

## Evaluation des risques opérationnels liés à l'utilisation de la méthode électrocinétique pour la décontamination des sols pollués par un mélange d'explosifs

Mus. Chohra<sup>1,2</sup>, Med. Chohra<sup>3</sup>, A. Mezhouda<sup>4</sup>, A. Zeghdaoui<sup>5</sup>, D. Akretche\*<sup>6</sup>

<sup>1,5</sup> Ecole Normale Supérieure Bachir El Ibrahimi, Kouba, Algérie

<sup>2</sup> S/D de la Police Scientifique et Technique/DPJ/DGSN, Chateaufort, Alger, Algérie

<sup>3,4</sup>LIMGE, Ecole Nationale Supérieure de Management, Koléa, Algérie

<sup>6</sup>LHCIM, Faculty of Chemistry, USTHB, Bab Ezzouar, Alger, Algérie

\*Corresponding author: dakretche@yahoo.fr; Tel.: +213 23828539; Fax:+213 23828529

### ARTICLE INFO

#### Article History :

Received : 11/08/2019

Accepted: : 31/01/2020

#### Key Words:

Risk evaluation;  
Polluted soil  
decontaminatio,;  
Contaminated soil treatment;  
Electrokinetic remediation  
method.

#### Mots clés :

Évaluation des risques;  
Décontamination des sols  
pollués;  
Traitement des sols  
contaminés;  
Méthode électrocinétique.

### ABSTRACT/RESUME

**Abstract:** The present study aims at exploring the operational risks affecting the process of depollution of a contaminated soil by a mix of explosives contaminants using the Electrokinetic remediation method.

Based on a hybrid research approach combining experimental and qualitative methods, the study tried to develop an approach to identifying, analyzing and evaluating the operational risks that may affect the remediation process. After the experimental phase, where a sample of 50 kg of contaminated soil by a mix of TNT, Tetryl and RDX substances taken from a military firing range has been decontaminated, a panel of experts and specialists has been interviewed about related risks. The interviews allowed identifying and evaluating different risks considered as critical for the four phases and 19 missions executed during the experimental phase.

Accordingly, the study confirmed that the advantages and the effectiveness of the Electrokinetic remediation method depend on the preventives measures that should be taken upstream to the process of decontamination in order to reduce operational inherent risks of the method.

Although the proposed approach of risks evaluation could be generalized and applied to other decontamination methods, the proper implementing factors of each method causing different operational risks should be considered.

**Résumé:** La présente étude traite la question des risques opérationnels potentiels du traitement des sols contaminés par un mélange d'explosifs en utilisant la méthode électrocinétique.

L'étude a tenté de développer une démarche d'identification, d'analyse et d'évaluation des risques opérationnels pouvant affecter l'opération de décontamination en se basant sur une méthodologie de recherche hybride combinant les approches expérimentale et qualitative. Après une phase expérimentale traitant un échantillon de 50 kg des sols pollués par un mélange d'explosifs composé de TNT, de Tetryl et du RDX, pris d'un champ de tir et d'essais d'explosifs militaire. Un panel d'experts et de spécialistes de décontamination des sols a été interviewé, ce qui a permis d'identifier et d'évaluer les

---

*risques jugés critiques aux quatre phases et 19 missions du processus de décontamination identifiés durant la phase expérimentale.*

*L'étude a permis de confirmer que les avantages de la méthode électrocinétique et son efficacité dans la décontamination des sols sont conditionnés par les mesures préventives à prendre en amont pour atténuer les risques opérationnels inhérents à la méthode.*

*La démarche d'évaluation des risques opérationnels proposée par cette étude peut être généralisée et appliquée à l'ensemble des méthodes de traitement des sols contaminés, tout en prenant en compte la nature des facteurs engendrant les risques au cours de l'utilisation de chaque méthode.*

---

## I. Introduction

Les contaminants CBRNE (Chimique, Biologiques, Radiologiques Nucléaire et Explosifs) présents dans les sols et les eaux sont des résidus des matériaux utilisés principalement par les forces militaires et les pouvoirs sécuritaires lors des guerres ou des interventions sécuritaires ou voir même lors des essais expérimentaux.

En raison de techniques de manipulation et d'éliminations inappropriées, ces substances et leurs dérivés deviennent des sources de pollution de l'environnement à des niveaux menaçant la santé humaine, le bétail, la faune et les écosystèmes [1]. Cette pollution s'ajoute à celle causée par les polluants organiques générés suite à l'expansion des activités urbaines, humaines, agricoles et industrielles [2].

Parmi les polluants qui contaminent couramment l'eau, le sol, les plantes et l'air on trouve les composés explosifs. Ces composés pénètrent l'environnement au cours de leur production (lagunes d'eaux usées, par exemple), de leur stockage temporaire ou final (brûlages), ou de leur utilisation (munitions dispersées ou non explosées), ce qui entraîne directement la contamination des eaux souterraines, des eaux de surface, marines et terrestres.

Une fois introduits dans l'environnement, les processus biotiques et abiotiques influencent le devenir de ces composés explosifs [3-4]

Sachant que, les explosifs et les matières énergétiques modernes sont des composés organiques contenant de l'azote, susceptibles de s'auto-oxyder en petites molécules gazeuses ( $N_2$ ,  $H_2O$  et  $CO_2$ ). Les principaux constituants sont des composés organiques nitroaromatiques et nitramines et des métaux lourds[1]. Les explosifs sont classés comme primaires ou secondaires en fonction de leur sensibilité d'initiation. Les explosifs primaires sont très susceptibles d'être initiés et sont souvent utilisés pour enflammer des explosifs secondaires, tels que TNT (2,4,6 trinitrotoluène), RDX (1,3,5-trinitroperhydro-1,3,5-triazine), HMX (1,3,5,7-tétranitro-1,3,5,7-

tétrazocane) et TETRYLE (N-méthyl-N-2,4,6-tétranitro-aniline)[5].

Au cours des dernières années, les préoccupations croissantes suscitées par les menaces pesant sur l'environnement et sur la santé posées par les produits chimiques synthétiques ont conduit à des études sur la toxicologie des explosifs, qui ont mis en évidence les effets toxiques et mutagènes des explosifs militaires courants et de leurs produits de transformation [6]. Ces préoccupations ont accéléré le développement des méthodes de dépollution des sols contaminés par des composés explosifs comme la méthode électrocinétique.

Certes, l'utilisation de la méthode électrocinétique de traitement des sols contaminés offre plusieurs avantages et assure un certain degré d'efficacité, néanmoins la mise en application de cette méthode s'accompagne de plusieurs risques opérationnels inhérents en relation avec la procédure de la méthode, la prise d'échantillon, les tests, l'interprétation des résultats etc.

En effet, l'utilisation de cette méthode ainsi que les technologies associées de traitement des sols nécessite une prise en charge appropriée de ces risques en faisant appel à des études de faisabilité, des évaluations financières et techniques du traitement adopté dès la phase du diagnostic.

A cet effet, la présente étude tente de proposer aux experts chimistes et biologistes une démarche pour mieux évaluer les risques opérationnels qui peuvent affecter le processus de traitement des sols contaminés. Les risques visés dans le cadre de cette étude sont les risques opérationnels qui découlent de l'incertitude des facteurs de l'environnement internes et externes impactant l'utilisation de la méthode électrocinétique pour décontaminer des sols pollués par un mélange d'explosifs composé de TNT, de Tetryl et du RDX.

## II. Materials and methods

L'étude des risques liés à la méthode électrocinétique de décontamination des sols passe par deux phases. Une première phase expérimentale porte sur la mise en application de la méthode

électrocinétique elle-même et une deuxième phase, inspirée des sciences de gestion qui porte sur l'évaluation des risques opérationnels susceptibles d'influencer les résultats de la décontamination.

## II.1. La phase expérimentale:

Durant cette phase, les chercheurs ont expérimenté la méthode électrocinétique pour décontaminer un échantillon de 50 kg des sols pollués pris du champ de tir et d'essais d'explosifs militaires d'Ain Oussera situé dans la Wilaya de Djelfa en Algérie.

### II.1.1. Présentation de la méthode :

Le traitement électrocinétique, dénommé souvent électroremédiation est un procédé développé au cours de ces dernières années. Il semble être une méthode prometteuse pour la décontamination des sols et des sédiments. Depuis la fin des années 1980 et au long des années 1990, plusieurs études en laboratoire, à l'échelle pilote et expérimentales sur terrain ont été effectuées à l'aide de cette méthode [7-10].

Le principe de base de l'électroremédiation est de permettre le déplacement des espèces chimiques variées dans les sols /boues sous l'action d'un champ électrique entre deux ou plusieurs électrodes (Figure 1). L'application du courant génère plusieurs phénomènes: électroosmose, électromigration, électrophorèse [11]. Ceci conduit aux transports des contaminants vers l'électrode de charge opposée, d'où leur récupération. Généralement, pour que la migration soit bénéfique, les contaminants doivent être sous leurs formes solubles, et s'ils ne le sont pas, ils devront être désorbés, dissous, ou solubilisés dans le fluide interstitiel [11-12];

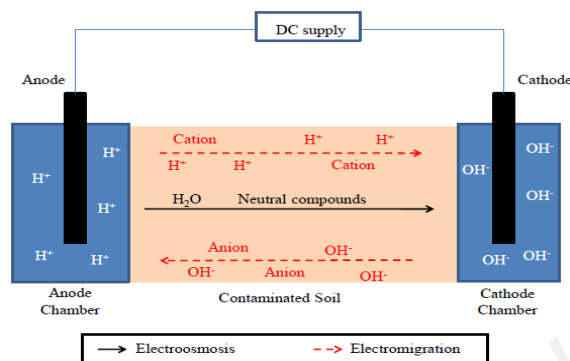
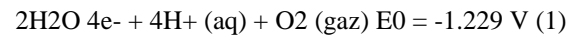


Figure 1. Principe de fonctionnement de l'électrocinétique. Adaptée de [13]

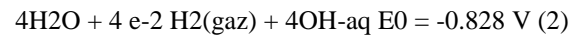
La réaction principale dans un système électrocinétique est la décomposition de l'eau qui aura lieu au niveau des électrodes. L'électrolyse de l'eau génère de l'oxygène et des protons issus de l'oxydation à l'anode tandis que du gaz hydrogène

et ions hydroxydes (OH<sup>-</sup>) sont produits par la réduction à la cathode, tel que le montrent les équations 1 et 2 [11, 13].

À l'anode (Oxydation) :



À la cathode (Réduction):



Principalement, la solution acide est produite à l'anode et la solution alcaline est produite à la cathode, ainsi le pH à la cathode augmente en même temps qu'il décroît à l'anode. La migration des ions H<sup>+</sup> du compartiment anodique et celle des OH<sup>-</sup> du compartiment cathodique à travers le sol, conduit à un changement dynamique sur le pH du sol. La mobilité des ions H<sup>+</sup> est approximativement deux fois plus grande que celle des ions OH<sup>-</sup> [11, 14-17]

Ainsi, le sol est divisé en deux zones: une zone de pH élevé située près de la cathode, et une zone de pH très bas située du côté anodique.

La valeur du pH du sol dépendra principalement du transport des ions H<sup>+</sup> et OH<sup>-</sup>, ainsi que des propriétés géochimiques du sol [11, 13].

L'effet de ces réactions d'électrolyse est important sur le traitement électrocinétique, vu qu'elles influencent l'adsorption/désorption des contaminants, les réactions de dissolution/précipitation, la spéciation chimique et la dégradation des contaminants.

### II.1.2. Processus de dépollution en fonction du lieu de traitement

Les techniques de dépollution peuvent être classées en fonction du lieu de traitement. Pour cette raison on distingue quatre (04) types de traitements à savoir [Feng et al. 2007]:

- *Traitements hors site (ex situ)*: ils supposent l'excavation/extraction du milieu pollué (déchets, terre, eau) et son évacuation vers un centre de traitement adapté (incinérateur, centre d'enfouissement technique, etc.).
- *Traitements sur site (on site)*: ils consistent à excaver les terres ou les eaux polluées et à les traiter sur le site même.
- *Traitements in situ (sur place)*: ils correspondent à un traitement sans excavation: le sol et les eaux souterraines sont laissés en place. Il s'agit alors soit d'extraire le polluant seul, soit de le dégrader ou de le fixer dans le sol.
- *Confinement*: Il permet de laisser les terres à dépolluer sur le site en empêchant la propagation des polluants grâce à une barrière étanche.

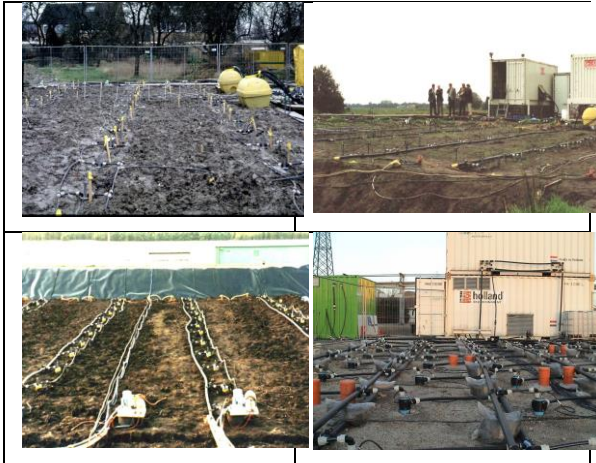


Figure 2. Méthodes de traitement in situ (sur place) [18].

### II.1.3. Avantages et limites de la technologie électrocinétique

Les avantages de la technologie électrocinétique sont principalement discutés en termes d'opérations et d'efficacité. Par exemple, les avantages communs rapportés par différents auteurs sont les suivants [19]:

- la simplicité: facile à utiliser et requiert un équipement simple ;
- la sûreté: il y a une exposition minimale au personnel de fonctionnement et à l'environnement ;
- économique: peu de demande énergétique.
- flexible: elle peut être employée in situ ou ex situ : système de remédiation, comme système de livraison, comme système de rétention, ou comme combinaison de ces systèmes ;
- applicable pour une vaste gamme de milieux: elle peut être employée pour des sols, des boues, des dépôts, et/ou des eaux souterraines
- applicable pour une variété de contaminants: elle peut être employée pour des métaux, composés organiques volatils ou semi-volatils, et/ou des radionucléides.

Bien que prometteuse, la méthode électrocinétique présente aussi quelques limites à savoir:

- la teneur en eau dans le sol doit être suffisante pour assurer le transport des polluants ;
- difficultés liées au changement d'échelle ;
- difficulté de généraliser les conditions de traitement à tous les sols.
- études à grande échelle peu nombreuses ;
- apparition de phénomènes non contrôlés ; et
- fortes élévations de température (effet Joule) [19].

### II.2. La phase d'évaluation des risques opérationnels:

Une fois la phase expérimentale de l'étude est achevée et dans le but de bien cerner, comprendre et expliquer les risques de la méthode électrocinétique objet de l'étude, nous avons eu

recours à une approche méthodologique qualitative basée sur la combinaison des diverses techniques de recueil et d'analyse de données qualitatives [20].

Selon Giordano[21], il ne s'agit pas de rechercher des régularités statistiques (entre individus substituables, mais de rechercher les significations, de comprendre les processus, dans des situations uniques et/ou fortement contextualisées.

#### II.2.1. Techniques de collecte de données

Nous avons utilisé trois (03) techniques de collecte de données à savoir:

- *L'entretien* avec des experts, analystes et conseillers dans le domaine afin d'acquérir des informations pertinentes aux risques de l'application de la méthode électrocinétique.
- *Le focus group* pour avoir des avis concertés et collectifs sur les risques étudiés.
- *Le Brainstorming* avec les collaborateurs afin qu'ils produisent collectivement un maximum d'idées nouvelles sur un risque donné.

#### • Population de l'étude :

Nous avons effectué 07 entretiens avec des spécialistes en la matière à savoir:

- un (01) conseiller,
- un (01) analyste,
- deux (02) ingénieurs chimistes et
- trois (03) techniciens des laboratoires du département instrumentation et du département de la balistique à la Sous-Direction de la Police Scientifique et Technique de Châteaufort.

Les entretiens ont eu lieu entre novembre 2018 et février 2019, en moyenne d'un entretien par semaine.

Nous avons opté pour l'entretien semi directif qui est un bon compromis entre l'entretien directif et le non directif. Il permet d'orienter la personne sur des thèmes précis tout en ayant une possibilité d'adaptation, à la situation dans la mesure où nous avons besoin de réponses construites à des questions précises.

#### • Les axes des entretiens :

- Quelles sont les forces et les faiblesses internes ainsi que les opportunités et les menaces provenant de l'environnement externe et qui peuvent menacer l'atteinte des objectifs de l'étude ?
- Quelles sont les parties prenantes clés, leurs intérêts, leurs positions et leurs impact sur le déroulement de l'étude ?
- Quelles sont les sources de danger et les principaux événements susceptibles de provoquer, d'empêcher ou de gêner l'atteinte des objectifs ?
- Quelles sont les causes et les scénarios possibles des risques identifiés ?

- Quel est l'impact (gravité) des risques identifiés sur les résultats attendus?
- Quelle est la probabilité d'apparition des risques identifiés sur les résultats attendus?
- Quelles sont les options prioritaires permettant de réduire l'amplitude des risques jugés critiques ?

• *Déroulement des entretiens*

Les entretiens effectués étaient parfois individuels et parfois collectifs selon la disponibilité des interviewés. En général, l'entretien commence par une brève introduction présentant le thème, les objectifs visés par l'enquête et les différents axes à aborder au cours de l'entretien. Une fois l'interlocuteur est introduit au thème, la discussion des différents axes se déroule selon l'ordre présenté précédemment, bien que l'interlocuteur puisse être sur un thème et fournir des éléments de réponses sur un autre thème différent.

En raison de l'emploi du temps surchargé des personnes à interviewer, nous nous sommes trouvés parfois obligés de revenir plusieurs fois au même répondant pour épuiser tous les thèmes. Ces retours nous ont permis de réajuster progressivement le contenu du guide, de façon à ce que nous avons pu avoir la forme finale. Après la finalisation de chaque interview pour la première fois, nous y revenions une seconde fois pour infirmer ou confirmer les réponses obtenues.

**II.2.2. L'Approche d'évaluation des risques**

Aujourd'hui le management des risques est utilisé dans différents secteurs. Les chercheurs en sciences de gestion qui traitent les questions relatives à la gestion des risques font face à la nécessité de confirmer l'approche de gestion intégrée des risques, selon laquelle on devrait adopter une vue générale des risques tenant compte des évolutions du contexte actuel.

Cependant, la recherche sur les risques doit encore être rattachée à une discipline majeure des sciences de gestion. L'enjeu des recherches scientifiques sur les risques est de parvenir à faire de la gestion des risques une discipline autonome.

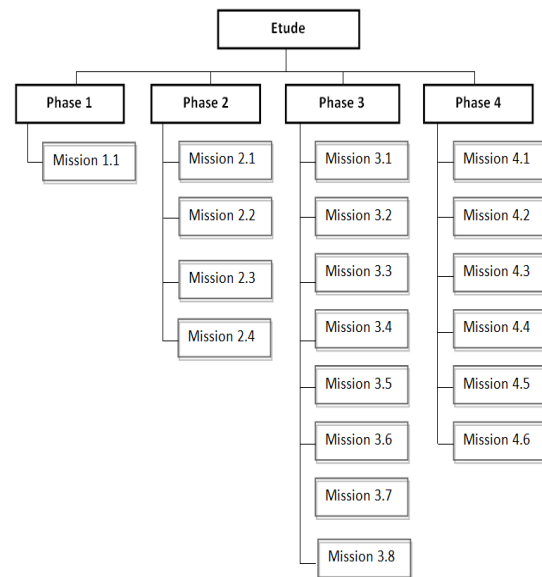
Selon certain auteurs [22], le management des risques ne doit jamais être considéré comme statique. Il doit s'adapter en permanence aux évolutions des situations dans le temps, afin de répondre de manière plus précise et efficace à son objectif qui consiste en la réduction de l'effet négatif des aléas et si possible la maximisation de leurs effets positifs. D'autres auteurs comme Del Cano [23] considèrent le management des risques comme une démarche dynamique qui s'adapte dans le temps aux risques qui apparaissent. Selon Le Roy

[24], l'évènement risqué est un évènement dont l'occurrence (ou apparition) est incertaine et qui influence positivement ou négativement les objectifs.

**III. Résultats et discussion**

Pour mener à bien l'étude expérimentale nous avons choisis d'adopter une démarche de projet qui consiste à définir une organisation et une structure à notre travail et à déterminer aussi l'enchaînement des activités (phases et tâches). Pour cette raison, nous avons identifié dix-neuf (19) missions en premier lieu et de les structurées ensuite en quatre (04) phases en fonction des exigences et spécifications de chaque phase.

La structure de ces phases peut être représentée selon l'organigramme WBS (Work Breakdown Structure) comme suit:



*Figure3. Organigramme WBS de l'étude expérimentale*

Quant au détail des différentes missions de cette étude expérimentale, il est donné dans le tableau 1:

*Tableau 1. Structure de décomposition de l'étude*

Phase	Mission
<b>P1: Choix du site</b>	<b>M 1.1:</b> champ de tir et d'explosifs militaire de Ain Oussera/Djelfa
<b>P2 :</b>	<b>M 2.1: Préparation des échantillons :</b> Prélèvement de cinquante (50) kilos



<b>Ilonnage</b>	de sable du champ de tir et d'essais d'explosifs militaire d'Ain Ousseara
	<b>M 2.2: Préparation des échantillons :</b> Le tamisage du sable réalisé à l'aide d'une tamiseuse par vibration de 200µm
	<b>M2.3:</b> l'analyse du sol sableux afin d'identifier la composition minérale et organique initiale.
	<b>M 2.4:</b> la contamination de 300g du sol prélevé par des explosifs ; TNT et TETRYL
<b>P3 : Essais de laboratoire</b>	<b>M 3.1:</b> l'acquisition de la cellule électrocinétique et ses accessoires
	<b>M 3.2:</b> préparation de deux solutions électrolytes: $KMnO_4$ et $Na_2SO_4$ de concentration de (0.1M)
	<b>M 3.3:</b> humidification de 300g du sol contaminé par la solution électrolyte $Na_2SO_4$ jusqu'à la saturation.
	<b>M 3.4:</b> l'installation de la cellule électrocinétique (deux compartiments ; anodique et cathodique plus un compartiment central renfermant le sol ainsi que le générateur et le multimètre)
	<b>M 3.5:</b> remplir le compartiment anodique par $KMnO_4$ et le compartiment cathodique par $Na_2SO_4$ et le compartiment central par 300g du sol contaminé et humidifié.
	<b>M 3.6:</b> utilisation des électrodes en feuilles de carbone
	<b>Mission 3.7 :</b> connecter la cellule avec un générateur et un multimètre pour évaluer le courant avec fixation du voltage à 20 volts.
	<b>M 3.8:</b> Reproductibilité des résultats, recommencer tout les étapes des essais du laboratoire en moins trois (03) fois afin de confirmer ou infirmer les résultats.
<b>P4 : Analyse des résultats</b>	<b>M 4.1:</b> Collecte des données chaque 24 heures du courant, du PH et de la conductivité.
	<b>M 4.2: Analyse des données :</b> pendant 25 jours l'arrêt de l'expérience.
	<b>M 4.3:</b> Traitement des résultats :diviser le sable rempli dans le compartiment central en quatre (04) sections.
	<b>M 4.4:</b> évaluer l'humidité des quatre sections ainsi que le témoin.
	<b>M 4.5:</b> faire l'extraction des molécules organiques et minérales
	<b>M4.6:</b> procéder aux analyses

quantitative et qualitative chromatographiques et spectrales notamment HPLC, FTIR, SAA, DRX, UV, $KMnO_4$ .
---

### III.1. Identification des risques

Selon la norme ISO 31000 [25], l'identification des risques a pour but de rechercher, reconnaître et décrire les risques opérationnels qui peuvent aider ou empêcher un organisme d'atteindre ses objectifs. Il est essentiel de rappeler que les informations utilisées pour l'identification des risques soient pertinentes, appropriées et à jour. Ces informations peuvent être tirées des faits consignés dans des registres spéciaux ou conclues des enquêtes par entretiens comme celle menée dans la présente étude.

Selon les résultats des entretiens effectués, la liste des risques opérationnels pouvant se produire au cours des différentes phases et missions de l'étude expérimentale se présente de la manière suivante :

**Tableau2.** Liste des risques opérationnels identifiés dans le cadre de l'étude

Phase	Mission	Abréviations	Risque
<b>P 1</b>	1.1	R 1.1	Avis défavorable pour la demande de prélèvement
	2.1	R 2.1	Non-conformité du prélèvement
<b>P 2</b>	2.2	R 2.2	Contamination
	2.3	R 2.3	-Résultats erronés -Non disponibilité des résultats
	2.4	R 2.4	-Non disponibilité des contaminants -Erreur dans la pesée
	3.1	R 3.1	-Cellule non fiable -Non-respect du délai de livraison
<b>P 3</b>	3.2	R 3.2	Erreur dans la préparation des solutions
	3.3	R 3.3	Humidification du sol non équilibré
	3.4	R 3.4	Montage mal conçu
	3.5	R 3.5	Remplissage non adéquat
	3.6	R 3.6	Non disponibilité de feuilles de carbone
	3.7	R 3.7	Mauvaise évaluation du courant
	3.8	R 3.8	Résultats différents ou erronés
	<b>P 4</b>	4.1	R 4.1
4.2		R 4.2	Mauvaise estimation de la durée de l'expérience

4.3	R 4.3	Mauvaise répartition des sections
4.4	R 4.4	Résultats erronés
4.5	R 4.5	Extraction non conforme
4.6	R 4.6	-Résultats erronés -délai de remise des résultats très long

### III.2. Analyse des risques

L'analyse des événements redoutés, ainsi que les causes ou les effets engendrés dans les différentes phases de l'étude, nous a permis d'identifier les facteurs engendrant chaque risque d'une manière synthétique. Le tableau 3 présente ces différents facteurs:

**Tableau 3.** Risques opérationnels et facteurs engendrant les risques

Abbrévié	Risques	Facteurs engendrant le risque
R 1.1	Avis défavorable pour la demande de prélèvement	Zone militaire
R 2.1	Non-conformité du prélèvement	Mauvais choix du site de prélèvement
R 2.2	Contamination	Présence des explosifs, matières chimiques ou toxiques
R 2.3	-Résultats erronés -Non disponibilité des résultats	-Incompétence de l'analyste -Non disponibilité de la technique
R 2.4	-Non disponibilité des contaminants -Erreur dans la pesée	-Fourniture des explosifs par les autorités militaires
R 3.1	-Cellule non fiable -Non-respect du délai de livraison	-Non acquisition de matériel nécessaire à l'exécution du projet -Fuites -Conception non conventionnelle
R 3.3	Humidification du sol non équilibré	-Sursaturation -Sous-saturation
R 3.4	Montage mal conçu	Mauvaise installation
R 3.5	Remplissage non adéquat	Fuites
R 3.6	Non disponibilité de feuilles de carbone	Electrode non adéquate
R 3.7	Mauvaise évaluation du courant	-Défaillance du générateur ou multimètre - Surtension

Abbrévié	Risques	Facteurs engendrant le risque
R 3.8	Résultats différents ou erronés	Mode opératoire différent
R 4.1	Mauvaise lecture des résultats	Défaillance ou non calibrage du pH mètre, conductimètre et le multimètre
R 4.2	Mauvaise estimation de la durée de l'expérience	Absence de signes du bon déroulement de l'expérience
R 4.3	Mauvaise répartition des sections	Division du sable des compartiments
R 4.4	Résultats erronés	-Défaillance de l'étuve -Non calibration de la balance
R 4.5	Extraction non conforme	Mauvaise extraction
R 4.6	-Résultats erronés -délai de remise des résultats très long	-Non disponibilité des techniques d'analyse -Non disponibilité des standards -Incompétences de l'analyste

Cependant et pour l'analyse des facteurs de risques, ainsi que les causes et les effets engendrés, nous avons choisi le diagramme cause-effet d'Ishikawa qui nous a permis de visualiser le rapport existant entre un problème et toutes ses causes possibles. Cette démarche nous a conduits d'identifier les causes possibles des problèmes et leurs effets d'une manière synthétique selon cinq (05) familles de risques (Méthode, Milieu, Main d'œuvre, Matériel et Matière).  
 Le tableau 4 regroupe l'ensemble des causes et effets qui peuvent conduire à des résultats erronés ou à l'échec de l'étude d'une manière générale.

**Tableau 4.** Famille de risques selon Ishikawa

Risque	Résultat erronés
<b>Méthode</b>	Non disponibilité de la technique d'analyse Mode opératoire différent Non disponibilité des standards Extraction non conforme
<b>Main d'œuvre</b>	Incompétence de l'analyste Erreur dans la pesée Mauvaise lecture des résultats Mauvaise évaluation du courant Mauvaise répartition des sections
<b>Milieu</b>	Zone militaire : avis défavorable pour la demande de prélèvement Mauvaise choix du site de prélèvement

Risque	Résultat erronés
	Présence des explosifs, matières chimiques ou toxiques (Contamination) Sursaturation ou sous-saturation du sol
<b>matériel</b>	Défaillance de l'étuve Défaillance ou non calibrage du pH mètre, conductimètre et le multimètre Défaillance du générateur ou multimètre Mauvaise installation Non calibration de la balance Non acquisition de matériel nécessaire à l'exécution du projet
<b>Matière</b>	Non disponibilité de feuilles de carbone Produits périmés Non disponibilité des contaminants

### III.3. Evaluation des risques

Selon plusieurs organismes internationaux, comme ISO (International Organization for Standardization) et Afnor (Association française de normalisation), l'évaluation des risques consiste à déterminer en premier lieu, la probabilité et la gravité de chaque risque afin de déterminer la criticité du risque.

Dans notre cas, pour évaluer les risques identifiés, nous avons réalisé en premier lieu, des entretiens individuels et de groupe menés avec les collaborateurs. En second lieu, de calculer la criticité du chaque risques à travers la multiplication de la gravité par la probabilité.

Certains auteurs comme Pinto [26], l'évaluation des risques se calcule à travers l'équation suivante:

**Risk = (Probability of event) (Consequences of Event)**

Pour évaluer les risques nous avons choisi des échelles de cotation de la probabilité et de la gravité telles qu'elles sont données dans le tableau 5 :

Tableau 5. Echelle de la fréquence et de la gravité

Echelle de valeur	Probabilité	gravité
4	Très probable (Certain)	Majeure
3	Probable	Importante
2	Peu probable (Possible)	Significatif
1	Improbable	Mineure

Le tableau 6 résume l'évaluation de l'ensemble des risques opérationnels détectés dans la présente étude.

Tableau 6. Evaluation des risques opérationnels de l'étude

Risque		Probabilité	Gravité	Criticité	Priorité
1.1	Avis défavorable pour la demande de prélèvement	3	4	12	1
2.1	Non-conformité du prélèvement	1	4	4	3
2.2	Contamination	3	3	9	1
2.3	-Résultats erronés -Non disponibilité des résultats	3	3	9	1
2.4	-Non disponibilité des contaminants -Erreur dans la pesée	2	4	8	2
3.1	-Cellule non fiable -Non-respect du délai de livraison	1	3	3	3
3.2	Erreur dans la préparation des solutions	1	2	2	3
3.3	Humidification du sol non équilibré	1	2	2	3
3.4	Montage mal conçu	3	2	6	2
3.5	Remplissage non adéquat	3	2	6	2
3.6	Non disponibilité de feuilles de carbone	3	4	12	1
3.7	Mauvaise évaluation du courant	1	2	2	3
R 3.8	Résultats différents ou erronés	3	3	9	1
R 4.1	Mauvaise lecture des résultats	3	4	12	1
R 4.2	Mauvaise estimation de la durée de l'expérience	3	2	6	2
R 4.3	Mauvaise répartition des sections	1	2	2	3
R 4.4	Résultats erronés	3	3	9	1
R 4.5	Extraction non conforme	3	3	9	1
R 4.6	-Résultats erronés -délai de remise des résultats très long	1	1	1	3

### III.4. Cartographie des risques

Selon Staccini et Quaranta [27], la cartographie est un outil de pilotage relativement simple, explicite et visuel qui permet de situer les risques, de fixer des objectifs et de contrôler leur évolution. C'est une matrice représentative de la probabilité d'occurrence et de la gravité d'un ou de plusieurs risques. Son objectif est de disposer d'un état des lieux global des vulnérabilités pour l'ensemble des champs d'activité.



Dans le cas de notre étude nous avons hiérarchisé les risques identifiés en ordre de trois (03) priorités à savoir:

- Priorité 1 : risque élevé nécessite une réduction immédiate (criticité entre 9 et 12).
- Priorité 2 : risque modéré nécessite une surveillance permanente (criticité entre 5 et 8).
- Priorité 3 : risque mineur et non prioritaire (criticité entre 1 et 4).

Sur la base de l'évaluation obtenue dans le tableau 5ci-dessus, la matrice suivante montre clairement la cartographie des risques identifiés dans le cadre de notre étude par rapport à la criticité.

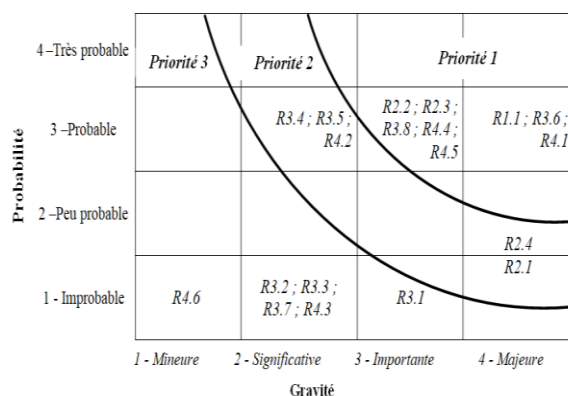


Figure 4. Cartographie des risques identifiés.

L'intérêt de cette cartographie des risques est de servir de base à la définition d'un plan d'action pour mieux maîtriser ou réduire les risques les plus critiques.

Le tableau 7 propose des mesures préventives jugées nécessaire à la bonne maîtrise des risques identifiés dans le cadre de la présente étude.

Tableau 7. Plan d'action pour gérer les risques

	Risques	Mesures préventives
R1.1	Avis défavorable pour la demande de prélèvement	Insister avec les autorités concernées pour avoir un avis favorable ou solliciter d'autres organismes
R2.2	Contamination	Utiliser les équipements de protection pour les opérateurs et respecter les consignes de sécurité et hygiène

R2.3	Résultats erronés et non disponibilité des résultats	Dénicher le mode opératoire adéquat La sélection d'un analyste compétant et solliciter différents organismes publics et privés spécialisés en la matière
R3.6	Non disponibilité de feuilles de carbone	Solliciter plusieurs fournisseurs ou laboratoires spécialistes
R3.8	Résultats différents ou erronés	Refaire les expériences jusqu'à l'obtention de résultats convenables
R4.1	Mauvaise lecture des résultats	Calibrer et étalonner les appareils de mesures et suivre convenablement leurs modes d'utilisation
R4.4	Résultat erronés	Suivre le mode opératoire d'extraction adéquat et vérifier les produits utilisés ainsi que leurs dates de péremption
R4.5	Extraction non conforme	Utiliser la méthode d'extraction la plus adéquate ainsi que les produits chimiques conformes

L'évaluation des risques et l'opérationnalisation des mesures préventives permettront sans doute de mieux maîtriser les risques inhérents à la technologie électrocinétique et de renforcer ses aspects sécuritaires, techniques, économiques et organisationnels.

*Sur le plan sécuritaire :* prendre des mesures préventives notamment celles en rapport avec la contamination par de TNT, le Tetryl et le RDX, et ce, à travers l'utilisation des équipements de protection pour les opérateurs et respecter les consignes de sécurité et d'hygiène.

*Sur le plan technique :* instaurer un mode opératoire adéquat à la méthode électrocinétique et sélectionner des analystes et des techniciens de laboratoire compétents pour assurer une meilleure calibration et étalonnement des appareils de mesures et suivre convenablement leurs modes d'utilisation.

*Sur le plan économique :* mieux maîtriser les coûts de traitement d'un sol à travers la rationalisation de l'utilisation des ressources et des matériels nécessaires à l'accomplissement des différentes missions.

*Sur le plan organisationnel* : mettre en place une organisation adéquate à travers le découpage de l'opération en phases et en missions et assurer une meilleure communication avec les autorités concernées pour faciliter l'accès aux sites pollués notamment dans les zones militaires. Il convient aussi de solliciter plusieurs fournisseurs spécialisés en la matière afin d'assurer l'acquisition des matériels requis comme les cellules électrocinétiques, les feuilles de carbone etc.

*Suivi et contrôle* : instaurer un bon suivi et contrôle dans le but d'assurer et d'améliorer la qualité et l'efficacité du mode opératoire choisi, de la mise en œuvre et des résultats du traitement. Il convient de souligner que le suivi continu et le contrôle périodique des risques définissant clairement les responsabilités. Le suivi et le contrôle comprennent la planification, le recueil et l'analyse d'informations, l'enregistrement des résultats et le retour d'information.

#### IV. Conclusion

En guise de conclusion, les résultats de la présente étude, indiquent clairement que l'utilisation de la méthode électrocinétique dans la décontamination des sols pollués par d'explosifs composé de TNT, le Tetryl et le RDX est avantageuse, car elle s'applique in situ, sans avoir affaire à une excavation ou à déplacer le sol ailleurs, ce qui permet de mieux maîtriser les risques provenant des surcoûts, de dépassement des délais de déplacement et de traitement des sols pollués et de contamination du personnels au cours du traitement.

Néanmoins pour mener à bien cette méthode, il est fortement recommandé de procéder à l'évaluation en amont des risques opérationnels qui peuvent menacer la réalisation des différentes missions planifiées afin de mettre en place des mesures préventives efficaces tout au long de déroulement du traitement par la méthode électrocinétique.

L'évaluation des risques s'inspire de certaines méthodes et outils de management permettant d'identifier, d'analyser et d'évaluer les risques opérationnels.

Par ailleurs, la présente étude a confirmé que la maîtrise des risques opérationnels qui peuvent se produire au cours de l'utilisation de la méthode électrocinétique n'est pas compliquée en raison de plusieurs raisons à savoir :

- Simplicité des équipements utilisés dans le traitement ;
- Absence des fortes expositions ce qui ne présente pas de danger pour le personnel de fonctionnement et pour l'environnement ;
- Consommation faible d'énergie ;
- Flexibilité de la méthode puisque elle peut être employée dans différentes situations ;

En termes de perspectives d'utilisation de l'approche d'évaluation des risques opérationnels

dans le traitement des sols contaminés, il est fortement recommandé aux chercheurs de tester cette démarche avec d'autres méthodes de décontamination plus compliquées et différentes de la méthode électrocinétique afin de comparer la nature et les facteurs engendrant les risques pour chaque méthode.

#### V. References

1. Craig, H. D.; W. E. Sisk.; M. D. Nelson.; W. H. Dana. Bioremediation of explosives-contaminated soils: A status review. Proceedings of the 10th Annual Conference on Hazardous Waste Research, Kansas State University, Manhattan, NY, USA (1995), 164-179.
2. Cameselle, C.; Gouveia, S.; Akretche, D.E.; Belhadj, B. Advances in Electrokinetic Remediation for the removal of organic contaminants in soils in *Organic Pollutants - Monitoring, Risk and Treatment*, Rashed M. N Eds; Intechopen, (2013).
3. Pennington, J.C.; Brannon, J.M. Environmental fate of explosives. *Thermochim Acta*, 384:1 (2002) 163-172.
4. Juhasz, A.L.; Naidu, R. Explosives: Fate, Dynamics, and Ecological Impact in Terrestrial and Marine Environments. *Environ. Contam Toxicol* 191 (2007) 163-215.
5. Kalderis, D.; Juhasz, A.L.; Boopathy, Raj.; Comfort, S. Soils contaminated with explosives: environmental fate and evaluation of state-of-the-art remediation processes (IUPAC technical report). *Pure and Applied Chemistry* 83: 7 (2011), 1407-1484.
6. Lewis, T. A.; D. A. Newcombe D. A.; Crawford, R. L. Bioremediation of soils contaminated with explosives. *Journal of Environmental Management* 70:4 (2004) 291-307.
7. Pamuku, S.; Wittle, J.K. Electrokinetic removal of selected heavy metals from soil. *Environmental Progress*, 11:4(1992)241-250.
8. Acar, Y. B.; Hamed, J.T.; Alshawabkeh A.N. Removal of cadmium (II) from saturated kaolinite by the application of electrical current. *Geotechnique*, 44:2(1994) 239-254.
9. Reed, E. B.; Carriere, P.C.; Thompson, J.C.; Hatfield, J.H. Electrokinetic (EK) remediation of a contaminated soil at several Pb concentrations and applied voltages. *Journal of Soil Contamination*, 5:2(1996)95-120.
10. Reddy, K. R.; Parupudi, U .S. Removal of chromium, nickel, and cadmium from clays by in-situ electrokinetic remediation. *Journal of Soil Contamination*, 6:4(1997)349-407.
11. Acar, Y.B.; Alshawabkeh, A.N. Principles of Electrokinetic Remediation. *Environmental Science and Technology*, 27:13(1993) 2638-2647.
12. Baraud, F.; Fourcade, M. C.; Tellier, S.; Astruc, M. Modelling of decontamination rate in an electrokinetic soil processing. *International Journal Of Environmental Analytical Chemistry* 68:2(1997) 105-121.
13. Reddy, K. R.; Cameselle, C. *Electrochemical Remediation Technologies for Polluted Soils, Sediments and Groundwater*. Wiley (2009).
14. Chung, H.I.; Kang, B.H. Lead removal from contaminated marine clay by electrokinetic soil decontamination. *Engineering geology* 53:2(1999)139-150.
15. Giannakis, G.D.; Muntoni, A.; Poletini, A.; Pomi, R. Enhanced electrokinetic treatment of different marine sediments contaminated by heavy metals. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 43:8., (2008) 852.

16. Park, S.-W.; Lee, J.-Y.; Yang, J.-S.; Kim, K.-J.; Baek, K. Electrokinetic remediation of contaminated soil with waste lubricant oils and zinc. *Journal of Hazardous Materials*, 169 (1-3)(2009) 1168-1172.
17. Kim, K.-J.; Kim, D.-H.; Yoo, J.-C.; Baek, K. Electrokinetic extraction of heavy metals from dredged marine sediment. *Separation and Purification Technology*, 79:2(2011)164-169.
18. Lageman, R. Full Scale Applications of Electrokinetic Remediation Technology. In: SEKRET & Co. Workshop. *Innovazione in Toscana sul trattamento dei sedimenti di dragaggio*. Livorno, Italy, 14/04/2015.
19. Reddy, K. R.; Saichek, R.E.; Maturi, K.; Ala, P. Effects of Soil Moisture and Heavy Metal Concentrations on Electrokinetic Remediation. *Indian Geotechnical Journal*, 32 :2(2002) 258-288.
20. Hervé Dumez, H. Méthodologie de la recherche qualitative, Vuibert, 2e Édition, Paris(2015).
21. Giordano, Y. Conduire un projet de recherche. Une perspective qualitative. *Management et Société* Eds.(2003).
22. Tepeli, E. Processus formalisé et systémique de management des risques par des projets de construction complexes et stratégiques. Génie civil. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, France(2014).
23. Del Cano, A.; La Cruz, P. Integrated Methodology for Project Risk Management. *Journal of Construction Engineering and Management*, 128: 6(2002) 473-48.
24. LeRoy, W. J. Dictionary of Project Management Terms, Third Edition. ESI International (2011).
25. Norme ISO 31000: Risk management – Guidelines (2018).
26. Pinto J, Project Management Achieving Competitive Advantage, Pearson Education International. (2007).
27. Staccini, P.; Quaranta, J-F. (2007). Modéliser les processus de soins pour décrire les activités et mieux identifier les risques. *Risques & Qualité*; IV : 3 (2007) 143-151.

**Please cite this Article as:**

Chohra M., Chohra M., Mezhouda A., Zeghdaoui A., Akretche D., Evaluation des risques opérationnels liés à l'utilisation de la méthode électrocinétique pour la décontamination des sols pollués par un mélange d'explosifs, **Algerian J. Env. Sc. Technology**, 6:1 (2020) 1296-1306