acceptable this does not necessarily preclude the initiation of improvements if they are economic, readily identified and practicable.

Severity

Decision Issue	People	Slight injury/illness, first aid or medical treatment case	Minor injury/illness, restricted duties or lost-time injury (<4 days)	Major injury/illness, permanent partial disability or lost-time injury (>4 days)	Single fatality (or permanent total disability)	Multiple fatalities (or permanent total disabilities)
	Asset/Production	Slight damage, <\$US100K	Minor damage, \$US100K - \$US1M	Local damage, \$US1M - \$US10M	Major damage, \$US10M - \$US100M	Extensive damage, \$US100M - \$US1,000M
	Environment	Slight effect, localized scale (immediate area), temporary impact (days)	Minor effect, localized scale (<1 square mile), short-term impact (weeks)	Local effect, medium scale (1-10 square miles), medium-term impact (months)	Major effect, medium scale (1-10 square miles), medium-term impact (years)	Massive effect, large scale (10-100 square miles), long-term impact (decades)
	Reputation	Slight impact, local mention only, quickly forgotten, freedom to operate unaffected.	Minor impact, short-term local concern. Prosecution with minor financial and/or short-term reputational impact, some impact on asset level non-production activities.	Considerable impact, national bad mention. Prosecution with substantial financial and/or local reputation impact, short-term regional concern. Close scrutiny of asset level operations/future.	Major national impact, medium-term national concern, prosecution with major financial and/or national reputational impact, minor venture or minor asset operations restricted or curtailed.	Major international impact, persistent national concern, prosecution with material and/or international reputational impact, long-term "brand" impact, major ventures/asset operations severely restricted or curtailed.
		Insignificant	Significant	Severe	Major	Catastrophique

The severity of the hazard being realized is categorized by reviewing and choosing a descriptor. The team reviews and chooses the severity descriptor which best represents the seriousness of the possible consequences should the hazard occur. All four types of severity must be considered (People, Asset/Production, Environment and Reputation). Each of the severity categories are represented on the Risk Matrix by a description (e.g. Catastrophique), the descriptor chosen must represent the severest category agreed upon by the team. For example, if the Environment severity was insignificant but the Asset/Production severity was major then major is the overall severity rating which should be used.

Annexe 03

Notes

	Output Created	04-août-2012 09:44:15
	Comments	
Input	Data	C:\Documents and Settings\Administrateur\Bureau\SO NAHESS JUillet 2012\memoire mehdi\RESULTATS\test T échantillon unique\PW GS01\GS 01 POINT 01.sav
	Active Dataset	DataSet1
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	9
Missing Value Handling	Definition of Missing	User defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each analysis are based on the cases with no missing or out-of-range data for any variable in the analysis.
	Syntax	T-TEST /TESTVAL=0.5 /MISSING=ANALYSIS /VARIABLES=Pb /CRITERIA=CI(.95).
Resources	Processor Time	0:00:00.016
	Elapsed Time	0:00:00.015

Notes

	Output Created	04-août-2012 09:45:35
	Comments	
Input	Data	C:\Documents and Settings\Administrateur\Bureau\SO NAHESS JUillet 2012\memoire mehdi\RESULTATS\test T échantillon unique\PW GS01\GS 01 POINT 01.sav
	Active Dataset	DataSet1
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	9
Missing Value Handling	Definition of Missing	User defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each analysis are based on the cases with no missing or out-of-range data for any variable in the analysis.
	Syntax	T-TEST /TESTVAL=3 /MISSING=ANALYSIS /VARIABLES=Zn /CRITERIA=CI(.95).
Resources	Processor Time	0:00:00.000
	Elapsed Time	0:00:00.000

Notes

	Output Created	04-août-2012 09:47:25
	Comments	
Input	Data	C:\Documents and Settings\Administrateur\Bureau\SO NAHESS JUillet 2012\memoire mehdi\RESULTATS\test T échantillon unique\PW GS01\GS 01 POINT 01.sav
	Active Dataset	DataSet1
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	9
Missing Value Handling	Definition of Missing	User defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each analysis are based on the cases with no missing or out-of-range data for any variable in the analysis.
	Syntax	T-TEST /TESTVAL=0.2 /MISSING=ANALYSIS /VARIABLES=Cd /CRITERIA=CI(.95).
Resources	Processor Time	0:00:00.015
	Elapsed Time	0:00:00.017

Notes

	Output Created	04-août-2012 09:50:03
	Comments	
Input	Data	C:\Documents and Settings\Administrateur\Bureau\SO NAHESS JUillet 2012\memoire mehdi\RESULTATS\test T échantillon unique\PW GS01\GS 01 POINT 01.sav
	Active Dataset	DataSet1
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	9
Missing Value Handling	Definition of Missing	User defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each analysis are based on the cases with no missing or out-of-range data for any variable in the analysis.
	Syntax	T-TEST /TESTVAL=0.2 /MISSING=ANALYSIS /VARIABLES=Cu /CRITERIA=CI(.95).
Resources	Processor Time	0:00:00.000
	Elapsed Time	0:00:00.000

Notes

	Output Created	04-août-2012 09:56:16
	Comments	
Input	Data	C:\Documents and Settings\Administrateur\Bureau\SO NAHESS JUillet 2012\memoire mehdi\RESULTATS\test T échantillon unique\PW GS01\GS 01 POINT 01.sav
	Active Dataset	DataSet1
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	9
Missing Value Handling	Definition of Missing	User defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each analysis are based on the cases with no missing or out-of-range data for any variable in the analysis.
	Syntax	T-TEST /TESTVAL=6.5 /MISSING=ANALYSIS /VARIABLES=pH /CRITERIA=CI(.95).
Resources	Processor Time	0:00:00.000
	Elapsed Time	0:00:00.000

Notes

	Output Created	04-août-2012 09:57:29
	Comments	
Input	Data	C:\Documents and Settings\Administrateur\Bureau\SO NAHESS JUillet 2012\memoire mehdi\RESULTATS\test T échantillon unique\PW GS01\GS 01 POINT 01.sav
	Active Dataset	DataSet1
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	9
Missing Value Handling	Definition of Missing	User defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each analysis are based on the cases with no missing or out-of-range data for any variable in the analysis.
	Syntax	T-TEST /TESTVAL=35 /MISSING=ANALYSIS /VARIABLES=MES /CRITERIA=CI(.95).
Resources	Processor Time	0:00:00.000
	Elapsed Time	0:00:00.000

Notes

	Output Created	04-août-2012 09:58:40
	Comments	
Input	Data	C:\Documents and Settings\Administrateur\Bureau\SO NAHESS JUILlet 2012\memoire mehdi\RESULTATS\test T échantillon unique\PW GS01\GS 01 POINT 01.sav
	Active Dataset	DataSet1
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	9
Missing Value Handling	Definition of Missing	User defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each analysis are based on the cases with no missing or out-of-range data for any variable in the analysis.
	Syntax	T-TEST /TESTVAL=20 /MISSING=ANALYSIS /VARIABLES=OIW /CRITERIA=CI(.95).
Resources	Processor Time	0:00:00.015
	Elapsed Time	0:00:00.017

Notes

	Output Created	08-août-2012 00:00:01
	Comments	
Input	Data	C:\Documents and Settings\Administrateur\Bureau\SO NAHESS JUILlet 2012\memoire mehdi\RESULTATS\OBJECTIF 01 CONFORMITE PW\CONFRONTATION\GS 01\PW GS01.sav
	Active Dataset	DataSet9
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	3
Missing Value Handling	Definition of Missing	User defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each analysis are based on the cases with no missing or out-of-range data for any variable in the analysis.
	Syntax	T-TEST /TESTVAL=0.5 /MISSING=ANALYSIS /VARIABLES=Pb /CRITERIA=CI(.95).
Resources	Processor Time	0:00:00.000
	Elapsed Time	0:00:00.000

T-TEST

```

/TESTVAL=0.5
/MISSING=ANALYSIS
/VARIABLES=Pb
/CRITERIA=CI(.95).
    
```

T-Test

Notes

	Output Created	08-août-2012 00:02:45
	Comments	
Input	Data	C:\Documents and Settings\Administrateur\Bureau\SONAHESS JUILlet 2012\memoire mehdi\RESULTATS\OBJECTIF 01 CONFORMITE PW\CONFRONTATION\GS 01\PW GS01.sav
	Active Dataset	DataSet9
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	8
Missing Value Handling	Definition of Missing	User defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each analysis are based on the cases with no missing or out-of-range data for any variable in the analysis.
	Syntax	T-TEST /TESTVAL=0.5 /MISSING=ANALYSIS /VARIABLES=Pb /CRITERIA=CI(.95).
Resources	Processor Time	0:00:00.000
	Elapsed Time	0:00:00.047

[DataSet9] C:\Documents and Settings\Administrateur\Bureau\SONAHESS JUILlet 2012\memoire mehdi\RESULTATS\OBJECTIF 01 CONFORMITE PW\CONFRONTATION\GS 01\PW GS01.sav

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pb	3	41,9048	10,03396	5,79311

T-TEST

```

/TESTVAL=3
/MISSING=ANALYSIS
/VARIABLES=Zn
/CRITERIA=CI(.95).
    
```

T-Test

Notes

	Output Created	08-août-2012 00:16:24
	Comments	
Input	Data	C:\Documents and Settings\Administrateur\Bureau\SONAHESS JUILlet 2012\memoire mehdi\RESULTATS\OBJECTIF 01 CONFORMITE PW\CONFRONTATION\GS 01\PW GS01.sav
	Active Dataset	DataSet9
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	8
Missing Value Handling	Definition of Missing	User defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each analysis are based on the cases with no missing or out-of-range data for any variable in the analysis.
	Syntax	T-TEST /TESTVAL=3 /MISSING=ANALYSIS /VARIABLES=Zn /CRITERIA=CI(.95).
Resources	Processor Time	0:00:00.000
	Elapsed Time	0:00:00.000

[DataSet9] C:\Documents and Settings\Administrateur\Bureau\SONAHESS JUILlet 2012\memoire mehdi\RESULTATS\OBJECTIF 01 CONFORMITE PW\CONFRONTATION\GS 01\PW GS01.sav

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Zn	3	41,9048	10,03396	5,79311

One-Sample Test

	Test Value = 3					
					95% Confidence Interval of the Difference	
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Lower	Upper
Zn	6,716	2	,021	38,90476	13,9790	63,8305

T-TEST

```

/TESTVAL=0.2
/MISSING=ANALYSIS
/VARIABLES=Cd
    
```

/CRITERIA=CI(.95).

T-Test

Notes

	Output Created	08-août-2012 00:19:05
	Comments	
Input	Data	C:\Documents and Settings\Administrateur\Bureau\SONAHESS JUILlet 2012\memoire mehdi\RESULTATS\OBJECTIF 01 CONFORMITE PW\CONFRONTATION\GS 01\PW GS01.sav
	Active Dataset	DataSet9
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	8
Missing Value Handling	Definition of Missing	User defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each analysis are based on the cases with no missing or out-of-range data for any variable in the analysis.
	Syntax	T-TEST /TESTVAL=0.2 /MISSING=ANALYSIS /VARIABLES=Cd /CRITERIA=CI(.95).
Resources	Processor Time	0:00:00.000
	Elapsed Time	0:00:00.015

[DataSet9] C:\Documents and Settings\Administrateur\Bureau\SONAHESS JUILlet 2012\memoire mehdi\RESULTATS\OBJECTIF 01 CONFORMITE PW\CONFRONTATION\GS 01\PW GS01.sav

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Cd	3	,5000	,04810	,02777

One-Sample Test

	Test Value = 0.2					
					95% Confidence Interval of the Difference	
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Lower	Upper
Cd	10,802	2	,008	,30000	,1805	,4195

T-TEST

/TESTVAL=0.5

/MISSING=ANALYSIS

```

/VARIABLES=Cu
/CRITERIA=CI(.95).

```

T-Test

Notes

	Output Created	08-août-2012 00:19:56
	Comments	
Input	Data	C:\Documents and Settings\Administrateur\Bureau\SONAHESS Juillet 2012\memoire mehdi\RESULTATS\OBJECTIF 01 CONFORMITE PW\CONFRONTATION\GS 01\PW GS01.sav
	Active Dataset	DataSet9
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	8
Missing Value Handling	Definition of Missing	User defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each analysis are based on the cases with no missing or out-of-range data for any variable in the analysis.
	Syntax	T-TEST /TESTVAL=0.5 /MISSING=ANALYSIS /VARIABLES=Cu /CRITERIA=CI(.95).
Resources	Processor Time	0:00:00.000
	Elapsed Time	0:00:00.031

[DataSet9] C:\Documents and Settings\Administrateur\Bureau\SONAHESS Juillet 2012\memoire mehdi\RESULTATS\OBJECTIF 01 CONFORMITE PW\CONFRONTATION\GS 01\PW GS01.sav

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Cu	3	,1742	,01312	,00758

One-Sample Test

	Test Value = 0.5					
					95% Confidence Interval of the Difference	
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Lower	Upper
Cu	-43,000	2	,001	-,32576	-,3584	-,2932

```

SAVE OUTFILE='C:\Documents and Settings\Administrateur\Bureau\SONAHESS JUI
llet 2012\memoire '+
'mehdi\RESULTATS\CONFRONTATION\PW WA\PW WA CONFRONTATION.sav'
/COMPRESSED.
T-TEST
/TESTVAL=0.5
/MISSING=ANALYSIS
/VARIABLES=Pb
/CRITERIA=CI(.95).

```

T-Test

Notes

	Output Created	04-août-2012 10:03:01
	Comments	
Input	Data	C:\Documents and Settings\Administrateur\Bureau\SONAHESS JUIllet 2012\memoire mehdi\RESULTATS\CONFRONTATION\PW WA\PW WA CONFRONTATION.sav
	Active Dataset	DataSet1
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	9
Missing Value Handling	Definition of Missing	User defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each analysis are based on the cases with no missing or out-of-range data for any variable in the analysis.
	Syntax	T-TEST /TESTVAL=0.5 /MISSING=ANALYSIS /VARIABLES=Pb /CRITERIA=CI(.95).
Resources	Processor Time	0:00:00.016
	Elapsed Time	0:00:00.014

[DataSet1] C:\Documents and Settings\Administrateur\Bureau\SONAHESS JUIllet 2012\memoire mehdi\RESULTATS\CONFRONTATION\PW WA\PW WA CONFRONTATION.sav

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pb	3	31,2381	10,22735	5,90476

One-Sample Test

	Test Value = 0.5					
					95% Confidence Interval of the Difference	
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Lower	Upper
Pb	5,206	2	,035	30,73810	5,3320	56,1442

T-TEST

```

/TESTVAL=3
/MISSING=ANALYSIS
/VARIABLES=Zn
/CRITERIA=CI(.95).
    
```

T-Test

Notes

Input	Output Created	04-août-2012 10:04:10
	Comments	
Missing Value Handling	Data	C:\Documents and Settings\Administrateur\Bureau\SONAHESS JUILlet 2012\memoire mehdi\RESULTATS\CONFRONTATION\PW WA\PW WA CONFRONTATION.sav
	Active Dataset	DataSet1
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	9
Resources	Definition of Missing	User defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each analysis are based on the cases with no missing or out-of-range data for any variable in the analysis.
	Syntax	T-TEST /TESTVAL=3 /MISSING=ANALYSIS /VARIABLES=Zn /CRITERIA=CI(.95).
Resources	Processor Time	0:00:00.016
	Elapsed Time	0:00:00.014

[DataSet1] C:\Documents and Settings\Administrateur\Bureau\SONAHESS JUILlet 2012\memoire mehdi\RESULTATS\CONFRONTATION\PW WA\PW WA CONFRONTATION.sav

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Zn	3	76,6810	3,16357	1,82649

One-Sample Test

	Test Value = 3					
					95% Confidence Interval of the Difference	
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Lower	Upper
Zn	40,340	2	,001	73,68097	65,8222	81,5397

T-TEST

```

/TESTVAL=0.2
/MISSING=ANALYSIS
/VARIABLES=Cd
/CRITERIA=CI(.95).
    
```

T-Test

Notes

Input	Output Created	04-août-2012 10:04:46
	Comments	
	Data	C:\Documents and Settings\Administrateur\Bureau\SONAHESS JUILlet 2012\memoire mehdi\RESULTATS\CONFRONTATION\PW WA\PW WA CONFRONTATION.sav
	Active Dataset	DataSet1
Missing Value Handling	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	9
	Definition of Missing	User defined missing values are treated as missing.
Resources	Cases Used	Statistics for each analysis are based on the cases with no missing or out-of-range data for any variable in the analysis.
	Syntax	T-TEST /TESTVAL=0.2 /MISSING=ANALYSIS /VARIABLES=Cd /CRITERIA=CI(.95).
Resources	Processor Time	0:00:00.000
	Elapsed Time	0:00:00.063

[DataSet1] C:\Documents and Settings\Administrateur\Bureau\SONAHESS JUILlet 2012\memoire mehdi\RESULTATS\CONFRONTATION\PW WA\PW WA CONFRONTATION.sav

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Cd	3	,4061	,03193	,01843

One-Sample Test

	Test Value = 0.2					
					95% Confidence Interval of the Difference	
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Lower	Upper
Cd	11,179	2	,008	,20606	,1268	,2854

T-TEST

```

/TESTVAL=0.5
/MISSING=ANALYSIS
/VARIABLES=Cu
/CRITERIA=CI(.95).
    
```

T-Test

Notes

Input	Output Created	04-août-2012 10:06:58
	Comments	
Missing Value Handling	Data	C:\Documents and Settings\Administrateur\Bureau\SONAHESS JUILlet 2012\memoire mehdi\RESULTATS\CONFRONTATION\PW WA\PW WA CONFRONTATION.sav
	Active Dataset	DataSet1
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	
Resources	Definition of Missing	User defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each analysis are based on the cases with no missing or out-of-range data for any variable in the analysis.
	Syntax	T-TEST /TESTVAL=0.5 /MISSING=ANALYSIS /VARIABLES=Cu /CRITERIA=CI(.95).
Resources	Processor Time	0:00:00.016
	Elapsed Time	0:00:00.014

[DataSet1] C:\Documents and Settings\Administrateur\Bureau\SONAHESS JUILlet 2012\memoire mehdi\RESULTATS\CONFRONTATION\PW WA\PW WA CONFRONTATION.sav

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Cu	3	,1212	,01312	,00758

One-Sample Test

	Test Value = 0.5					
					95% Confidence Interval of the Difference	
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Lower	Upper
Cu	-50,000	2	,000	-,37879	-,4114	-,3462

Annexe 04

```

DATASET ACTIVATE DataSet2.
DATASET CLOSE DataSet1.
T-TEST
  /TESTVAL=800 (teneur limite en Pb des déchets ou effluent selon Arrêté
02 02 1998)
  /MISSING=ANALYSIS
  /VARIABLES=Pb
  /CRITERIA=CI(.95).

```

T-Test

Notes

	Output Created	12-févr.-2014 14:24:07
Input	Comments	
	Data	D:\memoire mehdi june 2013\OBJECTIF 02 impact bassin d'evaporation\test T dechets dangereux\GS-01.sav
	Active Dataset	DataSet2
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	3
Missing Value Handling	Definition of Missing	User defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each analysis are based on the cases with no missing or out-of-range data for any variable in the analysis.
	Syntax	T-TEST /TESTVAL=800 /MISSING=ANALYSIS /VARIABLES=Pb /CRITERIA=CI(.95).
Resources	Processor Time	0:00:00.016
	Elapsed Time	0:00:00.015

[DataSet2] D:\memoire mehdi june 2013\OBJECTIF 02 impact bassin d'evaporation\test T dechets dangereux\GS-01.sav

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pb	3	2238,0967	179,75626	103,78232

GET

```

FILE='D:\memoire mehdi june 2013\OBJECTIF 03 EFFICACITE DE TRAITEMENT\PUISRA
T-TEST
  /TESTVAL=800 (teneur limite en Pb des déchets ou effluent selon l'Arrêté 02 C

```

```

/MISSING=ANALYSIS
/VARIABLES=Pb
/CRITERIA=CI(.95).

```

T-Test

Notes

	Output Created	12-févr.-2014 14:26:58
Input	Comments	
	Data	D:\memoire mehdi june 2013\OBJECTIF 03 EFFICACITE DE TRAITEMENT\PUISRAD GS01\puisard GS01.sav
	Active Dataset	DataSet4
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	3
Missing Value Handling	Definition of Missing	User defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each analysis are based on the cases with no missing or out-of-range data for any variable in the analysis.
	Syntax	T-TEST /TESTVAL=800 /MISSING=ANALYSIS /VARIABLES=Pb /CRITERIA=CI(.95).
Resources	Processor Time	0:00:00.000
	Elapsed Time	0:00:00.000

[DataSet4] D:\memoire mehdi june 2013\OBJECTIF 03 EFFICACITE DE TRAITEMENT\PUISRAD GS01\puisard GS01.sav

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pb	3	19523,8100	3523,48829	2034,28691

One-Sample Test

	Test Value = 800					
					95% Confidence Interval of the Difference	
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Lower	Upper
Pb	9,204	2	,012	18723,81000	9970,9799	27476,6401

Annexe 05

T-TEST

/TESTVAL=0 (teneur en Cd du sol non exposé aux déversements d'eau de production)

/MISSING=ANALYSIS

/VARIABLES=Cd

/CRITERIA=CI(.95).

T-Test

Notes

	Output Created	12-févr.-2014 13:33:36
Input	Comments	
	Data	F:\SONAHES DOCS ORDERED DATES\memoire mehdi decembre 2013\OBJECTIF 02 impact bassin d'evaporation\DEUTCH VALUE et indice CCME\sol CONTAMINE ST05.sav
	Active Dataset	DataSet1
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	4
Missing Value Handling	Definition of Missing	User defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each analysis are based on the cases with no missing or out-of-range data for any variable in the analysis.
	Syntax	T-TEST /TESTVAL=0 /MISSING=ANALYSIS /VARIABLES=Cd /CRITERIA=CI(.95).
Resources	Processor Time	0:00:00.015
	Elapsed Time	0:00:00.014

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Cd	3	,1500	,25981	,15000

One-Sample Test

	Test Value = 0					
					95% Confidence Interval of the Difference	
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Lower	Upper
Cd	1,000	2	,423	,15000	-,4954	,7954

T-TEST

/TESTVAL=0 (teneur en Cu du sol non exposé aux déversements d'eau de production)

/MISSING=ANALYSIS

/VARIABLES=Cu

/CRITERIA=CI(.95).

T-Test

Notes

	Output Created	12-févr.-2014 13:35:50
	Comments	
Input	Data	F:\SONAHES DOCS ORDERED DATES\memoire mehdi decembre 2013\OBJECTIF 02 impact bassin d'evaporation\DEUTCH VALUE et indice CCME\sol CONTAMINE ST05.sav
	Active Dataset	DataSet1
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	4
Missing Value Handling	Definition of Missing	User defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each analysis are based on the cases with no missing or out-of-range data for any variable in the analysis.
	Syntax	T-TEST /TESTVAL=0 /MISSING=ANALYSIS /VARIABLES=Cu /CRITERIA=CI(.95).
Resources	Processor Time	0:00:00.000
	Elapsed Time	0:00:00.031

Warnings

The One-Sample Test table is not produced.

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Cu	3	,0000	,00000 ^a	,00000

a. t cannot be computed because the standard deviation is 0.

T-TEST

/TESTVAL=28.57 (teneur relative à l'absorbance 0,0004 lut pour le sol témoin -la plus petite absorbance lut est 0,007 correspondant à une concentration de 50 mg/kg)

/MISSING=ANALYSIS

/VARIABLES=Pb
 /CRITERIA=CI(.95).

T-Test

Notes

	Output Created	12-févr.-2014 13:39:18
Input	Comments	
	Data	F:\SONAHES DOCS ORDERED DATES\memoire mehdi decembre 2013\OBJECTIF 02 impact bassin d'evaporation\DEUTCH VALUE et indice CCME\sol CONTAMINE ST05.sav
	Active Dataset	DataSet1
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	4
Missing Value Handling	Definition of Missing	User defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each analysis are based on the cases with no missing or out-of-range data for any variable in the analysis.
	Syntax	T-TEST /TESTVAL=28.57 /MISSING=ANALYSIS /VARIABLES=Pb /CRITERIA=CI(.95).
Resources	Processor Time	0:00:00.000
	Elapsed Time	0:00:00.017

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pb	3	261,9067	47,56124	27,45949

One-Sample Test

	Test Value = 28.57					
					95% Confidence Interval of the Difference	
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Lower	Upper
Pb	8,497	2	,014	233,33667	115,1880	351,4853

T-TEST

/TESTVAL=0.22 (teneur en Zn relative au sol non exposé aux déversments d'eau de production)
 /MISSING=ANALYSIS
 /VARIABLES=Zn

/CRITERIA=CI (.95) .

T-Test

Notes

	Output Created	12-févr.-2014 13:42:48
	Comments	
Input	Data	F:\SONAHES DOCS ORDERED DATES\memoire mehdi decembre 2013\OBJECTIF 02 impact bassin d'evaporation\DEUTCH VALUE et indice CCME\sol CONTAMINE ST05.sav
	Active Dataset	DataSet1
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	4
Missing Value Handling	Definition of Missing	User defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each analysis are based on the cases with no missing or out-of-range data for any variable in the analysis.
	Syntax	T-TEST /TESTVAL=0.22 /MISSING=ANALYSIS /VARIABLES=Zn /CRITERIA=CI(.95).
Resources	Processor Time	0:00:00.016
	Elapsed Time	0:00:00.031

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Zn	3	56,7567	9,62031	5,55429

One-Sample Test

	Test Value = 0.22					
					95% Confidence Interval of the Difference	
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Lower	Upper
Zn	10,179	2	,010	56,53667	32,6385	80,4349

T-TEST

/TESTVAL=120 (Valeur Référence de Pb pour les végétaux terrestre "USEPA Eco SSL for Pb 2005")

/MISSING=ANALYSIS

/VARIABLES=Pb

/CRITERIA=CI (.95) .

T-Test

Notes

	Output Created	12-févr.-2014 13:47:41
	Comments	
Input	Data	F:\SONAHCESS DOCS ORDERED DATES\memoire mehdi decembre 2013\OBJECTIF 02 impact bassin d'evaporation\DEUTCH VALUE et indice CCME\sol CONTAMINE ST05.sav
	Active Dataset	DataSet1
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	4
Missing Value Handling	Definition of Missing	User defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each analysis are based on the cases with no missing or out-of-range data for any variable in the analysis.
	Syntax	T-TEST /TESTVAL=120 /MISSING=ANALYSIS /VARIABLES=Pb /CRITERIA=CI(.95).
Resources	Processor Time	0:00:00.031
	Elapsed Time	0:00:00.031

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pb	3	261,9067	47,56124	27,45949

One-Sample Test

	Test Value = 120					
					95% Confidence Interval of the Difference	
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Lower	Upper
Pb	5,168	2	,035	141,90667	23,7580	260,0553

T-TEST

/TESTVAL=16.7 (valeur référence pour les végétaux terrestres des sols N 1 "Recommandation Québec pour Pb 2012)

/MISSING=ANALYSIS

/VARIABLES=Pb

/CRITERIA=CI(.95).

T-Test

Notes

	Output Created	12-févr.-2014 13:49:53
	Comments	
Input	Data	F:\SONAHES DOCS ORDERED DATES\memoire mehdi decembre 2013\OBJECTIF 02 impact bassin d'evaporation\DEUTCH VALUE et indice CCME\sol CONTAMINE ST05.sav
	Active Dataset	DataSet1
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	4
Missing Value Handling	Definition of Missing	User defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each analysis are based on the cases with no missing or out-of-range data for any variable in the analysis.
	Syntax	T-TEST /TESTVAL=16.7 /MISSING=ANALYSIS /VARIABLES=Pb /CRITERIA=CI(.95).
Resources	Processor Time	0:00:00.016
	Elapsed Time	0:00:00.031

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pb	3	261,9067	47,56124	27,45949

One-Sample Test

	Test Value = 16.7					
					95% Confidence Interval of the Difference	
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Lower	Upper
Pb	8,930	2	,012	245,20667	127,0580	363,3553

T-TEST

/TESTVAL=172 (valeur référence pour les végétaux terrestres des sols N 2 "Recommandations Québec pour Pb 2012)
/MISSING=ANALYSIS
/VARIABLES=Pb
/CRITERIA=CI(.95).

T-Test

Notes

	Output Created	12-févr.-2014 13:51:34
	Comments	
Input	Data	F:\SONAHES DOCS ORDERED DATES\memoire mehdi decembre 2013\OBJECTIF 02 impact bassin d'evaporation\DEUTCH VALUE et indice CCME\sol CONTAMINE ST05.sav
	Active Dataset	DataSet1
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	4
Missing Value Handling	Definition of Missing	User defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each analysis are based on the cases with no missing or out-of-range data for any variable in the analysis.
	Syntax	T-TEST /TESTVAL=172 /MISSING=ANALYSIS /VARIABLES=Pb /CRITERIA=CI(.95).
Resources	Processor Time	0:00:00.015
	Elapsed Time	0:00:00.017

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pb	3	261,9067	47,56124	27,45949

One-Sample Test

	Test Value = 172					
					95% Confidence Interval of the Difference	
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Lower	Upper
Pb	3,274	2	,082	89,90667	-28,2420	208,0553

T-TEST

/TESTVAL=15.4 (valeur référence pour les végétaux terrestres des sols N
1 "Recommandations Québec pour Zn 2012)
/MISSING=ANALYSIS
/VARIABLES=Zn
/CRITERIA=CI(.95).

T-Test

Notes

	Output Created	12-févr.-2014 13:54:24
	Comments	
Input	Data	F:\SONAHCESS DOCS ORDERED DATES\memoire mehdi decembre 2013\OBJECTIF 02 impact bassin d'evaporation\DEUTCH VALUE et indice CCME\sol CONTAMINE ST05.sav
	Active Dataset	DataSet1
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	4
Missing Value Handling	Definition of Missing	User defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each analysis are based on the cases with no missing or out-of-range data for any variable in the analysis.
	Syntax	T-TEST /TESTVAL=15.4 /MISSING=ANALYSIS /VARIABLES=Zn /CRITERIA=CI(.95).
Resources	Processor Time	0:00:00.016
	Elapsed Time	0:00:00.016

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Zn	3	56,7567	9,62031	5,55429

One-Sample Test

	Test Value = 15.4					
					95% Confidence Interval of the Difference	
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Lower	Upper
Zn	7,446	2	,018	41,35667	17,4585	65,2549

T-TEST

/TESTVAL=11 (valeur référence Pb pour le peuplement avien USEPA Eco SSL for Pb 2005)

/MISSING=ANALYSIS

/VARIABLES=Pb

/CRITERIA=CI(.95).

T-Test

Notes

	Output Created	12-févr.-2014 13:59:59
	Comments	
Input	Data	F:\SONAHES DOCS ORDERED DATES\memoire mehdi decembre 2013\OBJECTIF 02 impact bassin d'evaporation\DEUTCH VALUE et indice CCME\sol CONTAMINE ST05.sav
	Active Dataset	DataSet1
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	4
Missing Value Handling	Definition of Missing	User defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each analysis are based on the cases with no missing or out-of-range data for any variable in the analysis.
	Syntax	T-TEST /TESTVAL=11 /MISSING=ANALYSIS /VARIABLES=Pb /CRITERIA=CI(.95).
Resources	Processor Time	0:00:00.016
	Elapsed Time	0:00:00.015

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pb	3	261,9067	47,56124	27,45949

One-Sample Test

	Test Value = 11					
					95% Confidence Interval of the Difference	
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Lower	Upper
Pb	9,137	2	,012	250,90667	132,7580	369,0553

T-TEST

/TESTVAL=46 (Valeur référence Zn pour le peuplement avien USEPA Eco SSL for Zn 2007)

/MISSING=ANALYSIS

/VARIABLES=Zn

/CRITERIA=CI(.95).

T-Test

Notes

	Output Created	12-févr.-2014 14:03:51
	Comments	
Input	Data	F:\SONAHCESS DOCS ORDERED DATES\memoire mehdi decembre 2013\OBJECTIF 02 impact bassin d'evaporation\DEUTCH VALUE et indice CCME\sol CONTAMINE ST05.sav
	Active Dataset	DataSet1
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	4
Missing Value Handling	Definition of Missing	User defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each analysis are based on the cases with no missing or out-of-range data for any variable in the analysis.
	Syntax	T-TEST /TESTVAL=46 /MISSING=ANALYSIS /VARIABLES=Zn /CRITERIA=CI(.95).
Resources	Processor Time	0:00:00.015
	Elapsed Time	0:00:00.017

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Zn	3	56,7567	9,62031	5,55429

One-Sample Test

	Test Value = 46					
					95% Confidence Interval of the Difference	
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Lower	Upper
Zn	1,937	2	,192	10,75667	-13,1415	34,6549

T-TEST

/TESTVAL=56 (Valeur référence Pb pour les mammifères, USEPA Eco SSL for Pb, 2005)

/MISSING=ANALYSIS

/VARIABLES=Pb

/CRITERIA=CI(.95).

T-Test

Notes

	Output Created	12-févr.-2014 14:06:04	
Input	Comments		
	Data	F:\SONAHCESS DOCS ORDERED DATES\memoire mehdi decembre 2013\OBJECTIF 02 impact bassin d'evaporation\DEUTCH VALUE et indice CCME\sol CONTAMINE ST05.sav	
	Active Dataset	DataSet1	
	Filter	<none>	
	Weight	<none>	
	Split File	<none>	
	N of Rows in Working Data File	4	
	Missing Value Handling	Definition of Missing	User defined missing values are treated as missing.
		Cases Used	Statistics for each analysis are based on the cases with no missing or out-of-range data for any variable in the analysis.
		Syntax	T-TEST /TESTVAL=56 /MISSING=ANALYSIS /VARIABLES=Pb /CRITERIA=CI(.95).
Resources	Processor Time	0:00:00.032	
	Elapsed Time	0:00:00.031	

One-Sample Statistics

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pb	3	261,9067	47,56124	27,45949

One-Sample Test

	Test Value = 56					
					95% Confidence Interval of the Difference	
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Lower	Upper
Pb	7,499	2	,017	205,90667	87,7580	324,0553

Annexe 06

```

GLM Zn Pb Cd Cu BY zone organe
  /METHOD=SSTYPE(3)
  /INTERCEPT=INCLUDE
  /POSTHOC=zone organe(SNK TUKEY BTUKEY DUNCAN SCHEFFE LSD BONFERRONI SIDA
K)
  /PRINT=DESCRIPTIVE
  /CRITERIA=ALPHA(.05)
  /DESIGN= zone organe zone*organe.

```

General Linear Model

Notes

	Output Created	06-déc.-2012 17:18:11
	Comments	
Input	Data	G:\OBJECTIF 02 impact bassin d'evaporation\VEGETATION\Végétation.sav
	Active Dataset	DataSet1
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	24
Missing Value Handling	Definition of Missing	User-defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics are based on all cases with valid data for all variables in the model.
	Syntax	GLM Zn Pb Cd Cu BY zone organe /METHOD=SSTYPE(3) /INTERCEPT=INCLUDE /POSTHOC=zone organe(SNK TUKEY BTUKEY DUNCAN SCHEFFE LSD BONFERRONI SIDA) /PRINT=DESCRIPTIVE /CRITERIA=ALPHA(.05) /DESIGN= zone organe zone*organe.
Resources	Processor Time	0:00:00.438
	Elapsed Time	0:00:00.547

[DataSet1] G:\OBJECTIF 02 impact bassin d'evaporation\VEGETATION\Végétation.sav

Warnings

Post hoc tests are not performed for zone because there are fewer than three groups.
--

Between-Subjects Factors

		N
zone	1,00	12
	2,00	12
organe	feuilles	6
	fruits	6
	racine	6
	tiges	6

Descriptive Statistics

	zone	organe	Mean	Std. Deviation	N
Zn	1,00	feuilles	2051,5033	68,13377	3
		fruits	417,7367	35,73660	3
		racine	171,6733	8,58500	3
		tiges	434,9067	48,80876	3
		Total	768,9550	781,99077	12
	2,00	feuilles	35,4367	2,68675	3
		fruits	38,0567	,99304	3
		racine	42,9167	7,43627	3
		tiges	9,2233	,40415	3
		Total	31,4083	14,08566	12
	Total	feuilles	1043,4700	1105,08697	6
		fruits	227,8967	209,18486	6
		racine	107,2950	70,88783	6
		tiges	222,0650	235,19114	6
		Total	400,1817	659,13772	24
Pb	1,00	feuilles	21,9067	1,65122	3
		fruits	20,0000	2,86000	3
		racine	25,7100	,00000	3
		tiges	21,9067	1,65122	3
		Total	22,3808	2,67768	12
	2,00	feuilles	17,1400	,00000	3
		fruits	18,0933	1,65122	3
		racine	19,0467	1,65122	3
		tiges	14,2900	,00000	3
		Total	17,1425	2,10856	12
	Total	feuilles	19,5233	2,81193	6
		fruits	19,0467	2,33518	6
		racine	22,3783	3,79613	6
		tiges	18,0983	4,30055	6
		Total	19,7617	3,56564	24
Cd	1,00	feuilles	1,7600	,10392	3
		fruits	,9700	,10392	3
		racine	,5467	,18502	3
		tiges	,8500	,20785	3
		Total	1,0317	,48669	12

Descriptive Statistics

	zone	organe	Mean	Std. Deviation	N	
Cd	2,00	feuilles	,6100	,10392	3	
		fruits	,6100	,10392	3	
		racine	,3633	,18502	3	
		tiges	,4233	,10970	3	
		Total	,5017	,16010	12	
	Total	feuilles	1,1850	,63670	6	
		fruits	,7900	,21799	6	
		racine	,4550	,19357	6	
		tiges	,6367	,27696	6	
		Total	,7667	,44590	24	
	Cu	1,00	feuilles	11,6633	,52539	3
			fruits	2,1200	,25981	3
racine			,0000	,00000	3	
tiges			,0000	,00000	3	
Total			3,4458	5,04331	12	
2,00		feuilles	3,1800	,00000	3	
		fruits	5,0000	,00000	3	
		racine	,7567	,26558	3	
		tiges	,0000	,00000	3	
		Total	2,2342	2,07360	12	
Total		feuilles	7,4217	4,65838	6	
		fruits	3,5600	1,58598	6	
		racine	,3783	,44719	6	
		tiges	,0000	,00000	6	
		Total	2,8400	3,82152	24	

Multivariate Tests^c

Effect		Value	F	Hypothesis df	Error df	Sig.
Intercept	Pillai's Trace	,997	1229,315 ^a	4,000	13,000	,000
	Wilks' Lambda	,003	1229,315 ^a	4,000	13,000	,000
	Hotelling's Trace	378,251	1229,315 ^a	4,000	13,000	,000
	Roy's Largest Root	378,251	1229,315 ^a	4,000	13,000	,000
zone	Pillai's Trace	,997	1130,039 ^a	4,000	13,000	,000
	Wilks' Lambda	,003	1130,039 ^a	4,000	13,000	,000
	Hotelling's Trace	347,704	1130,039 ^a	4,000	13,000	,000
	Roy's Largest Root	347,704	1130,039 ^a	4,000	13,000	,000
organe	Pillai's Trace	2,614	25,405	12,000	45,000	,000
	Wilks' Lambda	,000	216,359	12,000	34,686	,000
	Hotelling's Trace	470,344	457,279	12,000	35,000	,000
	Roy's Largest Root	376,832	1413,118 ^b	4,000	15,000	,000

a. Exact statistic

b. The statistic is an upper bound on F that yields a lower bound on the significance level.

c. Design: Intercept + zone + organe + zone * organe

Multivariate Tests^c

Effect		Value	F	Hypothesis df	Error df	Sig.
zone * organe	Pillai's Trace	2,103	8,790	12,000	45,000	,000
	Wilks' Lambda	,000	91,104	12,000	34,686	,000
	Hotelling's Trace	292,977	284,838	12,000	35,000	,000
	Roy's Largest Root	260,799	977,995 ^b	4,000	15,000	,000

b. The statistic is an upper bound on F that yields a lower bound on the significance level.

c. Design: Intercept + zone + organe + zone * organe

Post Hoc Tests

organe

Multiple Comparisons

Dependent Variable	(I) organe	(J) organe	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	
Zn	Tukey HSD	feuilles	fruits	815,5733	18,75164	,000
			racine	936,1750*	18,75164	,000
			tiges	821,4050*	18,75164	,000
		fruits	feuilles	-815,5733*	18,75164	,000
			racine	120,6017*	18,75164	,000
			tiges	5,8317	18,75164	,989
		racine	feuilles	-936,1750*	18,75164	,000
			fruits	-120,6017*	18,75164	,000
			tiges	-114,7700*	18,75164	,000
	tiges	feuilles	-821,4050	18,75164	,000	
		fruits	-5,8317	18,75164	,989	
		racine	114,7700*	18,75164	,000	
	Scheffe	feuilles	fruits	815,5733	18,75164	,000
			racine	936,1750*	18,75164	,000
			tiges	821,4050*	18,75164	,000
		fruits	feuilles	-815,5733*	18,75164	,000
			racine	120,6017*	18,75164	,000
			tiges	5,8317	18,75164	,992
racine		feuilles	-936,1750*	18,75164	,000	
		fruits	-120,6017*	18,75164	,000	
		tiges	-114,7700*	18,75164	,000	
tiges	feuilles	-821,4050	18,75164	,000		
	fruits	-5,8317	18,75164	,992		
	racine	114,7700*	18,75164	,000		

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = ,052.

*. The mean difference is significant at the ,05 level.

Multiple Comparisons

Dependent Variable	(I) organe	(J) organe	95% Confidence Interval		
			Lower Bound	Upper Bound	
Zn	Tukey HSD	feuilles	fruits	761,9245	869,2222
			racine	882,5262	989,8238
			tiges	767,7562	875,0538
		fruits	feuilles	-869,2222	-761,9245
			racine	66,9528	174,2505
			tiges	-47,8172	59,4805
		racine	feuilles	-989,8238	-882,5262
			fruits	-174,2505	-66,9528
			tiges	-168,4188	-61,1212
	tiges	feuilles	-875,0538	-767,7562	
		fruits	-59,4805	47,8172	
		racine	61,1212	168,4188	
	Scheffe	feuilles	fruits	757,1217	874,0250
			racine	877,7233	994,6267
			tiges	762,9533	879,8567
		fruits	feuilles	-874,0250	-757,1217
			racine	62,1500	179,0533
			tiges	-52,6200	64,2833
racine		feuilles	-994,6267	-877,7233	
		fruits	-179,0533	-62,1500	
		tiges	-173,2217	-56,3183	
tiges	feuilles	-879,8567	-762,9533		
	fruits	-64,2833	52,6200		
	racine	56,3183	173,2217		

Based on observed means.
 The error term is Mean Square(Error) = ,052.

Multiple Comparisons

Dependent Variable		(I) organe	(J) organe	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	
Zn	LSD	feuilles	fruits	815,5733 *	18,75164	,000	
			racine	936,1750 *	18,75164	,000	
			tiges	821,4050 *	18,75164	,000	
		fruits	feuilles	-815,5733 *	18,75164	,000	
			racine	120,6017 *	18,75164	,000	
			tiges	5,8317	18,75164	,760	
		racine	feuilles	-936,1750 *	18,75164	,000	
			fruits	-120,6017 *	18,75164	,000	
			tiges	-114,7700 *	18,75164	,000	
		tiges	feuilles	-821,4050	18,75164	,000	
			fruits	-5,8317 *	18,75164	,760	
			racine	114,7700 *	18,75164	,000	
		Bonferroni	feuilles	fruits	815,5733 *	18,75164	,000
				racine	936,1750 *	18,75164	,000
				tiges	821,4050 *	18,75164	,000
			fruits	feuilles	-815,5733 *	18,75164	,000
				racine	120,6017 *	18,75164	,000
				tiges	5,8317	18,75164	1,000
	racine		feuilles	-936,1750 *	18,75164	,000	
			fruits	-120,6017 *	18,75164	,000	
			tiges	-114,7700 *	18,75164	,000	
	tiges		feuilles	-821,4050	18,75164	,000	
			fruits	-5,8317 *	18,75164	1,000	
			racine	114,7700 *	18,75164	,000	
	Sidak		feuilles	fruits	815,5733 *	18,75164	,000
				racine	936,1750 *	18,75164	,000
				tiges	821,4050 *	18,75164	,000
			fruits	feuilles	-815,5733 *	18,75164	,000
				racine	120,6017 *	18,75164	,000
				tiges	5,8317	18,75164	1,000
		racine	feuilles	-936,1750 *	18,75164	,000	
			fruits	-120,6017 *	18,75164	,000	
			tiges	-114,7700 *	18,75164	,000	
		tiges	feuilles	-821,4050	18,75164	,000	
			fruits	-5,8317 *	18,75164	1,000	
			racine	114,7700 *	18,75164	,000	
Pb		Tukey HSD	feuilles	fruits	,4767 *	,89176	,949
				racine	-2,8550	,89176	,026
				tiges	1,4250	,89176	,407

Based on observed means.
The error term is Mean Square(Error) = ,052.

*. The mean difference is significant at the ,05 level.

Multiple Comparisons

Dependent Variable	(I) organe	(J) organe	95% Confidence Interval		
			Lower Bound	Upper Bound	
Zn	LSD	feuilles	fruits	775,8216	855,3250
			racine	896,4233	975,9267
			tiges	781,6533	861,1567
		fruits	feuilles	-855,3250	-775,8216
			racine	80,8500	160,3534
			tiges	-33,9200	45,5834
		racine	feuilles	-975,9267	-896,4233
			fruits	-160,3534	-80,8500
			tiges	-154,5217	-75,0183
	tiges	feuilles	-861,1567	-781,6533	
		fruits	-45,5834	33,9200	
		racine	75,0183	154,5217	
	Bonferroni	feuilles	fruits	759,1621	871,9845
			racine	879,7638	992,5862
			tiges	764,9938	877,8162
		fruits	feuilles	-871,9845	-759,1621
			racine	64,1905	177,0129
			tiges	-50,5795	62,2429
		racine	feuilles	-992,5862	-879,7638
			fruits	-177,0129	-64,1905
			tiges	-171,1812	-58,3588
	tiges	feuilles	-877,8162	-764,9938	
		fruits	-62,2429	50,5795	
		racine	58,3588	171,1812	
	Sidak	feuilles	fruits	759,3533	871,7934
			racine	879,9549	992,3951
			tiges	765,1849	877,6251
fruits		feuilles	-871,7934	-759,3533	
		racine	64,3816	176,8217	
		tiges	-50,3884	62,0517	
racine		feuilles	-992,3951	-879,9549	
		fruits	-176,8217	-64,3816	
		tiges	-170,9901	-58,5499	
tiges	feuilles	-877,6251	-765,1849		
	fruits	-62,0517	50,3884		
	racine	58,5499	170,9901		
Pb	Tukey HSD	feuilles	fruits	-2,0747	3,0280
			racine	-5,4063	-,3037
			tiges	-1,1263	3,9763

Based on observed means.
 The error term is Mean Square(Error) = ,052.

Multiple Comparisons

Dependent Variable		(I) organe	(J) organe	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.
Pb	Tukey HSD	fruits	feuilles	-,4767*	,89176	,949
			racine	-3,3317*	,89176	,009
			tiges	,9483	,89176	,716
		racine	feuilles	2,8550*	,89176	,026
			fruits	3,3317*	,89176	,009
			tiges	4,2800*	,89176	,001
		tiges	feuilles	-1,4250	,89176	,407
			fruits	-,9483	,89176	,716
			racine	-4,2800*	,89176	,001
	Scheffe	feuilles	fruits	,4767*	,89176	,962
			racine	-2,8550*	,89176	,043
			tiges	1,4250	,89176	,486
		fruits	feuilles	-,4767*	,89176	,962
			racine	-3,3317*	,89176	,016
			tiges	,9483	,89176	,771
		racine	feuilles	2,8550*	,89176	,043
			fruits	3,3317*	,89176	,016
			tiges	4,2800*	,89176	,002
	tiges	feuilles	-1,4250	,89176	,486	
		fruits	-,9483	,89176	,771	
		racine	-4,2800*	,89176	,002	
	LSD	feuilles	fruits	,4767*	,89176	,600
			racine	-2,8550*	,89176	,006
			tiges	1,4250	,89176	,130
		fruits	feuilles	-,4767*	,89176	,600
			racine	-3,3317*	,89176	,002
			tiges	,9483	,89176	,303
racine		feuilles	2,8550*	,89176	,006	
		fruits	3,3317*	,89176	,002	
		tiges	4,2800*	,89176	,000	
tiges	feuilles	-1,4250	,89176	,130		
	fruits	-,9483	,89176	,303		
	racine	-4,2800*	,89176	,000		
Bonferroni	feuilles	fruits	,4767*	,89176	1,000	
		racine	-2,8550*	,89176	,033	
		tiges	1,4250	,89176	,778	
	fruits	feuilles	-,4767*	,89176	1,000	
		racine	-3,3317*	,89176	,011	
		tiges	,9483	,89176	1,000	

Based on observed means.
The error term is Mean Square(Error) = ,052.

*. The mean difference is significant at the ,05 level.

Multiple Comparisons

Dependent Variable	(I) organe	(J) organe	95% Confidence Interval		
			Lower Bound	Upper Bound	
Pb	Tukey HSD	fruits	feuilles	-3,0280	2,0747
			racine	-5,8830	-,7803
			tiges	-1,6030	3,4997
		racine	feuilles	,3037	5,4063
			fruits	,7803	5,8830
			tiges	1,7287	6,8313
		tiges	feuilles	-3,9763	1,1263
			fruits	-3,4997	1,6030
			racine	-6,8313	-1,7287
	Scheffe	feuilles	fruits	-2,3031	3,2564
			racine	-5,6348	-,0752
			tiges	-1,3548	4,2048
		fruits	feuilles	-3,2564	2,3031
			racine	-6,1114	-,5519
			tiges	-1,8314	3,7281
		racine	feuilles	,0752	5,6348
			fruits	,5519	6,1114
			tiges	1,5002	7,0598
	tiges	feuilles	-4,2048	1,3548	
		fruits	-3,7281	1,8314	
		racine	-7,0598	-1,5002	
	LSD	feuilles	fruits	-1,4138	2,3671
			racine	-4,7455	-,9645
			tiges	-,4655	3,3155
		fruits	feuilles	-2,3671	1,4138
			racine	-5,2221	-1,4412
			tiges	-,9421	2,8388
racine		feuilles	,9645	4,7455	
		fruits	1,4412	5,2221	
		tiges	2,3895	6,1705	
tiges	feuilles	-3,3155	,4655		
	fruits	-2,8388	,9421		
	racine	-6,1705	-2,3895		
Bonferroni	feuilles	fruits	-2,2061	3,1594	
		racine	-5,5377	-,1723	
		tiges	-1,2577	4,1077	
	fruits	feuilles	-3,1594	2,2061	
		racine	-6,0144	-,6489	
		tiges	-1,7344	3,6311	

Based on observed means.
 The error term is Mean Square(Error) = ,052.

Multiple Comparisons

Dependent Variable		(I) organe	(J) organe	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	
Pb	Bonferroni	racine	feuilles	2,8550*	,89176	,033	
			fruits	3,3317*	,89176	,011	
			tiges	4,2800*	,89176	,001	
		tiges	feuilles	-1,4250	,89176	,778	
			fruits	-,9483	,89176	1,000	
			racine	-4,2800*	,89176	,001	
		Sidak	feuilles	fruits	,4767	,89176	,996
				racine	-2,8550*	,89176	,033
				tiges	1,4250	,89176	,565
	fruits		feuilles	-,4767	,89176	,996	
			racine	-3,3317*	,89176	,011	
			tiges	,9483	,89176	,886	
	racine		feuilles	2,8550*	,89176	,033	
			fruits	3,3317*	,89176	,011	
			tiges	4,2800*	,89176	,001	
	tiges	feuilles	-1,4250	,89176	,565		
		fruits	-,9483	,89176	,886		
		racine	-4,2800*	,89176	,001		
Cd	Tukey HSD	feuilles	fruits	,3950*	,08339	,001	
			racine	,7300*	,08339	,000	
			tiges	,5483*	,08339	,000	
		fruits	feuilles	-,3950*	,08339	,001	
			racine	,3350*	,08339	,005	
			tiges	,1533	,08339	,292	
		racine	feuilles	-,7300*	,08339	,000	
			fruits	-,3350*	,08339	,005	
			tiges	-,1817	,08339	,171	
		tiges	feuilles	-,5483	,08339	,000	
			fruits	-,1533	,08339	,292	
			racine	,1817	,08339	,171	
	Scheffe	feuilles	fruits	,3950*	,08339	,002	
			racine	,7300*	,08339	,000	
			tiges	,5483*	,08339	,000	
		fruits	feuilles	-,3950*	,08339	,002	
			racine	,3350*	,08339	,009	
			tiges	,1533	,08339	,368	
racine	feuilles	-,7300*	,08339	,000			
	fruits	-,3350*	,08339	,009			
	tiges	-,1817	,08339	,233			

Based on observed means.
The error term is Mean Square(Error) = ,052.

*. The mean difference is significant at the ,05 level.

Multiple Comparisons

Dependent Variable	(I) organe	(J) organe	95% Confidence Interval		
			Lower Bound	Upper Bound	
Pb	Bonferroni	racine	feuilles	,1723	5,5377
			fruits	,6489	6,0144
			tiges	1,5973	6,9627
		tiges	feuilles	-4,1077	1,2577
			fruits	-3,6311	1,7344
			racine	-6,9627	-1,5973
	Sidak	feuilles	fruits	-2,1970	3,1503
			racine	-5,5286	-,1814
			tiges	-1,2486	4,0986
		fruits	feuilles	-3,1503	2,1970
			racine	-6,0053	-,6580
			tiges	-1,7253	3,6220
		racine	feuilles	,1814	5,5286
			fruits	,6580	6,0053
			tiges	1,6064	6,9536
		tiges	feuilles	-4,0986	1,2486
			fruits	-3,6220	1,7253
			racine	-6,9536	-1,6064
Cd	Tukey HSD	feuilles	fruits	,1564	,6336
			racine	,4914	,9686
			tiges	,3097	,7869
		fruits	feuilles	-,6336	-,1564
			racine	,0964	,5736
			tiges	-,0853	,3919
		racine	feuilles	-,9686	-,4914
			fruits	-,5736	-,0964
			tiges	-,4203	,0569
		tiges	feuilles	-,7869	-,3097
			fruits	-,3919	,0853
			racine	-,0569	,4203
	Scheffe	feuilles	fruits	,1351	,6549
			racine	,4701	,9899
			tiges	,2884	,8083
		fruits	feuilles	-,6549	-,1351
			racine	,0751	,5949
			tiges	-,1066	,4133
racine	feuilles	-,9899	-,4701		
	fruits	-,5949	-,0751		
	tiges	-,4416	,0783		

Based on observed means.
 The error term is Mean Square(Error) = ,052.

Multiple Comparisons

Dependent Variable		(I) organe	(J) organe	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	
Cd	Scheffe	tiges	feuilles	-,5483	,08339	,000	
			fruits	-,1533	,08339	,368	
			racine	,1817	,08339	,233	
	LSD	feuilles	fruits	,3950*	,08339	,000	
			racine	,7300*	,08339	,000	
			tiges	,5483*	,08339	,000	
		fruits	feuilles	-,3950*	,08339	,000	
			racine	,3350*	,08339	,001	
			tiges	,1533	,08339	,085	
		racine	feuilles	-,7300*	,08339	,000	
			fruits	-,3350*	,08339	,001	
			tiges	-,1817	,08339	,045	
		tiges	feuilles	-,5483	,08339	,000	
			fruits	-,1533	,08339	,085	
			racine	,1817*	,08339	,045	
		Bonferroni	feuilles	fruits	,3950*	,08339	,001
				racine	,7300*	,08339	,000
				tiges	,5483*	,08339	,000
	fruits		feuilles	-,3950*	,08339	,001	
			racine	,3350*	,08339	,006	
			tiges	,1533	,08339	,508	
	racine		feuilles	-,7300*	,08339	,000	
			fruits	-,3350*	,08339	,006	
			tiges	-,1817	,08339	,268	
	tiges		feuilles	-,5483	,08339	,000	
			fruits	-,1533	,08339	,508	
			racine	,1817	,08339	,268	
	Sidak		feuilles	fruits	,3950*	,08339	,001
				racine	,7300*	,08339	,000
				tiges	,5483*	,08339	,000
fruits		feuilles	-,3950*	,08339	,001		
		racine	,3350	,08339	,006		
		tiges	,1533	,08339	,412		
racine		feuilles	-,7300*	,08339	,000		
		fruits	-,3350*	,08339	,006		
		tiges	-,1817	,08339	,240		
tiges		feuilles	-,5483	,08339	,000		
		fruits	-,1533	,08339	,412		
		racine	,1817	,08339	,240		

Based on observed means.
The error term is Mean Square(Error) = ,052.

*. The mean difference is significant at the ,05 level.

Multiple Comparisons

Dependent Variable		(I) organe	(J) organe	95% Confidence Interval	
				Lower Bound	Upper Bound
Cd	Scheffe	tiges	feuilles	-,8083	-,2884
			fruits	-,4133	,1066
			racine	-,0783	,4416
	LSD	feuilles	fruits	,2182	,5718
			racine	,5532	,9068
			tiges	,3716	,7251
		fruits	feuilles	-,5718	-,2182
			racine	,1582	,5118
			tiges	-,0234	,3301
		racine	feuilles	-,9068	-,5532
			fruits	-,5118	-,1582
			tiges	-,3584	-,0049
		tiges	feuilles	-,7251	-,3716
			fruits	-,3301	,0234
			racine	,0049	,3584
	Bonferroni	feuilles	fruits	,1441	,6459
			racine	,4791	,9809
			tiges	,2975	,7992
		fruits	feuilles	-,6459	-,1441
			racine	,0841	,5859
			tiges	-,0975	,4042
		racine	feuilles	-,9809	-,4791
			fruits	-,5859	-,0841
			tiges	-,4325	,0692
		tiges	feuilles	-,7992	-,2975
			fruits	-,4042	,0975
			racine	-,0692	,4325
	Sidak	feuilles	fruits	,1450	,6450
			racine	,4800	,9800
			tiges	,2983	,7984
fruits		feuilles	-,6450	-,1450	
		racine	,0850	,5850	
		tiges	-,0967	,4034	
racine		feuilles	-,9800	-,4800	
		fruits	-,5850	-,0850	
		tiges	-,4317	,0684	
tiges		feuilles	-,7984	-,2983	
		fruits	-,4034	,0967	
		racine	-,0684	,4317	

Based on observed means.
 The error term is Mean Square(Error) = ,052.

Multiple Comparisons

Dependent Variable		(I) organe	(J) organe	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.
Cu	Tukey HSD	feuilles	fruits	3,8617 [*]	,13135	,000
			racine	7,0433 [*]	,13135	,000
			tiges	7,4217 [*]	,13135	,000
		fruits	feuilles	-3,8617 [*]	,13135	,000
			racine	3,1817 [*]	,13135	,000
			tiges	3,5600 [*]	,13135	,000
		racine	feuilles	-7,0433 [*]	,13135	,000
			fruits	-3,1817 [*]	,13135	,000
			tiges	,3783 [*]	,13135	,048
		tiges	feuilles	-7,4217 [*]	,13135	,000
			fruits	-3,5600 [*]	,13135	,000
			racine	-,3783 [*]	,13135	,048
	Scheffe	feuilles	fruits	3,8617 [*]	,13135	,000
			racine	7,0433 [*]	,13135	,000
			tiges	7,4217 [*]	,13135	,000
		fruits	feuilles	-3,8617 [*]	,13135	,000
			racine	3,1817 [*]	,13135	,000
			tiges	3,5600 [*]	,13135	,000
		racine	feuilles	-7,0433 [*]	,13135	,000
			fruits	-3,1817 [*]	,13135	,000
			tiges	,3783 [*]	,13135	,076
		tiges	feuilles	-7,4217 [*]	,13135	,000
			fruits	-3,5600 [*]	,13135	,000
			racine	-,3783 [*]	,13135	,076
	LSD	feuilles	fruits	3,8617 [*]	,13135	,000
			racine	7,0433 [*]	,13135	,000
			tiges	7,4217 [*]	,13135	,000
		fruits	feuilles	-3,8617 [*]	,13135	,000
			racine	3,1817 [*]	,13135	,000
			tiges	3,5600 [*]	,13135	,000
		racine	feuilles	-7,0433 [*]	,13135	,000
			fruits	-3,1817 [*]	,13135	,000
			tiges	,3783 [*]	,13135	,011
		tiges	feuilles	-7,4217 [*]	,13135	,000
			fruits	-3,5600 [*]	,13135	,000
			racine	-,3783 [*]	,13135	,011
Bonferroni	feuilles	fruits	3,8617 [*]	,13135	,000	
		racine	7,0433 [*]	,13135	,000	
		tiges	7,4217 [*]	,13135	,000	

Based on observed means.
The error term is Mean Square(Error) = ,052.

*. The mean difference is significant at the ,05 level.

Multiple Comparisons

Dependent Variable		(I) organe	(J) organe	95% Confidence Interval	
				Lower Bound	Upper Bound
Cu	Tukey HSD	feuilles	fruits	3,4859	4,2375
			racine	6,6675	7,4191
			tiges	7,0459	7,7975
		fruits	feuilles	-4,2375	-3,4859
			racine	2,8059	3,5575
			tiges	3,1842	3,9358
		racine	feuilles	-7,4191	-6,6675
			fruits	-3,5575	-2,8059
			tiges	,0025	,7541
		tiges	feuilles	-7,7975	-7,0459
			fruits	-3,9358	-3,1842
			racine	-,7541	-,0025
	Scheffe	feuilles	fruits	3,4522	4,2711
			racine	6,6339	7,4528
			tiges	7,0122	7,8311
		fruits	feuilles	-4,2711	-3,4522
			racine	2,7722	3,5911
			tiges	3,1506	3,9694
		racine	feuilles	-7,4528	-6,6339
			fruits	-3,5911	-2,7722
			tiges	-,0311	,7878
		tiges	feuilles	-7,8311	-7,0122
			fruits	-3,9694	-3,1506
			racine	-,7878	,0311
	LSD	feuilles	fruits	3,5832	4,1401
			racine	6,7649	7,3218
			tiges	7,1432	7,7001
		fruits	feuilles	-4,1401	-3,5832
			racine	2,9032	3,4601
			tiges	3,2816	3,8384
		racine	feuilles	-7,3218	-6,7649
			fruits	-3,4601	-2,9032
			tiges	,0999	,6568
		tiges	feuilles	-7,7001	-7,1432
			fruits	-3,8384	-3,2816
			racine	-,6568	-,0999
Bonferroni	feuilles	fruits	3,4665	4,2568	
		racine	6,6482	7,4385	
		tiges	7,0265	7,8168	

Based on observed means.
 The error term is Mean Square(Error) = ,052.

Multiple Comparisons

Dependent Variable		(I) organe	(J) organe	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.
Cu	Bonferroni	fruits	feuilles	-3,8617*	,13135	,000
			racine	3,1817*	,13135	,000
			tiges	3,5600*	,13135	,000
		racine	feuilles	-7,0433*	,13135	,000
			fruits	-3,1817*	,13135	,000
			tiges	,3783	,13135	,065
		tiges	feuilles	-7,4217*	,13135	,000
			fruits	-3,5600*	,13135	,000
			racine	-,3783	,13135	,065
	Sidak	feuilles	fruits	3,8617*	,13135	,000
			racine	7,0433*	,13135	,000
			tiges	7,4217*	,13135	,000
		fruits	feuilles	-3,8617*	,13135	,000
			racine	3,1817*	,13135	,000
			tiges	3,5600*	,13135	,000
racine		feuilles	-7,0433*	,13135	,000	
		fruits	-3,1817*	,13135	,000	
		tiges	,3783	,13135	,064	
tiges	feuilles	-7,4217*	,13135	,000		
	fruits	-3,5600*	,13135	,000		
	racine	-,3783	,13135	,064		

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = ,052.

*. The mean difference is significant at the ,05 level.

Multiple Comparisons

Dependent Variable	(I) organe	(J) organe	95% Confidence Interval		
			Lower Bound	Upper Bound	
Cu	Bonferroni	fruits	feuilles	-4,2568	-3,4665
			racine	2,7865	3,5768
			tiges	3,1649	3,9551
		racine	feuilles	-7,4385	-6,6482
			fruits	-3,5768	-2,7865
			tiges	-,0168	,7735
		tiges	feuilles	-7,8168	-7,0265
			fruits	-3,9551	-3,1649
			racine	-,7735	,0168
	Sidak	feuilles	fruits	3,4679	4,2555
			racine	6,6495	7,4371
			tiges	7,0279	7,8155
		fruits	feuilles	-4,2555	-3,4679
			racine	2,7879	3,5755
			tiges	3,1662	3,9538
racine		feuilles	-7,4371	-6,6495	
		fruits	-3,5755	-2,7879	
		tiges	-,0155	,7721	
tiges	feuilles	-7,8155	-7,0279		
	fruits	-3,9538	-3,1662		
	racine	-,7721	,0155		

Based on observed means.
The error term is Mean Square(Error) = ,052.

Homogeneous Subsets

Zn

	organe	N	Subset	
			1	2
Student-Newman-Keuls _{a,,b,,c}	racine	6	107,2950	
	tiges	6		222,0650
	fruits	6		227,8967

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.
Based on observed means.
The error term is Mean Square(Error) = 1054,872.

- a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 6,000.
- b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.
- c. Alpha = ,05.

Zn

	organe	N	Subset		
			1	2	3
Student-Newman-Keuls ^{a,,b,,c}	feuilles	6			1043,4700
	Sig.		1,000	,760	1,000
Tukey HSD ^{a,,b,,c}	racine	6	107,2950		
	tiges	6		222,0650	
	fruits	6		227,8967	
	feuilles	6			1043,4700
	Sig.		1,000	,989	1,000
Tukey B ^{a,,b,,c}	racine	6	107,2950		
	tiges	6		222,0650	
	fruits	6		227,8967	
	feuilles	6			1043,4700
Duncan ^{a,,b,,c}	racine	6	107,2950		
	tiges	6		222,0650	
	fruits	6		227,8967	
	feuilles	6			1043,4700
	Sig.		1,000	,760	1,000
Scheffe ^{a,,b,,c}	racine	6	107,2950		
	tiges	6		222,0650	
	fruits	6		227,8967	
	feuilles	6			1043,4700
	Sig.		1,000	,992	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.
 Based on observed means.
 The error term is Mean Square(Error) = 1054,872.

- a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 6,000.
- b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.
- c. Alpha = ,05.

Pb

	organe	N	Subset	
			1	2
Student-Newman-Keuls ^{a,,b,,c}	tiges	6	18,0983	
	fruits	6	19,0467	
	feuilles	6	19,5233	
	racine	6		22,3783
	Sig.		,275	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.
 Based on observed means.
 The error term is Mean Square(Error) = 2,386.

- a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 6,000.
- b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.
- c. Alpha = ,05.

Pb

	organe	N	Subset	
			1	2
Tukey HSD ^{a,,b,c}	tiges	6	18,0983	
	fruits	6	19,0467	
	feuilles	6	19,5233	
	racine	6		22,3783
	Sig.		,407	1,000
Tukey B ^{a,,b,,c}	tiges	6	18,0983	
	fruits	6	19,0467	
	feuilles	6	19,5233	
	racine	6		22,3783
Duncan ^{a,,b,,c}	tiges	6	18,0983	
	fruits	6	19,0467	
	feuilles	6	19,5233	
	racine	6		22,3783
	Sig.		,149	1,000
Scheffe ^{a,,b,,c}	tiges	6	18,0983	
	fruits	6	19,0467	
	feuilles	6	19,5233	
	racine	6		22,3783
	Sig.		,486	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 2,386.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 6,000.

b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

c. Alpha = ,05.

Cd

	organe	N	Subset		
			1	2	3
Student-Newman-Keuls ^{a,,b,,c}	racine	6	,4550		
	tiges	6		,6367	
	fruits	6		,7900	
	feuilles	6			1,1850
	Sig.		1,000	,085	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = ,021.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 6,000.

b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

c. Alpha = ,05.

Cd

	organe	N	Subset		
			1	2	3
Tukey HSD ^{a,,b,c}	racine	6	,4550		
	tiges	6	,6367	,6367	
	fruits	6		,7900	
	feuilles	6			1,1850
	Sig.		,171	,292	1,000
Tukey B ^{a,,b,,c}	racine	6	,4550		
	tiges	6	,6367	,6367	
	fruits	6		,7900	
	feuilles	6			1,1850
	Sig.				
Duncan ^{a,,b,,c}	racine	6	,4550		
	tiges	6		,6367	
	fruits	6		,7900	
	feuilles	6			1,1850
	Sig.		1,000	,085	1,000
Scheffe ^{a,,b,,c}	racine	6	,4550		
	tiges	6	,6367	,6367	
	fruits	6		,7900	
	feuilles	6			1,1850
	Sig.		,233	,368	1,000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = ,021.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 6,000.

b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

c. Alpha = ,05.

Cu

	organe	N	Subset		
			1	2	3
Student-Newman-Keuls ^{a,,b,,c}	tiges	6	,0000		
	racine	6		,3783	
	fruits	6			3,5600

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = ,052.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 6,000.

b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

c. Alpha = ,05.

Cu

	organe	N	Subset			
			1	2	3	4
Student-Newman-Keuls ^{a,,b,,c}	feuilles	6				7,4217
	Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000
Tukey HSD ^{a,,b,,c}	tiges	6	,0000			
	racine	6		,3783		
	fruits	6			3,5600	
	feuilles	6				7,4217
	Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000
Tukey B ^{a,,b,,c}	tiges	6	,0000			
	racine	6		,3783		
	fruits	6			3,5600	
	feuilles	6				7,4217
Duncan ^{a,,b,,c}	tiges	6	,0000			
	racine	6		,3783		
	fruits	6			3,5600	
	feuilles	6				7,4217
	Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000
Scheffe ^{a,,b,,c}	tiges	6	,0000			
	racine	6	,3783			
	fruits	6		3,5600		
	feuilles	6			7,4217	
	Sig.		,076	1,000	1,000	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.
 Based on observed means.
 The error term is Mean Square(Error) = ,052.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 6,000.

b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

c. Alpha = ,05.

Abstract:

The actual work aims to provide management team with decision making tools in order to implement continual improvement of the Environmental Management Plan compounds.

Development of those tools was carried out by environmental risks analysis related to Trace Metals (Cd, Pb, Cu and Zn) within the actual produced water management practices in GEA at Hassi Messaoud.

Trace metals concentrations measured in produced water and related sediments has confirmed the hazard assumed at the beginning. Risk analysis was carried by “Bow Tie” methodology and was performed on the identified Top Event.

Risk rating was carried, using the company Qualitative Risk Matrix, and has classified the top event as High risk, which means that implementing proactive barriers becomes mandatory.

Short and medium term actions were proposed and further risk analysis was recommended for other events related to the hazard “Trace metals in produced water effluent”

Key words:

Produced water, Trace metals, risk analysis, BowTie.

المخلص :

يهدف هذا العمل إلى توفير دعم اتخاذ القرارات لفريق الإدارة بهدف التحسين المستمر لبعض عناصر خطة الإدارة البيئية. وقد تم تطوير هذه الأدوات من خلال تحليل المخاطر البيئية المرتبطة بالمعادن (الكاديوم Cd ، الرصاص Pb ، النحاس Cu والزنك Zn) في اطار الإدارة الحالية للمياه المنتجة مع البترول في مجمع GEA حاسي مسعود.

أكدت نسب تركيز المعادن المدروسة في المياه المنتجة مع البترول و الرواسب ثبوت وجود الخطورة المفترضة مسبقاً. وقد تم تحليل المخاطر من خلال طريقة " القوس المتعادل " ، وركزت على الحدث المتوقع.

وقد تم تقييم المخاطر على أساس مصفوفة المخاطر النوعية المعمول بها في المؤسسة و صنفت حالة الحدث المتوقع في منطقة عالية المخاطر ، مما يستوجب إدخال وتفعيل حواجز استباقية.

وقد تم اقتراح إجراءات على المدى القصير والمتوسط كما طرحت آفاق للمزيد من التحليل للأحداث المرتبطة مع الخطر " العناصر المعدنية في المياه المنتجة مع البترول "

كلمات البحث :

المياه المنتجة مع البترول- العناصر المعدنية- تحليل المخاطر- القوس المتعادل

<p>Nom : KECHEBAR</p> <p>Prénoms : Mohamed Mehdi</p>	<p>Date de soutenance :</p>																
<p>Titre :</p> <p>Niveaux de contamination par les éléments traces métalliques (Cd, Pb, Cu et Zn) de l'eau de production et des sédiments des champs pétroliers du complexe G.E.A –Hassi Messaoud.</p>																	
<p>Résumé :</p> <p>Le présent travail a pour objectif la fourniture d'outils d'aide à la décision pour l'équipe de gestion dans le but de l'amélioration continue des éléments constitutifs du plan de gestion environnementale. L'élaboration de ces outils s'est faite par l'analyse des risques environnementaux associés aux éléments traces métalliques (Cd, Pb, Cu et Zn) dans le contexte actuel de gestion de l'eau de production au niveau du complexe GEA à Hassi Messaoud.</p> <p>Les concentrations en éléments traces métalliques mesurées dans l'eau de production et les sédiments a confirmé le critère de dangerosité supposé au préalable. L'analyse des risques s'est faite par la méthode « Nœud Papillon » et a porté sur un évènement redouté. La cotation des risques s'est faite sur la base de la matrice qualitative du risque en vigueur dans l'établissement et a permis de classé l'évènement redouté dans la zone à risque élevé, imposant de ce fait l'introduction de barrières proactives.</p> <p>Des actions à court et moyen terme ont été préconisées et des perspectives d'analyses complémentaires d'évènements associés au danger « Eléments traces métalliques dans l'effluent eau de production » sont recommandées.</p>																	
<p>Mots clés :</p> <p>Eau de production, éléments traces métalliques, analyse des risques, Nœud papillon</p>																	
<p>Laboratoire : Laboratoire de Biologie et Environnement</p>																	
<p>Jury :</p> <table data-bbox="193 1753 1385 1951"> <tr> <td>Présidente:</td> <td>Mme MECHAKRA Aicha</td> <td>Prof.</td> <td>Université Constantine 1</td> </tr> <tr> <td>Rapporteur:</td> <td>Mme AFRI-MEHENNAOUI F. Zohra</td> <td>M.C.</td> <td>Université Constantine 1</td> </tr> <tr> <td>Examineurs:</td> <td>Mme RACHED Oualida</td> <td>Prof.</td> <td>Université Constantine 1</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Mr SAHEB Menaouar</td> <td>M.C.</td> <td>Université d'Oum El Bouaghi</td> </tr> </table>		Présidente:	Mme MECHAKRA Aicha	Prof.	Université Constantine 1	Rapporteur:	Mme AFRI-MEHENNAOUI F. Zohra	M.C.	Université Constantine 1	Examineurs:	Mme RACHED Oualida	Prof.	Université Constantine 1		Mr SAHEB Menaouar	M.C.	Université d'Oum El Bouaghi
Présidente:	Mme MECHAKRA Aicha	Prof.	Université Constantine 1														
Rapporteur:	Mme AFRI-MEHENNAOUI F. Zohra	M.C.	Université Constantine 1														
Examineurs:	Mme RACHED Oualida	Prof.	Université Constantine 1														
	Mr SAHEB Menaouar	M.C.	Université d'Oum El Bouaghi														