

TECHNOLOGIES DE DÉCONTAMINATION DE SOLS CONTAMINÉS PAR DES  
PESTICIDES AU MALI

Par

Omar Ben Khatab Ndiaye

Essai présenté au Centre Universitaire de Formation en Environnement en vue de  
l'obtention du grade de maître en environnement (M.Env.)

CENTRE UNIVERSITAIRE DE FORMATION EN ENVIRONNEMENT

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Sherbrooke, Québec, Canada, mai 2010



## **IDENTIFICATION SIGNALÉTIQUE**

### **TECHNOLOGIES DE DÉCONTAMINATION DE SOLS CONTAMINÉS PAR DES PESTICIDES AU MALI**

Omar Ben Khatab Ndiaye

Essai effectué en vue de l'obtention du grade de maître en environnement (M.Env.)

Sous la direction de Martin Duquette

Université de Sherbrooke

Mai 2010

Mots clés : Décontamination, sols contaminés, développement durable, grille d'analyse, pesticides, champignon de la pourriture blanche, Mali

Les sols contaminés par les pesticides au Mali sont devenus un problème environnemental, mais également une source de danger pour les populations qui habitent non loin des sites touchés. Une décontamination doit donc être opérée, mais elle doit se faire dans une optique de développement durable. Neuf technologies ont été identifiées applicables au cas du Mali. Toutefois, la plus appropriée s'avère être celle du champignon de la pourriture blanche qui consiste à dégrader les pesticides à l'aide de souches de microorganismes soigneusement choisies. Elle est la plus optimale du point de vue du coût et elle garantit une décontamination à court terme. Les sols seront d'abord excavés avant d'être traités dans une biopile. Des essais de minéralisation et de dégradation sont nécessaires pour optimiser le procédé et obtenir un rendement de décontamination maximum.

## SOMMAIRE

La pulvérisation des pesticides lors de l'invasion acridienne de 2004 ainsi que le stockage de pesticides périmés sont la cause de la contamination de plusieurs zones au Mali. Une étude effectuée par le Laboratoire de Toxicologie et de Contrôle de la Qualité Environnementale de Bamako a en effet montré la présence de pesticides organochlorés et organophosphorés dans les zones de Molodo, Sévaré et Yélimané à des concentrations diverses. Ces dernières dépassent souvent le critère B de décontamination des pesticides totaux.

La décontamination devient donc inéluctable afin de protéger l'environnement, mais également la santé des populations aux alentours des sites touchés par la contamination. Différentes technologies permettent de diminuer la concentration des pesticides dans les sols. Elles peuvent être appliquées *in situ* ou *ex situ*. Cependant, il convient d'en choisir une qui est appropriée aux conditions du Mali qui demeure un pays sahélien avec certaines particularités géographiques et climatiques.

L'objet de cette étude est dans un premier temps d'identifier les technologies applicables au Mali puis de les analyser à l'aide d'une grille de développement durable adaptée à la décontamination des sols. Enfin, le but ultime de l'essai consiste en une recommandation de la technologie qui répond le mieux aux objectifs de développement durable.

Après avoir déterminé le critère de décontamination applicable aux sites à l'étude, qui est équivalent au critère B concernant le zonage résidentiel, neuf technologies ont été identifiées comme étant applicables dans le cas du Mali. Elles sont de différents types : biologiques, chimiques et thermiques. Par la suite, leurs coûts ont été déterminés par rapport au m<sup>3</sup> de sols à décontaminer afin de faciliter leur comparaison. Leurs avantages et leurs inconvénients ont également été indiqués dans un tableau.

Une analyse de développement durable à l'aide d'une grille élaborée pour l'étude a aussi été menée avec des critères adaptés à la décontamination des sols. Les résultats ont montré que sur les neuf technologies applicables, celle du champignon de la pourriture blanche a obtenu le meilleur score et est donc la plus durable.

La technologie, pour être efficace, devrait être utilisée après excavation des sols. Une biopile servira de milieu de réaction avec une injection d'air humidifié et un système de

pompage éventuel du lixiviat qui pourrait se former. Des essais préliminaires de minéralisation et de biodégradation devraient, également, permettre d'optimiser le processus de décontamination et d'avoir un rendement maximum.

## **REMERCIEMENTS**

Tous mes remerciements vont à M. Martin Duquette qui n'a jamais manqué d'idées, tout au long de cet exercice, pour m'aider à améliorer, continuellement, l'étude. Son expérience, dans le domaine de la décontamination, m'a été d'une très grande utilité et m'a permis d'accroître mes connaissances dans le sujet.

Je tiens, également, à remercier M. Sidibé du Laboratoire de Toxicologie et de Contrôle de la Qualité Environnementale de Bamako qui m'a fourni certains renseignements sur le sujet.

## TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION .....	1
1. MISE EN CONTEXTE.....	3
1.1. Historique de la contamination .....	3
1.2. Description des terrains.....	4
1.2.1. La zone de Sévaré .....	5
1.2.2. Le site de Yélimané .....	6
1.2.3. Le site de Molodo .....	7
1.3. Disponibilités des services d'utilités publiques.....	8
1.4. Contexte hydrogéologique et géologique .....	10
1.5. Propriétés physico-chimiques des principaux contaminants .....	12
1.6. Critères de décontamination.....	17
1.7. Étendue de la contamination dans les zones d'étude .....	19
1.7.1. Zone de Modolo.....	19
1.7.2. Zone de Sévaré.....	20
1.7.3. Zone de Yélimané .....	20
2. TECHNOLOGIES DE DÉCONTAMINATION APPLICABLES .....	22
2.1. Critères de sélection des technologies applicables.....	22
2.2. Description des technologies applicables .....	22
2.2.1. Le champignon de la pourriture blanche .....	22
2.2.2. Le lavage des sols ex situ.....	24
2.2.3. Bioaugmentation in situ .....	25
2.2.4. Phytoremédiation.....	26
2.2.5. Oxydation chimique .....	27
2.2.6. La désorption thermique à haute température .....	29
2.2.7. L'épandage contrôlé ou landfarming .....	30
2.2.8. Bioréacteur .....	31
2.2.9. Incinération.....	32
2.3. Durée, coût, avantages et inconvénients des technologies applicables.....	33
3. LA DÉCONTAMINATION VUE SOUS L'ANGLE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE.....	36
3.1. Pertinence d'une analyse sous l'angle du développement durable .....	36
3.2. Élaboration d'une grille de développement durable .....	38
3.3. Élaboration de critères d'analyse.....	41
3.3.1. Sphère environnementale.....	41

3.3.2.	Sphère économique.....	43
3.3.3.	Sphère sociale.....	44
4.	ANALYSE DES TECHNOLOGIES ET RECOMMANDATIONS SUR LA TECHNOLOGIE LA PLUS APPROPRIÉE.....	46
4.1.	Analyse par pôle de la technologie sélectionnée .....	48
4.1.1.	Pôle environnemental.....	48
4.1.2.	Pôle économique.....	50
4.1.3.	Pôle social .....	52
4.2.	Applicabilité de la technologie au Mali et facteurs contribuant à son coût....	53
	CONCLUSION.....	56
	RÉFÉRENCES .....	58
	ANNEXE 1 BIBLIOGRAPHIE.....	66
	ANNEXE 2 RÉSULTATS D'ANALYSES DES SOLS PRÉLEVÉS LE 21/07/07 AU NIVEAU DE MOLODO .....	70
	ANNEXE 3 RÉSULTATS D'ANALYSES DES SOLS PRÉLEVÉS LE 21/07/07 AU NIVEAU DE SÉVARÉ .....	76
	ANNEXE 4 RÉSULTATS D'ANALYSES DES SOLS PRÉLEVÉS LE 21/07/07 AU NIVEAU DE YÉLIMANÉ.....	80
	ANNEXE 5 LOCALISATION ET QUANTITÉ DE PESTICIDES OBSOLÈTES RÉPERTORIÉS AU MALI .....	86
	ANNEXE 6 RÉSULTATS DE L'ANALYSE DE DÉVELOPPEMENT DURABLE DES TECHNOLOGIES.....	88



## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Les traces de pollution potentielle observées sur le site - environ 50 cm sur les photos .....	6
Figure 1.2 : Eaux de ruissellement drainées vers la mare alimentant les puits.....	7
Figure 1.3 : Sol contaminé à l'extérieur d'un lieu de stockage à Molodo.....	8
Figure 3.1 : Présentation de la grille.....	41

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Services d'utilités publiques de Yélimané et de Molodo.....	9
Tableau 1.2 : Données climatiques de Molodo.....	11
Tableau 1.3 : Données climatiques de Yélimané .....	12
Tableau 1.4 : Propriétés physico-chimiques des principaux pesticides .....	15
Tableau 1.5 : Grille des critères applicables aux cas de contamination aux pesticides des eaux souterraines.....	18
Tableau 1.6 : Critères de décontamination des pesticides pour les sols et les eaux souterraines .....	19
Tableau 2.1 : Tableau de comparaison des technologies .....	33
Tableau 3.1 : Évaluation des critères de la grille .....	40
Tableau 3.2 : Pondération des critères de la grille .....	40
Tableau 4.1 : Facteurs contribuant au coût de la technologie choisie .....	54

## **LISTE DES ACRONYMES, DES SIGLES ET DES SYMBOLES**

CEDRE	Centre de documentation, de recherche et d'expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux
COV	Composés organiques volatiles
DDD	Dichlorodiphenyldichloroethane
DDE	Dichlorodiphenyldichloroethylene
DDT	Dichlorodiphényltrichloroéthane
DJA	Doses journalières admissibles
FAO	Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
FRTR	Table ronde fédérale sur les technologies de décontamination
HCH	Hexachlorocyclohexane
HS	Hors site
MDDEP	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs
OCEE	Office de la coordination environnementale et de l'énergie du canton de berne
PALUCP	Projet africain de lutte d'urgence contre le criquet pèlerin
PAN	Réseau d'action pour les pesticides
PASP	Programme africain relatif aux stocks de pesticides obsolètes
RAS	Rien à signaler
USEPA	Agence de protection de l'environnement des États-Unis
VROM	Ministère du Logement, de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement de la Hollande

## LEXIQUE

Demi-vie	Temps nécessaire pour que la concentration d'un composé atteigne la moitié de sa concentration initiale par transformation (Olivier, 2007)
<i>Ex situ</i>	En dehors de son milieu naturel (Office québécois de la langue française, 2010)
<i>In situ</i>	Dans son milieu naturel (Office québécois de la langue française, 2010)
Photodégradation	Dégradation de molécules par adsorption de photons (Wikipédia, 2009a)
Surfactant	Composé chimique qui abaisse la tension superficielle pour augmenter les propriétés mouillantes (Olivier, 2007)
Talweg	Ligne qui rencontre les plus bas points d'une cuvette (Wikipédia, 2009b)

## INTRODUCTION

Les pesticides sont responsables de la contamination des sols de plusieurs villes du Mali. Ce sont le résultat des résidus de l'épandage qui a été réalisé lors de la lutte contre la dernière grande invasion de criquets pèlerins (*Schistocerca gregaria*). Les principaux contaminants utilisés et retrouvés dans les sols sont le dièldrine, le malathion et le parathion éthyle. Le risque, pour la santé des populations riveraines, mais aussi pour l'environnement, est donc présent. Il devient ainsi très urgent de remédier à la situation actuelle en décontaminant ces sols. Une technologie appropriée permettra de réduire, grandement, les concentrations de pesticides, voire les éliminer et redonner aux sols leur usage respectif.

Il existe plusieurs technologies de décontamination des sols contaminés, néanmoins toutes ne sont pas applicables dans toutes les conditions. Une étude est donc nécessaire pour déterminer la meilleure technologie pour les sols du Mali. Le contexte économique est à prendre en considération, dans ce cas, afin de trouver des solutions innovatrices à la problématique de la contamination des sols par les pesticides au Mali. Selon le rapport de mission du 15 juin au 15 août 2007, commandé par l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO), intitulé : "*Diagnostic des capacités d'analyses de résidus de pesticides du Laboratoire Central Vétérinaire, Bamako, Mali*", il existerait trois principales zones de contamination, celles de Molodo, de Sévaré et de Yélimané.

Ce travail se veut une étude qui permettra d'identifier les technologies les plus performantes en matière de décontamination des sols, les plus économiques, mais également les plus respectueuses de l'environnement possible. Pour ce faire, elles seront analysées à l'aide d'une grille de développement durable en mettant l'accent, particulièrement, sur la faisabilité économique et technique, sans oublier le pôle de l'environnement. Par la suite, une recommandation de la technologie la plus appropriée sera faite.

Pour atteindre ce but, l'étude comprendra, dans un premier temps, une mise en contexte avec un historique de la contamination pour mieux cerner la problématique posée. Ensuite une description des zones à l'étude sera effectuée afin de déterminer les conditions rencontrées aux lieux exacts de la contamination, mais aussi les risques encourus pour l'environnement et éventuellement pour les humains. Par la suite, la disponibilité des services d'utilités publiques sera vérifiée dans le but de prévoir les éventuelles contraintes

à la mise en œuvre de la technologie choisie. Le contexte géologique et hydrogéologique sera, également, pris en compte dans la recherche des technologies, de même que les critères de décontamination.

Dans un deuxième temps, une description des technologies applicables sera effectuée en énumérant leurs avantages et leurs inconvénients avant de les comparer. Enfin, interviendra un choix de technologie après avoir effectué une analyse de développement durable des technologies.

## **1. MISE EN CONTEXTE**

L'invasion acridienne est une menace récurrente en Afrique de l'Ouest et du Nord. Elle peut causer des dommages inestimables dans l'économie des pays de cette zone, en général, qualifiés de sous développés ou en voie de développement. En effet, les criquets pèlerins sont en mesure de dévaster les cultures des populations en peu de temps puisqu'ils se reproduisent en grand nombre.

La dernière grande invasion de criquets en Afrique de l'Ouest, notamment au Mali, date de 2004. Pour les éliminer, il a fallu recourir à des pesticides pulvérisés par des aéronefs ou des voitures équipées d'équipements de pulvérisation. En 2004, un communiqué du conseil des ministres du gouvernement malien déclarait que le Mali était en mesure d'obtenir 15 000 litres de pesticides destinés à être appliqués (Koné et PAN, 2006). Cependant, une fois pulvérisés, ces derniers demeurent dans les sols avec des niveaux de contamination parfois très élevés. Les sols de ces régions sont des sols peu humides avec des températures élevées le jour et basses la nuit. De plus, les pesticides utilisés (dièldrine, malathion, fenitrothion, parathion ethyle) ne sont pas, souvent, bien entreposés aggravant, ainsi, la situation aux endroits d'entreposage. Il faut donc traiter les sols qui ont été affectés, à la fin de l'invasion acridienne, afin de leur redonner leur usage respectif.

En 2007, une étude réalisée par le Laboratoire de Toxicologie et de Contrôle de la Qualité Environnementale de Bamako, mandaté par la FAO, a montré la présence, notamment, de dièldrine et de parathion (parathion éthyle) dans les sols de Molodo, Sévaré, Yélimané à des concentrations variables. L'essai permettra donc d'évaluer s'il existe des technologies de décontamination appropriées à ces territoires semi-arides. Les solutions, qui seront proposées, tiendront compte des moyens limités du Mali. Elles devront donc être économiques et relativement faciles à mettre en œuvre.

### **1.1. Historique de la contamination**

Dans les années 2004/2005, le Mali a connu une invasion acridienne sans précédent. Des moyens très importants ont donc été mis en œuvre pour éradiquer les criquets pèlerins qui risquaient de menacer la campagne agricole de cette année. De grandes quantités de pesticides ont ainsi été nécessaires pour la lutte anti-acridienne. Le réseau d'action pour les pesticides (PAN) a effectué un bilan de la gestion des pesticides lors de l'invasion de 2004/2005 indiquant que le Mali avait reçu, au total, environ 600 000 litres de pesticides.

La plupart de ceux-ci n'étaient pas autorisés par le Comité Inter-états de Lutte contre la Sécheresse au Sahel (CILSS) qui est chargé d'homologuer les pesticides dans les pays du Sahel. Les pesticides, donnés au Mali, étaient principalement composés de chlorpyrifos (matière active : chlorpyrifos éthyle); d'asmithion (matière active : fenitrothion); de decis (matière active : deltaméthrine); de diflubenzuron (matière active : deltaméthrine); de sumicombi (matières actives : fenitrothion et esfenvalérate); de dursban (matière active : chlorpyrifos éthyle) et de malathion (matière active : malathion). Les principaux donateurs proviennent des pays du Maghreb, mais aussi de l'Afrique du Sud. Seuls 269 306 litres ont été utilisés pour la lutte anti-acridienne de 2004. Une partie du surplus a été employée pour lutter contre d'autres ravageurs lors de la campagne agricole de 2005 (Thiam *et al.*, 2006).

En 2006, la quantité de pesticides restante a été estimée à 217 016 litres. À ce stock, s'ajoutent les quantités de pesticides obsolètes que comptait le Mali avant 2004. Déjà en 2001, 1 617 récipients vides, qui ont servi à contenir ces produits, étaient recensés (Camara, 2006). Le tableau de l'annexe 5 indique les quantités et la localisation des pesticides obsolètes en date du 10 décembre 2004.

La contamination des sols serait due à un mauvais conditionnement des pesticides puisque la plupart des magasins de stockage ne sont pas en conformité avec les exigences internationales, celles de la FAO. De plus, les contrôles n'étaient pas, très souvent, effectués par manque de moyens (Thiam *et al.*, 2006).

En résumé, à la fin de l'invasion de 2004/2005, 34,7 % des superficies affectées avaient été traités par des produits chimiques pouvant avoir des impacts potentiels sur l'environnement et la santé des populations (Thiam *et al.*, 2006). Il faut ajouter à cela les pesticides périmés, mal entreposés. D'où la nécessité, aujourd'hui, d'une décontamination des sols les plus affectés qui renferment des concentrations élevées de pesticides ou qui ont été le lieu d'entreposage des pesticides.

## **1.2. Description des terrains**

Cette section a pour but de décrire les caractéristiques des zones touchées, en 2004/2005, par la contamination aux pesticides. La bonne connaissance de ces zones sera utile afin de répondre aux questions essentielles suivantes, pour évaluer la nécessité de les décontaminer, et quel niveau de décontamination doit être visé :

- Les zones contaminées sont-elles proches de lieux habités? La réponse à cette question est importante puisqu'il faudra tenir compte de la durée de traitement afin d'éviter les nuisances sonores et olfactives, si la réponse est positive. De même, les seuils de décontamination, pour certains lieux tels que les écoles, les hôpitaux et autres services à la population, ne seront pas les mêmes que d'en d'autres lieux moins sensibles;
- L'agriculture est-elle pratiquée dans les zones contaminées? Le cas échéant, la technologie devra permettre des seuils de décontamination acceptables pour les cultures et le pâturage du bétail.

### **1.2.1. La zone de Sévaré**

Sévaré est un faubourg de la ville de Mopti qui compte 40 000 habitants. Il se situe à une altitude de 268,5 m. Les problèmes d'assainissement y sont accrus, notamment, à cause de la densité de la population qui y est élevée. Elle a servi de base aérienne à deux avions lors de l'invasion de 2004. La superficie du site, potentiellement, contaminé est de 0,5 hectare. Des traces de pesticides y ont, effectivement, été observées avec de fortes odeurs (PALUCP, 2006). De même, les avions, qui avaient servi à pulvériser les pesticides, n'ont pas été nettoyés et ont été stationnés dans un hangar de 34,5 m de long, 18,2 m de large et d'environ 15 m de haut, à proximité du site des opérations (Sylla, 2007). Les pesticides y ont été entreposés, de novembre 2004 à septembre 2006, avant d'être enlevés. Des signes extérieurs montrent une dégradation de la végétation, sans doute, causée par la présence de pesticides (PALUCP, 2006).

Les coordonnées géographiques de la zone de Sévaré sont les suivantes: 15° 00' 07,7 " Nord et 002° 57' 47,2" Ouest. La zone concernée se trouve à proximité d'un talweg se déversant dans une zone habitée pendant les saisons de fortes pluies (PALUCP, 2006).

La figure 1.1 montre les photographies des traces de pollution potentielle observées sur le site de Sévaré.





Figure 1.1 : Les traces de pollution potentielle observées sur le site - environ 50 cm sur les photos

Tiré de PALUCP (2006, p.3).

### **1.2.2. Le site de Yélimané**

La ville de Yélimané fait partie de la région de Kayes. Elle compte 2 928 habitants. Elle a été utilisée comme site de stockage de pesticides. Le sol du site de stockage est en béton, les murs sont fissurés et le toit est en zinc. Le site contaminé est localisé sur une forte pente nord/sud qui mène vers des maisons (PASP, 2009b). En effet, les habitations se rapprochent de plus en plus du site. Elles sont, désormais, situées à 300 m au sud et à 200 m à l'est. Toutefois, une palissade a été installée par la Direction Nationale de l'Assainissement et du Contrôle des Pollutions et des Nuisances autour du site. Celui-ci est donc ceinturé par une clôture dont le périmètre fait 51,31 m d'un côté et 41,3 m de l'autre, soit une superficie de 0,2 hectare (Sidibé, 2007).

Les eaux de ruissellement ont, en outre, érodé le sol. Cela peut avoir pour conséquence d'accélérer la vitesse de migration de la contamination. Une contamination sévère des eaux doit absolument être évitée, car l'alimentation en eau dans ces zones se fait grâce à des puits. La figure 1.2 montre la mare qui alimente les puits d'alimentation en eau (PASP, 2009b).



Figure 1.2 : Eaux de ruissellement drainées vers la mare alimentant les puits

Tiré de PASP (2009, p. 9)

### **1.2.3. Le site de Molodo**

La ville de Molodo est située dans le cercle de Niono à environ 7 km de celui-ci. Le nombre d'habitants est de 5 000. Le site a servi de lieu de stockage de pesticides. Il se situe à proximité d'habitations et ne présente pas des traces de fissures. Il comprend trois zones contaminées aux pesticides :

- Le lieu d'entreposage des pesticides hors d'usage et ceux en bon état;
- L'extérieur du lieu de stockage;
- Les fosses de vidange contenant les emballages vides.

En 2007, le PASP a estimé que la source de la contamination avait 5 m de longueur et 2 m 50 de large, soit une superficie de 12,5 m<sup>2</sup>. Le lieu d'entreposage est un magasin en ciment construit avec des murs entiers, un toit en zinc et un sol en béton. Les bouches d'aération ne sont cependant pas suffisantes. Les deux autres dépôts sont en plein air. Ils sont donc exposés à la pluie qui pourrait drainer la contamination tout autour du site. La zone contaminée se situe dans un rayon de 500 m des habitations et à moins de 250 m de

puits d'alimentation. Enfin, la flore autour du site est constituée de hautes herbes et de quelques arbres (PASP, 2007).

Les coordonnées géographiques du site sont les suivantes : 14° 30' 54,3 " Nord et 004°05' 07,8 Ouest (PALUCP, 2006).



Figure 1.3 : Sol contaminé à l'extérieur d'un lieu de stockage à Molodo

Tiré de PASP (2007, p. 6)

### **1.3. Disponibilités des services d'utilités publiques**

Les contraintes peuvent être de plusieurs ordres lors d'une décontamination. Par exemple, l'accessibilité à l'électricité sera importante à considérer si la technologie utilisée en dépend beaucoup. Aussi, la prise en compte de ces contraintes aidera à la planification des travaux et aux calculs des coûts finaux (achats de groupes électrogènes en sus, s'il y a lieu). Si la technologie retenue emploie beaucoup d'eau et que les zones touchées ont une déficience dans ce domaine, elle sera difficilement applicable. La localisation géographique des zones étudiées peut, également, constituer une contrainte. En effet, une ville difficile d'accès peut poser problème quant au transport des matériels nécessaires à l'application de la technologie choisie.

Les services d'utilités publiques disponibles dans chacune des zones sont regroupés dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1 : Services d'utilités publiques de Yélimané et de Molodo

Services	Yélimané	Molodo
Téléphone	Présent	Présent
Alimentation électrique	Présent	Néant
Approvisionnement en eau	Présent	Néant
Hôpital / Médecin le plus proche	Présent	Niono à 2 km
Service d'ambulance le plus proche	Présent	Niono à 7 km
Service anti-incendie le plus proche	Kayes à 158 km de Niogomaré	Ségou à 105 km
Poste de police le plus proche	Présent	Niono à 7 km
Accès de la route principale vers le site	Non praticable en hivernage	Route latéritique praticable en toute saison
Se situe dans une zone urbaine ?	Oui	Non
Se situe à proximité d'un point d'eau	Oui à moins de 250 m	Oui à moins de 250 m
Activité économique	Agriculture	Agriculture

Compilation d'après PASP (2009, p. 11) et PASP (2007, p. 4)

Les données pour la zone de Sévaré ne sont pas disponibles.

#### 1.4. Contexte hydrogéologique et géologique

Le contexte hydrogéologique est, également, à prendre en considération puisqu'il va influencer la technologie à utiliser, de même que les autres caractéristiques comme la pédologie, le climat, et la géologie. En effet, certaines technologies sont moins efficaces que d'autres dépendamment de la nature du sol et du climat de la région d'étude.

Le Mali est situé à l'ouest de l'Afrique avec une superficie d'environ 1,240 million km<sup>2</sup>. Soixante pour cent du territoire se trouve dans une zone désertique (Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal, 2009). La géologie du Mali est restée la même au cours du temps. Le secondaire et le tertiaire présentent des formations gréseuses basées sur un socle granitique. Le quaternaire, quant à lui, est présent dans les régions désertiques du nord (Gourcy, 1994). Aussi, deux tiers du pays sont constitués par des formations sédimentaires. Trois couches géologiques se retrouvent, essentiellement, sur la rive gauche du fleuve Niger :

- Des argiles du crétacé (imperméables);
- Des grès dits du continental terminal qui forment une nappe continue facile à exploitée;
- Des dépôts quaternaires ne contenant pas d'eau (Bernardeau et *al.*, 2006).

Le socle granitique et les schistes forment la base de la plupart des zones habitées. Les eaux souterraines quant à elles sont empochées dans des fractures et ne se rechargent pas de façon importante (Bernardeau et *al.*, 2006).

D'une manière générale, trois types de couvertures pédologiques se retrouvent au Mali : celle composée de matériaux sableux, celle contenant des argiles gonflantes et la dernière caractérisée par du limon (Keita, 2003).

La couverture pédologique composée de matériaux sableux est caractérisée par de faibles quantités de colloïdes et une fertilité moins importante. Les éléments minéraux y sont insuffisants et l'agriculture tend à acidifier le sol. L'eau n'y est pas très bien retenue à cause d'une perméabilité importante et d'une énergie de rétention de l'eau assez faible (*Id*).

En ce qui concerne la couverture pédologique abondante en argiles gonflantes, elle a la spécificité d'avoir une pluviométrie en deçà de 800 mm/an. Le sol y est lourd et peu perméable. Le sol y est également très acide (*Id*).

Dans le secteur de Molodo, le bilan pluviométrique n'y est pas très favorable. En 2008, par exemple, il a plu pendant 42 jours pour un cumul de 490 mm (PASP, 2009a). Molodo est une zone rizicole possédant un cours d'eau et le site de stockage des pesticides est situé à une altitude de 284 m (PASP, 2009a). Les caractéristiques climatiques de 2007 sont compilées dans le tableau suivant :

Tableau 1.2 : Données climatiques de Molodo

Valeur	Vitesse du vent (m/s)	Pluviométrie (mm)	Humidité (%)	Température (°C)
Totale		547,3		
Moyenne	2,7	338,25	54	28,3
Extrême	5,4	129,2	97	36,3

Tiré de PASP (2009, p. 28)

Le secteur de Sévaré est caractérisé par des sols constitués de sables argileux recouvrant le substratum gréseux, situé à quelques mètres de profondeur. Peu de données sont disponibles pour ce secteur. Les données météorologiques ne sont donc pas compilées dans cette section.

Le secteur de Yélimané, quant à lui, est caractérisé par une pluviométrie très faible. Le sol y est toutefois utilisé à des fins agricoles. Le site contaminé est situé à une altitude de 109 m et à moins de 500 m des puits d'alimentation du village le plus proche (PASP, 2009a). Les caractéristiques climatiques y sont les suivants :

Tableau 1.3 : Données climatiques de Yélimané

Valeur	Vitesse Vent (m/s)	Pluviométrie (m/m)	Humidité (%)	Température (°C)
Totale		47,1		
Moyenne	2,8		31	29,2
Extrême			60	

Tiré de PASP (2009, p. 38)

Concernant les références à l'hydrogéologie, elles sont difficilement accessibles; de ce fait, peu d'informations sont disponibles.

### 1.5. Propriétés physico-chimiques des principaux contaminants

Les caractéristiques physico-chimiques influenceront, grandement, la technologie à choisir. Par exemple, les contaminants organiques, en fonction de leur persistance (si peu persistant dans l'environnement), seront facilement traités par des techniques biologiques que par des techniques physico-chimiques.

Les paramètres physico-chimiques de plusieurs contaminants des sols de Molodo, Sévaré et Yélimané sont résumés dans le tableau 1.4. Ils influenceront les technologies à sélectionner. De même, une brève description des principaux pesticides est présentée ci-dessous :

#### **Dièldrine**

Formule chimique :  $C_{12} H_8 C_{16} O$

Il a une faible mobilité et se fixe sur le sol où il persiste plus de sept ans. Cependant, dans les sols tropicaux, il disparaît très rapidement; 90 % peuvent être éliminés en 1 mois. Il peut être dégradé, par les micro-organismes, pour donner de la photodièldrine; par contre, il ne se volatilise qu'en faible quantité. Il n'est, pratiquement, pas lixivié à cause de sa faible solubilité dans l'eau et de sa grande adsorption dans le sol (FAO, 2009).

## **Fénitrothion**

Formule chimique :  $C_9 H_{12} NO_5 PS$

Il a une faible mobilité dans le sol et il se biodégrade, rapidement, en milieu anaérobie par rapport au milieu aérobie. Sa demi-vie dans le sol dépend beaucoup de la nature de ce dernier. Son hydrolyse est fonction du pH. Plus ce dernier est basique, mieux l'hydrolyse se fait. Le fénitrothion se dégrade en aminonitrophénol et en déméthyle aminofenitrothion. Il présente la capacité de s'adsorber sur les particules en suspension dans l'eau (FAO, 2009).

## **Fenthion**

Formule chimique :  $C_{10} H_{15} O_3$

Il est adsorbé par le sol et sa mobilité est très faible. Il peut être dégradé par photodégradation ou biodégradation dans l'eau ou le sol. Sa demi-vie moyenne est de 34 jours. Cependant, il peut persister dans le sol jusqu'à six semaines. Il se dégrade, rapidement, en milieu alcalin, mais n'a pas une volatilité considérable. Enfin, Il est stable en présence de lumière et peut être hydrolysé (FAO, 2009).

## **Malathion**

Formule chimique :  $C_{10} H_{19} O_6 PS_2$

Il est assez bien adsorbé dans le sol et sa mobilité est plus ou moins importante. Il peut être biodégradé et hydrolysé dans le sol. La biodégradation est définitive à un pH neutre contrairement à l'hydrolyse qui peut s'avérer lente. Les principaux produits de la biodégradation sont : le malathionbetamonoacide, le diéthyle malthe et le malaoxon. C'est un produit qui ne se volatilise pas beaucoup et son hydrolyse est possible à un pH supérieur à 7 ou inférieur à 5 (FAO, 2009).

## **Parathion**

Formule chimique :  $C_{10} H_{14} NO_5 PS$

Il est fortement adsorbé par le sol et a une faible mobilité. Il peut être dégradé soit de façon chimique ou biologique. La photodégradation est, également, possible. La



dégradation augmente avec le pH, c'est-à-dire qu'elle est très importante en milieu fortement alcalin. Il est capable de s'adsorber sur les particules en suspension dans l'eau et dans les dépôts sédimentaires. Le parathion se dégrade en p-nitrophénol et en acide diéthylthiophosphorique. Enfin, il est très stable à température ambiante (FAO, 2009).

Tableau 1.4 : Propriétés physico-chimiques des principaux pesticides

Propriétés		Point de fusion	Pression de vapeur	Densité	Dégradation	Solubilité	Mobilité	DJA	Concentrations tolérables		
Paramètres					DT <sub>50</sub> sol	S <sub>w</sub>	Log K <sub>oc</sub>		Pour la santé humaine		
									Contact direct avec le sol	Consommation de légumes	Consommation d'eau de boisson
Unités		°C	mPa	g/cm <sup>3</sup>	Ans/jours	mg/litre		mg/kg/ jour	mg/kg de matière sèche de sol	µg/litre	
Valeur	Dieldrine	177	0,4	1,75	>7 ans	0,1	3,87	0,0001	50	0,1	2
	Fénitrothion	N/A	0,15	1,32	4-54 jours	21	2,4-3,19	0,0005	2500	3	100
	Fenthion	7,5	4	1,25	34 jours	2	3,1	0,001	500	0,2	20
	Malathion	2,9	5,3	1,23	4-6 jours	145	3	0,02	10000	100	400
	Parathion	6	0,89	1,26	7 jours	11	3,5	0,005	2500	3	100

Conclusion	Dieldrine				Très légèrement dégradable	Légèrement soluble	Légèrement mobile				
	Fénitrothion				Facilement/ assez dégradable	Facilement soluble	Moyennement/ légèrement soluble				
	Fenthion				Assez dégradable	Modérément soluble	Légèrement mobile				
	Malathion				Facilement dégradable	Très soluble	Moyennement mobile				
	Parathion				Facilement dégradable	Facilement soluble	Légèrement mobile				

Modifié de FAO (2009, p. 111)

DT<sub>50</sub> représente la demi-vie du pesticide.

## 1.6. Critères de décontamination

Les normes et critères de décontamination dépendent, notamment, de l'usage qui sera fait des sols. La législation malienne ne prévoit aucune norme en matière de niveau de décontamination des pesticides (Sidibé, 2010), peu importe les usages. Par conséquent, afin d'évaluer, en fonction d'un usage, le seuil de décontamination à atteindre, les normes internationales seront suggérées. Les deux paliers de gouvernement au Canada ont fixé des critères de décontamination qui sont examinés ci-dessous.

Le Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement a émis des recommandations pour la qualité des sols et les eaux souterraines. Cependant, les critères pour les pesticides ne sont disponibles que pour l'eau potable. Ainsi, pour le chlorpyrifos le critère est fixé à 90 µg/L; 190 µg/L pour le malathion et 50 µg/L en ce qui concerne le parathion (Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement, 1991).

Au Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec (MDDEP), des critères de décontamination ont, également, été édictés. Ainsi, pour les pesticides tels que le tébuthiuron, les critères génériques concernant les sols sont : pour le niveau B de décontamination, 50 mg/kg et 3600 mg/kg de matière sèche, pour le niveau C (MDDEP, 2002b).

Le tableau suivant résume les critères acceptables pour les eaux souterraines recommandés par le MDDEP:

Tableau 1.5 : Grille des critères applicables aux cas de contamination aux pesticides des eaux souterraines

Pesticides	Limites analytiques (µg/L)	Critères d'eau souterraine (µg/L)	
		Aux fins de consommation	Résurgence dans les eaux de surface ou infiltration dans les égouts
Chlorpyrifos	0,1	90	0,083
Malathion	0,08	190	10
Parathion	0,2	50	0,065
Dièldrine	0,03	-	0,014

Modifié de MDDEP (2002)

En ce qui concerne les sols, trois niveaux de contamination sont utilisés, soit les critères A, B et C. La définition des critères A, B et C est donnée par le ministère :

"Niveau A : Teneurs de fond pour les paramètres inorganiques et limite de quantification pour les paramètres organiques" (MDDEP, 2002c).

"Niveau B : Limite maximale acceptable pour des terrains à vocation résidentielle, récréative et institutionnelle et commerciale situés dans un secteur résidentiel." (MDDEP, 2002c).

"Niveau C : Limite maximale acceptable pour des terrains à vocation commerciale, non situés dans un secteur résidentiel, et pour des terrains à usage industriel" (MDDEP, 2002c).

Les critères n'étant pas disponibles pour tous les pesticides à l'étude et pour les sols tant au niveau provincial que fédéral au Canada, la décision a été prise de considérer les critères néerlandais dont, par ailleurs, le Québec s'est beaucoup inspiré lors de l'établissement de ses propres critères. Ainsi, le critère des pesticides totaux sera

considéré; c'est-à-dire que, pour un échantillon donné, la somme des concentrations de tous les pesticides ne doit pas dépasser la valeur du critère après traitement. Le tableau suivant résume les critères, à ne pas dépasser pour les sols et les eaux souterraines, édictés par le ministère de l'environnement néerlandais.

Tableau 1.6 : Critères de décontamination des pesticides pour les sols et les eaux souterraines

Contaminants	Sol (mg/kg de matière sèche)			Eau souterraine (µg/L)		
	A	B	C	A	B	C
Pesticides totaux	0,1	2	20	0,1	1	5

Modifié de VROM (1994, p. 1)

Les niveaux A, B et C correspondent aux définitions du MDDEP citées plus haut.

Le choix du critère à considérer dépend de la vocation du secteur à décontaminer. L'étude de la disponibilité des services d'utilités publiques, dans la section 1.3, montre que les zones contaminées se situent à proximité d'habitations ou de lieux autour desquels des activités humaines sont présentes. Ainsi, le critère le plus approprié qui sera recommandé sera le critère B concernant le zonage à vocation résidentielle.

## 1.7. Étendue de la contamination dans les zones d'étude

En 2007, la FAO a commandé des analyses de laboratoire afin de déterminer les concentrations des pesticides au niveau des zones de Molodo, Sévaré et Yélimané. Les résultats sont regroupés dans les annexes 2 à 4. Les sections suivantes indiquent les profondeurs pour lesquelles la contamination dépasse le critère B.

### 1.7.1. Zone de Modolo

Dans la zone de Molodo, plusieurs points de prélèvements d'échantillons ont été étudiés à des distances différentes et des profondeurs diverses. L'analyse du point de prélèvement 1, situé à une distance de 21 m du dépôt des pesticides, a montré qu'à une profondeur de 252 cm, le total des concentrations des pesticides ne dépasse pas le critère

de 2 mg/kg de pesticides totaux. Cependant, à une profondeur de 10 cm, les concentrations de dièldrine et de malathion dépassent ce seuil. En effet, la concentration de dièldrine s'établit à 24 mg/kg et celle de malathion est mesurée à 60 mg/kg. Une étape supplémentaire permettrait de vérifier si la pollution à migrer entre les profondeurs de 10 cm et 252 cm.

Les analyses du point de prélèvement 2 ont montré que la somme des concentrations de tous les pesticides détectés ne dépasse pas le critère de pesticides totaux (2 mg/kg de matière sèche) à une profondeur de 320 cm. La décontamination, pour ce point, n'est donc pas nécessaire. Toutefois, la concentration de dièldrine s'établit à 3,5 mg/kg à 10 cm, en dessous de la surface du sol. La contamination semble donc se situer en surface.

Concernant le point de prélèvement 3, la somme des concentrations de tous pesticides dépasse le critère de pesticides totaux jusqu'à une profondeur de 240 cm. Néanmoins, la contamination, au-delà de cette profondeur, n'est pas caractérisée. Les pesticides les plus importants détectés sont : le fénitrothion, le dieldrine, le parathion éthyle et le fenvalerate.

#### **1.7.2. Zone de Sévaré**

Dans la zone de Sévaré, les analyses de tous les points de prélèvements ont montré que la contamination ne dépasse pas le critère de pesticides totaux, à l'exception du point de prélèvement 1. Pour ce dernier, la concentration du fenthion a été mesurée à 2,1 mg/kg, dépassant ainsi le critère B. Des analyses, à des profondeurs plus élevées, devraient permettre de confirmer que la contamination ne s'étend pas au-delà des zones de prélèvement. Les analyses réalisées hors site, quant à elles, indiquent un dépassement du critère de décontamination de pesticides totaux. En effet, les concentrations de chlorpyrifos, de phenthoate et fenvalerate sont respectivement de 514 mg/kg; 22,5 mg/kg et 546 mg/kg. Ces concentrations ont été détectées à la surface du sol.

#### **1.7.3. Zone de Yélimané**

Dans la zone de Yélimané, les quantités de pesticides ne dépassent pas les critères de décontamination, pour les points de prélèvements 3; 4; 5 et 6. En ce qui concerne le point de prélèvement 1, un dépassement de la concentration des pesticides totaux admissibles a été noté, à une profondeur de 188 cm. Les profondeurs, comprises entre 10 cm et

188 cm, ne connaissent pas, quant à elles, de dépassement du critère. Il se peut qu'à cet endroit la contamination ait migré.

Pour le point de prélèvement 2, le critère B n'est dépassé qu'à une profondeur de 210 cm. Il faut, toutefois, remarquer que le point de prélèvement 2 a été réalisé hors site. Ce qui augure aussi une migration de la contamination. À la profondeur de 10 cm, la concentration de cyhalothrine a été mesurée à 35 mg/kg. Cependant, les concentrations des autres pesticides ne dépassent pas les critères de pesticides totaux au-delà de 250 cm en dessous du sol. Cela laisse croire que la concentration de cyhalothrine pourrait être une anomalie. Des analyses supplémentaires devraient permettre de le confirmer.

Concernant le point de prélèvement 7, la concentration totale de tous les pesticides détectés dépasse le critère B, mais seulement à 10 cm en dessous du sol. À 20 cm de profondeur, le critère n'est pas atteint.



## **2. TECHNOLOGIES DE DÉCONTAMINATION APPLICABLES**

Les technologies de décontamination des sols contaminés peuvent être scindées en deux catégories : celles permettant un traitement *in situ* et *ex situ*.

Le traitement *in situ* permet de traiter les sols et les eaux souterraines sur place sans excavation (Office québécois de la langue française, 2010). Le traitement *ex situ*, quant à lui, est employé pour désigner le fait que le matériel contaminé est extrait de son milieu d'origine avant d'être traité sur le site même ou en dehors de celui-ci (Office québécois de la langue française, 2010).

### **2.1. Critères de sélection des technologies applicables**

Les technologies sont nombreuses et variées. Une première étape consiste donc à effectuer une revue de différentes technologies applicables, et de ne pas retenir celles qui semblent le moins convenir au cas à l'étude. Cette démarche s'est faite en mettant en place les premiers critères de sélection. Les technologies qui ont été choisies de prime abord l'ont donc été en fonction de leur domaine d'application, de leur coût et de leur efficacité technique. Après une recherche poussée et une revue des technologies de décontamination des sols contaminés aux pesticides, neuf d'entre elles s'avèrent correspondre aux besoins du Mali. Elles sont décrites dans la section 2.2. La durée a, également, été un critère de sélection afin de ne pas choisir des technologies qui prennent beaucoup trop de temps avant la fin du traitement complet.

### **2.2. Description des technologies applicables**

Les technologies applicables sont décrites dans cette section, de même que les expériences déjà réalisées montrant leur efficacité pour le cas à l'étude. Les conditions des expériences seront précisées afin de trouver une corrélation avec le cas du Mali. Les liens, qui seront faits, seront fonction soit du pesticide soit du matériau utilisé pour réaliser l'expérience.

#### **2.2.1. Le champignon de la pourriture blanche**

La technologie du champignon de la pourriture blanche est une technique de traitement utilisant des enzymes extracellulaires pour dégrader certains contaminants organiques. Les enzymes en question, les ligninases ou les peroxydases sont produites par le

champignon de la pourriture blanche (*Phanerochaete chrysosporium*) sous certaines conditions, notamment en milieu aéré (Turgeon et *al.*, 2008b).

Le traitement est similaire au compostage et consiste à introduire dans les sols le champignon de la pourriture blanche et un substrat adéquat tel que des copeaux de bois (Center for Public Environmental Oversight, 2002d). Le champignon synthétise et secrète alors la peroxydase : 3,4-dymethoxybenzyl alcool. Le radical libre cationique partiellement oxydé peut, à son tour, oxyder d'autres éléments chimiques qui ne sont pas directement oxydés par les enzymes (Aust et Benson, 1998).

Le champignon de la pourriture blanche dégrade sans discrimination tous les éléments chimiques de mélanges complexes. Dans certains cas, ceci est dû à la non-spécificité de l'enzyme sécrété; dans d'autres cas, ce sont les différents mécanismes que le champignon utilise pour dégrader les éléments chimiques qui jouent un rôle important (Aust et Benson, 1998). Dans tous les cas, la technique requiert d'optimiser certains paramètres pour qu'elle soit efficace : la concentration en azote et en oxygène, la température, le pH et l'humidité (Center for Public Environmental Oversight, 2002d).

Cette technique a été employée pour éliminer des pesticides organophosphorés comme ceux présents dans les sols du Mali, le malathion, le fenthion, le parathion. Plusieurs souches de champignon ont fait l'objet d'une expérience pour évaluer le taux de dégradation du parathion. Sur un ensemble de 17 souches, seul le *Ganoderma applanatum* 8168 n'a pas pu dégrader le parathion en 96 h d'incubation. Trois champignons, le *Bjerkandera adusta* 8258, le *Pleurotus ostreatus* 7989 et le *Phanerochaete chrysosporium* 3641 ont eu une plus grande activité que les autres et ont réussi à dégrader 50 à 96 % d'autres pesticides organophosphorés comme le terbufos, l'azinphos-methyl et le phosmet. Toutefois, les conditions dans lesquelles ces résultats ont été obtenus sont celles de laboratoire où tout est contrôlé, ce qui n'est pas toujours le cas dans la pratique. Les champignons ont été cultivés en milieu universitaire (*University of Alberta Mold Herbarium* à Edmonton) et leur incubation s'est faite à 28 °C pendant quatre jours. Néanmoins, les résultats sont encourageants (Jauregui et *al.*, 2003).

Les souches de trois champignons, le YK514, le YK543 et le YK234 ont, également, servi à dégrader le dièldrine, un pesticide présent dans les sols du Mali. En 14 jours, les pourcentages suivants de pesticide ont été éliminés : respectivement 15,3 %; 23,9 %; 11,7 % grâce aux trois souches de champignon. En 28 jours, ce taux de dégradation a

continué à augmenter. Cependant, le taux de dégradation du dièldrine diminue avec le temps. Le dièldrine qui a servi à l'expérience provenait de l'Allemagne et les champignons ont été incubés soit à 25 °C ou à 30 °C (Kamei et *al.*, 2010).

De même, le malathion a été dégradé et minéralisé par treize espèces de champignons. L'expérience a été effectuée avec des pesticides généralement utilisés en l'Égypte, pays qui fait partie des donateurs de pesticides au Mali en 2004. Le sol employé en est un de type argileux (une partie des sols du Mali est de type argileux) qui a été séché à l'air. Par la suite, le malathion y a été ajouté à un taux de 10; 50 et 100 ppm. Les champignons, quant à eux, ont été incubés à 28 °C pendant sept jours, puis comptés et identifiés. Les résultats montrent que pour un taux de 10 ppm de malathion ajouté, une moyenne de 54 %; 46,3 % et 40,3 % du pesticide a été minéralisé respectivement par les espèces suivantes : le *A. terreus*, le *P. brevicompactum* et le *T. harzianum* (Omar, 1998).

Les expériences, citées plus haut, sont encourageantes puisqu'elles indiquent que les pesticides organophosphorés et organochlorés sont potentiellement dégradables par le champignon de la pourriture blanche. Ce sont ces types de pesticides qui ont contaminé les sols du Mali.

### **2.2.2. Le lavage des sols ex situ**

Le lavage des sols consiste à extraire les contaminants, grâce à un solvant approprié, avant de les mettre en suspension. Les sols sont d'abord excavés puis séparés en fonction de la taille des particules. Par la suite, les contaminants sont concentrés avant d'être solubilisés par une solution aqueuse. Enfin, le solvant est récupéré par une autre méthode d'extraction solide-liquide. Le processus se termine par un retour des sols dans leur lieu d'origine ou vers un site d'enfouissement. Au cours de l'opération, les contaminants ne sont pas détruits mais seulement solubilisés; leur élimination nécessite donc une autre étape (Thibodeau et *al.*, 2009).

La solution aqueuse peut contenir un agent de lixiviation, un surfactant, un chélateur ou un correcteur de pH. La séparation des particules en fonction de leur taille part du principe que la plupart des contaminants organiques, tels que les pesticides, tendent à s'adsorber plus sur le limon et l'argile, soit de façon chimique ou physique. Le matériau séparé est alors plus petit en volume et aisément traitable (FRTR, 2002c).

Le lavage des sols contaminés au parathion a été étudié avec une gamme de concentrations de ce dernier. L'expérience s'est aussi déroulée avec des échantillons de sols caractérisés par des fractions organiques diverses. Les résultats ont montré que le lavage dépend plus du surfactant ajouté à la solution de lavage que de la fraction organique du sol. Ainsi, 90 % du parathion a pu être lavé quand son dosage est cinq fois inférieur à sa solubilité limite dans l'eau. Le sol utilisé pour l'expérience dont la composition est inconnue provient de Hong Kong et la pureté du parathion était de 99 %. Le surfactant employé est le Brij 35 (23-polyoxyethylene lauryl alcool) et le solvant était de l'acétone (Chu et *al.*, 2006).

Un organochloré, le DDT, a aussi fait l'objet d'un lavage en laboratoire. En effet, les échantillons de sols contaminés au DDT ont réussi à être lavés avec une solution de détergent non-ionique (un mélange de Igepal ICO-630 et de Triton X-11) de 3 et 5 %. Les résultats ont montré qu'après deux heures de lavage avec la solution à 5 % et trois heures de lavage avec la solution à 3 % pratiquement tout le DDT a été extrait du sol. La température à laquelle le DDT ne se dissout plus dans la solution de détergent a été notée à 35 °C (Evdokimov et Von Wandruszka, 1998).

Ces deux expériences montrent qu'effectivement les pesticides organochlorés et les pesticides organophosphorés pourraient être extraits des sols par la méthode du lavage.

### **2.2.3. Bioaugmentation in situ**

La biodégradation naturelle des contaminants est un processus qui peut s'avérer lent. La bioaugmentation peut être envisagée comme un moyen d'augmenter la vitesse de dégradation. La technologie consiste à inoculer des microorganismes habitués au milieu dans le sol ou l'eau souterraine. L'objectif est d'augmenter la population bactérienne présente dans le sol ou de la remplacer, afin d'accroître la biodégradabilité des contaminants. La technologie peut s'opérer aussi bien en condition anaérobie qu'en présence d'oxygène (Turgeon et *al.*, 2008a). Deux méthodes sont utilisées pour introduire les microorganismes dans le sol ou l'eau souterraine, en fonction de la profondeur de la contamination. Lorsque celle-ci est en surface, la vaporisation est utilisée pour introduire la population bactérienne. Cependant, les puits d'injection seront préférables si la contamination est plus profonde. Dans le cas à l'étude, la vaporisation sera conseillée puisque la contamination ne semble pas profonde comme le montrent les analyses

effectuées (voir les annexes 2 à 4). Les microorganismes sont préparés en laboratoires et choisis pour leur capacité à dégrader les contaminants (Turgeon et *al.*, 2008a).

La technologie a déjà été employée pour traiter les sols et les eaux souterraines contaminés à l'atrazine (Lima, D. et *al.*, 2009), au 4-chloronitrobenzene (Niu, G. et *al.*, 2009), un produit intermédiaire de synthèse des pesticides, et le pentachlorophénol (PCP) (Dams et *al.*, 2007).

La technologie a permis de traiter la contamination à l'atrazine en utilisant la bactérie, *Pseudomonas sp.* (Souche ADP). En effet, une seule inoculation de  $9 \times 10^7$  cellules par gramme de sol a permis de se débarrasser, en huit jours, de 99 % de l'atrazine avec une concentration initiale de 7,2 µg/g de sol. Dans ce cas, la dose d'atrazine était de vingt fois supérieure à la dose recommandée. Le type de sol sur lequel l'expérience a été effectuée est un sol du centre du Portugal avec les compositions suivantes : 62,4 % de sable, 21,2 % de limon, 16,4 % d'argile (Lima, D. et *al.*, 2009). La majorité du sol est sableux donc assez comparable aux sols du Mali.

De même, le pentachlorophénol a été dégradé par le *Sphingobium Chlorophenolicum* en employant une technique de bioaugmentation. En sept jours, celui-ci a réussi à dégrader 16 mg/l de PCP des 20 mg/l initiaux. Par contre, ce taux ne change pas à une concentration initiale de 30 mg/l. La pureté du PCP, utilisée pour l'expérience, était de 99 % alors que le sol provenait du nord de l'Écosse avec les caractéristiques suivantes : pH= 6,58; 2 % de carbone et 0,1 % d'azote (Dams et *al.*, 2007).

La bioaugmentation permet donc d'éliminer les pesticides des sols.

#### **2.2.4. Phytoremédiation**

La phytoremédiation est une technologie de traitement employant des plantes dans le but d'éliminer les contaminants contenus dans les sols et les eaux souterraines. Le principe de la phytoremédiation consiste en la production par les racines des plantes de composés capables de favoriser le développement de microorganismes responsables de la biodégradation de contaminants, c'est la rhizodégradation. En effet, les racines des plantes en croissant permettent une aération des sols de par les interstices qu'ils y créent (Turgeon et *al.*, 2008d).

Un autre mécanisme consiste en l'absorption des contaminants par les racines puis en les rejetant vers l'atmosphère, par les feuilles, par transpiration, il s'agit de la phytovolatilisation (Center for Public Environmental Oversight, 2002c). Lorsque les enzymes sécrétés par la plante métabolisent les contaminants qui sont ensuite détruits dans ses tissus, il s'agit de la phytodégradation (FRTR, 2002b).

La technique de phytoremédiation a déjà été employée au Kazakhstan pour décontaminer les sols contenant des pesticides obsolètes, des organochlorés tels que le DDT et le DDE. Les résultats ont montré que les pesticides pouvaient s'accumuler dans les racines des plantes et que ce phénomène dépend, principalement, de l'espèce de la plante et de la concentration de pesticides initiale. L'expérience au Kazakhstan a montré que quatre espèces de plantes pouvaient accumuler le DDT et HCH jusqu'à 400 fois la quantité maximale qu'une plante pouvait absorber. Ces plantes sont composées de : l'*Artemisia annua L.*, le *Kochia sieversiana*, le *Mey. Kochia scoparia L.* et le *Xanthium strumarium L.* (Nurzhanova et al., 2009).

De même, la technique a servi à éliminer le chlorpyrifos en employant l'ivraie (*Lolium L.*). Les microorganismes vivants autour de la rhizosphère ont permis de dégrader, en sept jours, la quasi-totalité du pesticide dont la concentration initiale était de 10 mg/kg. Le sol, qui a servi à l'expérience, provient de Mumbai. Ses caractéristiques sont les suivantes : pH = 7,4; carbone = 1,3 %; azote = 0,24 %; phosphore = 0,039 %; potassium = 25 mg/kg (Korade et Fulekar, 2009).

### **2.2.5. Oxydation chimique**

L'oxydation chimique consiste à injecter un oxydant dans les sols ou les eaux souterraines contaminés. Elle peut s'effectuer *ex situ*. Les oxydants les plus souvent utilisés sont : l'ozone (O<sub>3</sub>), le permanganate (KMnO<sub>4</sub>) et le peroxyde d'hydrogène (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), le réactif de fenton, qui est un mélange de peroxyde d'hydrogène et d'un métal (le fer par exemple) catalyseur (Center for Public Environmental Oversight, 2002a).

#### **Oxydation par l'ozone**

L'oxydation par l'ozone, quand elle, est effectuée *ex situ*, il est donc nécessaire d'excaver les sols. L'ozone est mis en contact avec le sol contenant les contaminants qui sont ainsi

minéralisés. La réaction produit de l'eau et du CO<sub>2</sub>. La réaction d'oxydation est relativement rapide et l'ozone doit être à l'état gazeux (Bathalon et *al.*, 2009b).

L'ozonation combinée du malathion et du chlorpyrifos a déjà été testée au laboratoire et les résultats observés sont assez probants. Cependant, les particules des deux pesticides ont été générées en employant une méthode de nucléation homogène. Ces conditions sont donc assez particulières. Toutefois, l'expérience montre qu'il est possible d'oxyder les pesticides organophosphorés par l'ozone dans les conditions atmosphériques (Meng et *al.*, 2010).

Un mélange de pesticides, l'alachlor, l'atrazine, le chlorfenvinphos, le diuron et l'isoproturon, contenus dans une solution aqueuse, a également pu être oxydé par ozonation. Les résultats montrent qu'il est difficile d'obtenir une dégradation totale. Toutefois, couplé à un autre traitement biologique, le rendement peut être amélioré (Maldonado et *al.*, 2006).

D'autres pesticides organophosphorés ont également subi une ozonation et ont réussi à être oxydés. Ce sont : le diazinon, le méthyl parathion et le parathion. Le diazinon a facilement été dégradé. En augmentant le pH, sa dégradation s'accroît contrairement au méthyl parathion et au parathion qui eux ne voient pas leur dégradation changée (Wu et *al.*, 2009).

Même si toutes les expériences ont été effectuées dans des laboratoires, avec des conditions opératoires variées, il n'en demeure pas moins que la dégradation des pesticides est possible par ozonation.

### **Oxydation par le permanganate**

La vitesse de réaction du permanganate est, relativement, moins importante que dans les cas du peroxyde et de l'ozone. De même, son pouvoir oxydant est moins élevé. Cependant, son utilisation est plus fréquente, pour décontaminer les sols, à cause de sa persistance et de sa stabilité qui accroît considérablement son efficacité et son action. La réaction d'oxydation dépend, grandement, du pH du milieu, mais son efficacité est démontrée entre 3,5 et 12 (Bathalon et *al.*, 2009a).

## Oxydation par le peroxyde

L'oxydation par le peroxyde peut se réaliser, comme pour les autres types d'oxydation, *ex situ*. Le potentiel redox du peroxyde peut s'avérer, quelques fois, insuffisant pour détruire les contaminants, le recours au réactif de fenton devient alors bénéfique puisque celui augmente son potentiel d'oxydation lorsqu'il est couplé à un métal comme le fer sous forme  $\text{Fe}^{2+}$ . L'oxydation est plus efficace en milieu acide qu'en milieu alcalin (Delisle et *al.*, 2009).

La technique d'oxydation a été employée pour éliminer le triazophos, un pesticide organophosphoré, des eaux résiduelles. Le réactif qui a été utilisé est celui de fenton. Le triazophos provient des eaux résiduelles d'une industrie fabriquant des pesticides. L'échantillon, qui a servi à effectuer l'expérience, contenait une concentration de 0,06 % en poids de pesticide. Après 90 minutes d'agitation et sous un pH optimal de 4, l'oxydant, une solution de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  et de  $\text{H}_2\text{O}_2$  à 30 %, a réussi à transformer 96,3 % de l'organophosphoré (Li et *al.*, 2009).

Le méthyl parathion a, également, été oxydé grâce au réactif de fenton en présence de lumière (rayon ultra-violet d'une longueur d'onde allant de 300 à 400 nm). En cinq minutes de réaction, la formation de  $\text{HNO}_3$  et de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , résultant de l'oxydation du pesticide, a pu être observée et celle de  $\text{H}_3\text{PO}_4$  en 30 minutes. La concentration initiale du méthyl parathion était comprise entre 1 et  $2 \cdot 10^{-4}$  M alors que celle de  $\text{H}_2\text{O}_2$  représentant l'oxydant ( $\text{Fe}^{3+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ ) était de  $10^{-2}$  M (Pignatello et Sun, 1995). Les résultats suggèrent que les pesticides dilués dans de l'eau peuvent être oxydés par le réactif de fenton. Cela laisse penser que les organophosphorés, présents dans les sols du Mali, peuvent être éliminés par cette technique.

### 2.2.6. La désorption thermique à haute température

La technique de la désorption thermique *ex situ* requiert une excavation des sols avant toute opération. Ils sont ensuite acheminés vers les réacteurs afin d'être traités. Deux types de réacteurs sont généralement utilisés : le four rotatif et la vis thermique. Dans le premier cas, il s'agit d'un cylindre horizontal pouvant être chauffé directement ou indirectement. Dans le second cas, un convoyeur muni d'une vis sans fin transporte les sols contaminés vers la chambre de combustion. Dans les deux cas, les fluides servant à



assurer l'échange de chaleur avec les sols contaminés peuvent être soit de l'huile chaude ou de la vapeur (FRTR, 2002d).

La désorption thermique à haute température consiste à faire passer à l'état gazeux l'eau et les contaminants contenus dans les sols. Pendant cette opération la température peut atteindre entre 315 °C et 540 °C. Plus la température augmente plus la capacité à faire volatiliser les contaminants devient importante. La température de chauffage dépend de la nature des contaminants contenus dans les sols, mais également de leur concentration, de la teneur en eau des sols, enfin du type de sols à traiter (Environnement Canada, 2002a).

Les gaz provenant de la combustion et qui renferment les contaminants sont ensuite refroidis par de l'eau et neutralisés à l'aide de chaux hydratée et de charbon actif (Récupère Sol, 2010).

La décontamination de sols contenant notamment des pesticides, le lindane, le DDT, le DDE et le DDD par cette technique a été étudiée. Un four rotatif pilote d'une puissance de 130 kw a été utilisé pour l'étude. Les sols sur lesquels l'expérience a été menée sont des sols argileux secs ou humides contenant 5 et 9 % d'eau en poids. Avec une vitesse de rotation de 1 rpm, le DDE ne pouvait plus être détecté après 2700 s. Après 30 minutes, les pesticides étaient traités au critère désiré. Cependant, le sol était homogénéisé et tamisé à moins de 6 mm de diamètre (Silcox et *al.*, 1995). Ce qui peut être considéré comme étant des conditions idéales. Toutefois, le caractère argileux des sols qui ont servi à l'expérience laisse penser que la technique serait appropriée pour le Mali.

### **2.2.7. L'épandage contrôlé ou landfarming**

L'épandage contrôlé est une technique de biodégradation souvent utilisée à petite échelle. Toutefois, il devient très intéressant d'employer cette méthode s'il existe de grandes surfaces où l'épandage peut s'effectuer (CEDRE, 2007). La technique consiste à excaver les sols contaminés et à les mélanger à des amendements de sols avant de les étaler sur les terres de destination. En fonction de la profondeur des eaux souterraines et de la nature des sols, il peut être nécessaire de recourir à une membrane afin de contrôler l'humidité et le ruissellement éventuel de l'eau. De plus, le sol est régulièrement aéré pour favoriser la croissance des bactéries qui permettront la dégradation des contaminants (Turgeon et *al.*, 2008c).

L'efficacité et la durée du traitement dépendent de l'aération du sol, de son humidité, de la quantité de nutriments disponibles pour les bactéries, de l'activité microbienne et de la température (CEDRE, 2007). Les sols contaminés sont en général épandus sur de minces couches pouvant aller jusqu'à 46 cm d'épaisseur. Quand le niveau de traitement désiré est atteint, la couche est alors remplacée par une nouvelle. Dans certains cas, seul le haut de la couche est enlevé et remplacé par de nouveaux sols contaminés dans le but de maintenir l'activité microbiologique (FRTR, 2002a).

Un sol hautement contaminé (> 5000 mg/kg) par le HCH, un isomère dérivé du lindane a été décontaminé grâce à cette technique. En effet, la concentration des isomères  $\alpha$  et  $\gamma$  du HCH a baissé respectivement de 89 et 82 %, après 11 mois d'expérience. Toutefois, la concentration de l'isomère  $\beta$  n'a pas changé pendant cette période. Les principaux paramètres qui ont affecté le traitement sont : l'humidité, la température, la distribution et la taille des agrégats de HCH. Pour favoriser la décontamination, une opération physique visant à diminuer la taille de ces agrégats serait nécessaire, en plus d'être dans des conditions aérobies. L'expérience s'est déroulée, au nord-ouest de l'Espagne, avec un sol humide présentant un horizon d'altération, caractérisé par un gradient de teneur en argile décroissant de haut en bas (Rubinos et *al.*, 2006).

Il faut toutefois mentionner qu'à moins d'avoir les équipements sur place il peut être très coûteux d'importer cette technologie dans un pays.

#### **2.2.8. Bioréacteur**

La technique est utilisée pour traiter *ex situ* les sols contaminés et les eaux souterraines. Concernant les sols contaminés, ils sont d'abord excavés avant d'être mélangés à de l'eau. Un brassage est ensuite effectué pour maintenir les matières solides en suspension et permettre ainsi un bon contact avec les microorganismes. Deux procédés sont le plus souvent utilisés : le système de culture libre et le système à biomasse fixe. Dans le premier cas, la solution aqueuse formée d'eau et de sols contaminés passe par des boues activées qui favorisent la croissance microbienne et par suite la dégradation des contaminants. Dans le second cas, la population microbienne est cultivée à la surface d'une matrice solide inerte (Bonnet et Juck, 2008).

L'emploi de cette technique pour éliminer le PCP d'une eau résiduelle, avec une demande chimique en oxygène (DCO) de 600 mg/l, a montré beaucoup de succès. Le réacteur

employé en est un de type membranaire. Après 12 h de temps de rétention, 99 % du PCP a pu être éliminé de même que 95 % de la DCO. L'expérience a pu démontrer que la performance atteinte dépendait de la concentration de biomasse dans le bioréacteur, mais également de la biosorption du pesticide. La capacité de sorption atteinte, dans ce cas, était de 1,63 mg de PCP par g de biomasse. Enfin, la membrane utilisée dans le réacteur était à base de polyéthylène (Visvanathan et *al.*, 2005).

Pour être applicables au cas du Mali, les sols contaminés doivent donc être excavés et mélangés à de l'eau pour former une solution aqueuse, avant d'être introduits dans le bioréacteur.

### **2.2.9. Incinération**

L'incinération est une technique de décontamination employant des températures très élevées pouvant aller de 870 à 1200 °C. Il s'agit d'une méthode *ex situ* qui requiert une excavation des sols. Une unité peut, néanmoins, être installée sur le site à décontaminer. Une particularité de cette technique réside dans le fait que plusieurs contaminants sont traités en même temps. La technique nécessite cependant que les rejets gazeux soient récupérés et les gaz acides éliminés (Center for Public Environmental Oversight, 2002b).

Quatre méthodes d'incinération sont possibles : le réacteur à lit fluidisé, le combusteur à lit circulant, l'incinération à infra rouge et le four rotatif (Thibodeau et *al.*, 2008). Dans tous les cas, la température est un moyen de faire volatiliser les contaminants. Le taux d'élimination dépend d'un réacteur à un autre, mais le rendement avoisine les 99,99 %. La technique est très efficace pour les pesticides (Environnement Canada, 2002b).

Toutefois, il est nécessaire d'avoir les équipements sur place autrement l'opération peut s'avérer très coûteuse, s'il faut importer la technologie dans un pays.

### 2.3. Durée, coût, avantages et inconvénients des technologies applicables

Le tableau qui suit résume les coûts, la durée de traitement, les avantages ainsi que les inconvénients liés aux différentes technologies applicables. Il servira ainsi de comparatif. Le coût est estimé en dollars américains.

Tableau 2.1 : Tableau de comparaison des technologies

Technologies	Durée de traitement (an) (CNRC, 2009)	Coût de traitement (\$/m <sup>3</sup> ) (FRTR, 2007b)	Avantages	Inconvénients
Le champignon de la pourriture blanche	1 à 3	98	La technologie peut se faire en <i>in situ</i> comme en <i>ex situ</i> , les produits secondaires sont généralement biodégradables, aucun traitement secondaire des sols n'est nécessaire, le coût de la technologie est relativement compétitif (Clyde Engineering Service, 2010)	Les concentrations élevées de contaminants peuvent être toxiques pour le champignon; la croissance du champignon n'a pas été observée à des températures de moins de 10 °C; la compétition entre les populations bactériennes indigènes et l'adsorption peut diminuer l'efficacité; le brassage des sols peut nuire à la production d'enzymes par le champignon ; les champignons sont susceptibles au stress hydrique ; manque de connaissance sur la capacité du champignon à survivre en présence d'autres formes de champignon (Turgeon et al., 2008b)s.
Bioaugmen-	0,5 à 5	30 à 100	Le traitement des contaminants s'effectue <i>in situ</i> ; peu d'impact sur l'écosystème en surface des sols; production de déchets	Une injection homogène est difficile à obtenir; les microorganismes introduits sur le site peuvent ne pas

tation			limitée; technologie peu onéreuse comparée aux techniques <i>ex situ</i> (Wikipédia, 2010).	être adaptés à leur nouvel environnement; la technologie peut générer des métabolites; une concentration trop élevée en contaminants peut être toxique pour les microorganismes; le processus peut s'avérer lent (Turgeon et <i>al.</i> , 2008a).
Le lavage des sols	< 1	70 à 187	La technologie est transférable sur le site; elle peut être une solution définitive; la durée du traitement est assez courte (Environnement Canada, 2002d).	Les sols ne doivent contenir plus de 50 % de particules fines; l'installation d'unité de traitement nécessite beaucoup de place; la solution de lavage doit être disponible et en grande quantité; le solvant qui a servi à laver les sols peut y rester (Thibodeau et <i>al.</i> , 2009); les coûts peuvent être élevés (Environnement Canada, 2002d)
Oxydation chimique	1 à 3	190 à 660	Durée de traitement relativement courte; beaucoup de contaminants peuvent être traités par cette méthode; méthode sécuritaire (USEPA, 2004)	L'oxydation peut être incomplète; peu efficace si les concentrations de contaminants sont élevées (Environnement Canada, 2002d)
Phytorémédiation	> 5	147 à 626	Beaucoup moins coûteuse que les traitements traditionnels; les plantes peuvent être facilement contrôlées; méthode la moins destructrice de l'environnement initial des sols (Lesquel, 2009).	Lenteur de la méthode; surcoût dû au stockage de la biomasse contenant les produits dangereux; installation assez lourde (Turgeon et <i>al.</i> , 2008d)
La	< 1	110 à 252	Diversité de contaminants organiques traités; la technologie est transférable sur le site; peut	Émissions de particules et de COV possibles; les sols très humides sont

désorption thermique à haute température			constituer une solution permanente (Environnement Canada, 2002d).	difficiles à traiter; coûts très élevés (Environnement Canada, 2002a); les sols riches en argile et en limon font augmenter la durée de traitement; le sol traité peut ne plus supporter une activité microbienne (Thibodeau et Désilets, 2008)
L'épandage contrôlé ou landfarming	1 à 3	< 100	Les contaminants peuvent être transformés en substances non dangereuses; la technologie est relativement simple à mettre en œuvre, durée de traitement relativement courte; coût compétitif (USEPA, 1994)	Le climat rend difficile la maîtrise des conditions de décontamination; le rendement ne dépasse généralement pas 95 %; une forte concentration de contaminants peut être néfaste pour les microorganismes, nécessite de larges surfaces (Turgeon et al., 2008c)
Bioréacteur	3 à 5	5,5 à 44	Peut constituer une solution permanente; coûts peu élevés (Environnement Canada, 2002c)	Une concentration élevée de contaminants peut nuire les microorganismes; des microorganismes peuvent coloniser le bioréacteur et inhiber ceux responsables de la biodégradation des contaminants (Bonnet et Juck, 2008)
Incinération	< 1	914 à 1540	Un taux de destruction des contaminants de 99,9 % est atteint; peut traiter une vaste gamme de contaminants; peut constituer une solution permanente (Environnement Canada, 2002d); les petites unités peuvent être transportables (FRTR, 2007a)	Coûts élevés; émissions de gaz toxiques possibles; besoin de beaucoup d'énergie; la quantité qui peut être traitée en une seule fois est limitée; technologie peu acceptée socialement (FRTR, 2007a)

### **3. LA DÉCONTAMINATION VUE SOUS L'ANGLE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE**

L'analyse des différentes technologies représente une des plus importantes étapes de ce travail. Elle permettra, à l'aide d'une grille de développement durable, de proposer une technologie qui respecte l'environnement à un coût optimal et socialement acceptable par le public. Une grille spécifique aux sols contaminés sera établie, dans cette section, avec des critères d'analyse pertinents. Les forces et les faiblesses seront donc évaluées en fonction de différents paramètres d'analyse, pour aboutir à une recommandation quant au choix de la technologie appropriée.

#### **3.1. Pertinence d'une analyse sous l'angle du développement durable**

Le développement durable est devenu inéluctable et les approches durables plus pertinentes que jamais. Tout projet doit dorénavant être mis en œuvre en tenant compte de ce nouvel aspect. Les projets de décontamination des sols et des eaux souterraines ne dérogent pas à cela. La définition la plus connue du développement durable est celle de la Commission Brundtland : «un développement qui permet de répondre aux besoins de la génération actuelle sans remettre en cause la capacité des générations futures à répondre aux leurs.» (Wikisource, 2009)

Une technologie prenant en compte le développement durable a l'avantage de considérer ses effets sur l'environnement au début du processus de traitement et d'y introduire des options pour optimiser les gains en termes de qualité sur l'environnement. Chaque phase du traitement, de la sélection de la technologie à sa mise en œuvre doit être considérée lors de son choix (Dellens, 2007).

Cette vision de la décontamination permet d'améliorer l'empreinte écologique de la technologie choisie puisque le cycle de vie est inclus dans le processus. L'empreinte écologique d'une technologie dépend grandement du matériel utilisé, mais aussi de l'énergie consommée. De même, il inclut les libérations directes et indirectes de polluants, la consommation de produits de base, la production, la collecte et la mise à disposition de déchets éventuellement produits (Taysser, 2009).

Le but de la décontamination est de promouvoir la qualité de l'environnement, la santé humaine et la sécurité. Pour atteindre ces buts, beaucoup de technologies sont possibles, mais il faut également minimiser leurs impacts négatifs. Par exemple, en choisissant une

technologie beaucoup n'évaluent pas les impacts d'émissions de gaz de serre, les consommations de ressources minérales, ou l'utilisation d'énergie. La protection de la santé humaine et de l'environnement doit donc être présente lors de l'élaboration des critères de sélection des technologies (O'Neill, 2010).

En outre, ces critères incluront des analyses d'impacts sociaux et économiques, comme les analyses d'impacts entraînés par le bruit ou la pollution visuelle sur la communauté qui pourrait être atténuée par la considération d'opportunités pour l'emploi (Taysser, 2009).

En avril 2008, l'USEPA publiait un document intitulé : "*Green Remediation: Incorporating Sustainable Environmental Practices into Remediation of Contaminated Sites*". L'agence gouvernementale y définissait le terme de "*green remediation*", qui pourrait être traduit par la "réhabilitation verte", comme étant une démarche visant à prendre en compte tous les effets environnementaux et les options permettant d'optimiser les bénéfices escomptés d'une technologie de décontamination (Golder Associates Ltd., 2009). La réhabilitation verte s'appuie donc sur les mêmes principes du développement durable que les autres industries et les organismes gouvernementaux, et doit être intégrée au début de tout projet de décontamination. Parmi ces principes, figurent la conservation de l'eau, la gestion des déchets, l'amélioration de la qualité de l'air, etc. (Golder Associates Ltd., 2009).

Les changements climatiques étant d'une grande importance, l'USEPA a décidé de leur accorder un poids très important dans la notion de "*green remediation*" de même que l'efficacité énergétique. Le Mali étant un pays sujet à des problèmes d'énergie, ce concept sied bien à son contexte. Toutefois, les pôles social et économique ne seront pas défavorisés dans l'analyse de développement durable.

Les principes de la réhabilitation durable sur lesquels s'appuie cette analyse de développement durable sont ceux édictés par l'USEPA. Ce sont :

- a) L'optimisation des besoins énergétiques : la technologie ne doit pas être très énergivore; elle doit pouvoir utiliser une énergie renouvelable si cela est possible; elle doit également faire preuve d'efficacité énergétique.
- b) La minimisation des émissions atmosphériques : la technologie ne doit pas utiliser des machines qui consomment beaucoup d'énergie fossile; elle ne doit pas non



plus être la source d'émissions de beaucoup de gaz à effet de serre et de poussières.

- c) L'optimisation des besoins en eau : la technologie ne doit pas être consommatrice de beaucoup d'eau; elle doit permettre une réutilisation de l'eau soit dans le processus de décontamination ou à d'autres fins (irrigation par exemple).
- d) La minimisation des impacts sur les écosystèmes et les terres : la technologie ne doit pas perturber, outre mesure, les habitats naturels.
- e) L'optimisation de la consommation des matériaux et de la gestion des déchets : la technologie ne doit pas consommer beaucoup de matériaux ni ne doit générer beaucoup de déchets; le cas échéant, le recyclage doit être possible.
- f) La participation publique : elle permet une plus grande acceptabilité sociale du projet (USEPA, 2008).

### **3.2. Élaboration d'une grille de développement durable**

Une grille d'analyse de développement durable a été élaborée afin de comparer les nombreuses technologies applicables et dans le but principal d'en choisir la plus optimale. La grille développée, pour le cas à l'étude, est basée sur la grille de Villeneuve qui propose une pondération et une évaluation des performances de chaque technologie, et la boussole bernoise qui suggère de coter les critères en leur accordant une note allant dans le sens de leur libellé ou non. Les pondérations et les notations de la grille de Villeneuve ont été retenues afin de donner plus de poids à certains critères plutôt qu'à d'autres. De même, le format de présentation de la boussole bernoise a été conservé pour leur pertinence et leur aspect visuel remarquable. Enfin, les critères sont inspirés de la boussole bernoise, mais aussi ceux développés par Golder Associé, basés sur les principes de développement durable de l'USEPA. Ces critères ont été conçus spécialement pour les sols contaminés; ils sont donc adaptés à l'étude.

La démarche adoptée par la boussole bernoise consiste à définir des objectifs, évaluer des performances et en tirer des conclusions. Cette grille d'analyse de développement durable suisse a l'avantage d'évaluer les projets d'une manière uniforme et de les comparer globalement sous les trois aspects de l'environnement, de l'économie et de la société. Elle permet de prendre des décisions à tous les niveaux d'un projet :

- Un niveau stratégique à long terme
- Un niveau moyen de concept et de programme
- Un niveau de projet ou de réalisation (OCEE, 2008).

La boussole bernoise repose essentiellement sur les connaissances et appréciations de l'évaluateur du projet de façon claire et transparente. Les projets planifiés peuvent être évalués dans le sens :

- Bilan global de leurs effets sur le développement durable local ou régional;
- Être évalués de manière différenciée sur la base des points forts/faibles identifiés;
- Optimisés de façon ciblée en tenant compte des multiples aspects du développement durable (OCEE, 2008).

La grille de Villeneuve, quant à elle, propose un système de pondération de 1 à 5 et des évaluations allant de 0 % à 100 %. Leurs significations sont indiquées dans le tableau 3.1 et le tableau 3.2. L'objectif de la grille est d'évaluer un projet en fonction des pôles du développement durable. La pondération consiste à accorder une importance majeure ou mineure à un critère, afin de déterminer s'il est indispensable, tandis que l'évaluation de 0 à 100 % permet de déterminer la performance de la technologie par rapport au critère (Villeneuve, 2007).

Tableau 3.1 : Évaluation des critères de la grille

Note	Signification de la note
0	Répond très peu au critère
25	Répond peu au critère
50	Répond au critère
75	Répond assez bien au critère
100	Répond très bien au critère

Inspiré de Villeneuve (2007, p. 15).

Tableau 3.2 : Pondération des critères de la grille

Pondération	Interprétation
1	critère peu important
3	critère important
5	critère très important

Inspiré de Villeneuve (2007, p. 14).

La grille élaborée comprend 25 critères répartis dans les trois sphères du développement durable que sont les sphères environnementale, sociale et économique. Les critères sont pondérés de 1 à 5 et les technologies évaluées en fonction de leur conformité par rapport au critère. La figure 3.1 donne un aperçu de la grille. Pour le pôle environnement, la figure présente les critères : consommation d'eau, concentrations de substances polluantes dans l'eau souterraine et dans le sol. Ils ont été pondérés 5 à cause de leur importance dans le processus de décontamination; une explication plus détaillée sera fournie à la section

suivante. Ensuite, à droite du tableau, les technologies sont évaluées de 0 à 100 % en fonction du libellé du critère. Si la technologie va dans le sens du libellé du critère, alors il est évalué 75 ou 100 %; par contre, si elle va dans le sens contraire du libellé du critère, elle est alors évaluée 0 ou 25 %. Enfin, si la technologie ne présente aucun effet par rapport au libellé du critère, alors elle est évaluée à 50 %.

		Pondération	Donnée [x]					Donnée [x]				
			0	25	50	75	100	0	25	50	75	100
<b>ENVIRONNEMENT</b>												
<b>Gestion de l'eau</b>												
	Consommation en eau	5										
<b>Qualité de l'eau souterraine</b>												
	Concentrations de substances polluantes	5										
<b>Qualité du sol</b>												
	Concentrations de substances polluantes	5										

Figure 3.1 : Présentation de la grille

### 3.3. Élaboration de critères d'analyse

L'objectif de l'étude est de déterminer une technologie répondant aux principes du développement durable adaptés à la décontamination des sols tels que définis par l'USEPA. Ainsi, afin de mener à bien l'analyse des technologies envisageables pour traiter les sols et les eaux souterraines dans une optique de réhabilitation durable, les trois sphères du développement durable sont prises en compte. Les critères retenus sont présentés par pôle ci-dessous.

#### 3.3.1. Sphère environnementale

Les critères de la sphère environnementale sont présentés ci-dessous.

##### Moindre consommation d'eau.

L'eau est un bien précieux surtout dans les pays dits du sahel qui en manque beaucoup. La technologie doit donc être évaluée en terme de consommation de beaucoup d'eau. Ce facteur est très important surtout dans un pays comme le Mali. Ce critère sera donc pondéré 5.

### **Amélioration de la qualité de l'eau souterraine**

Le but du traitement est de décontaminer les sols, mais aussi les eaux souterraines s'il y a lieu. Les eaux souterraines peuvent être des sources d'eau potable pour les populations locales. La technologie choisie doit donc pouvoir décontaminer les eaux souterraines. Ce critère est très important. Il est donc pondéré 5.

### **Amélioration de la qualité du sol**

L'usage des sols au Mali tourne, en général, autour de l'agriculture et de l'habitation surtout dans les zones rurales. La décontamination devra permettre de redonner aux sols leur usage respectif. Le premier but de la technologie devra être de décontaminer les sols. Leur qualité doit respecter les critères de décontamination fixés. La technologie sera donc choisie afin de remplir cet objectif. Ce critère est très important, il est pondéré 5.

### **Diminution de la quantité des déchets**

La technologie choisie doit consommer le moins de matériaux possible et le cas échéant, les matériaux employés doivent pouvoir être recyclables ou réutilisables de même que les déchets générés lors du processus de décontamination. Cependant, puisqu'elle n'est pas un facteur qui influe sur la performance de décontamination, il sera pondéré 1. Il est donc jugé peu important.

### **Moindres impacts sur la faune et la flore**

La technologie ne doit pas perturber la faune et la flore du site. Elle doit respecter la biodiversité afin de préserver les espèces vulnérables d'autant que le Mali se situe sur une région sahélienne où la végétation peut parfois se faire rare. Cependant, il est considéré peu important puisqu'il n'influence pas la performance de la technologie. Sa pondération sera ainsi de 1.

### **Amélioration de la qualité de l'air**

Les changements climatiques font l'objet de beaucoup de discussion de nos jours. Aussi les émissions de gaz à effet de serre y contribuent pour une grande part. Trois critères ont été choisis pour ce qui a trait à la qualité de l'air : les émissions de poussières fines en suspension, les émissions de composés organiques volatils et les émissions de gaz à effet

de serre tels que le méthane et les CFC. La qualité de l'air est un facteur important pour les changements climatiques; mais elle n'est pas indispensable à la décontamination. Elle est donc pondérée 1.

### **Moindre consommation d'énergie**

La consommation d'énergie joue un rôle important dans le choix de la technologie puisqu'elle influence grandement son coût. Plus une technologie est énergivore plus elle risque de coûter cher. Dans un pays comme le Mali où l'énergie peut parfois poser problème et où les moyens sont limités, ce critère prend toute son importance. En outre, l'énergie disponible sur place est principalement de l'énergie fossile puisque le barrage de Manantali ne parvient pas à subvenir aux besoins du Mali en énergie. Deux types d'énergies sont à considérer ici, l'énergie utilisée par la technologie (énergie stationnaire), et celle utilisée pour les transports, cette dernière est comptabilisée pour le compte de l'excavation. La première est pondérée 5 alors que la seconde a un poids de 3.

### **3.3.2. Sphère économique**

Les critères de la sphère économique sont présentés ci-dessous.

#### **Création d'emploi**

Le but de la décontamination dans une optique de développement durable ne doit pas seulement se résumer à une remise en état des sols; elle doit également être bénéfique pour les zones concernées d'un point de vue économique. Le premier aspect économique auquel le processus de décontamination doit s'adresser concerne la création d'emploi. La technologie doit donc créer des emplois afin de mieux faire accepter socialement le projet de décontamination. Ce critère est important, il est donc pondéré 3.

#### **Moindre coût de la technologie**

Le choix de la technologie dépend considérablement, comme souligné plus haut, de son coût. Ce dernier est fonction de beaucoup de paramètres parmi lesquels les coûts liés aux infrastructures telles que la mobilisation de matériels adéquats pour effectuer le traitement; si la technologie n'est pas disponible et qu'il faut l'importer (réacteur, four, etc.), des coûts importants seront à considérer. Le second coût concerne la technologie en soi, c'est-à-dire

les coûts liés à son fonctionnement. Les deux critères sont pondérés 5 vu leur très grande importance.

### **Fiabilité de la technologie et durée de traitement**

La technologie choisie doit être fiable et assurer une bonne décontamination afin de rendre les sols leurs usages initiaux. Elle doit donc permettre une décontamination complète en fonction des critères de décontamination. La durée de traitement ne doit pas non plus être trop longue pour éviter d'importuner, indéfiniment, les populations environnantes. En outre, généralement plus le traitement est long plus il coûtera cher en main-d'œuvre et en équipements. Ces deux critères sont très importants, ils sont donc pondérés 5.

### **Retombée positive sur l'économie locale**

La technologie doit provoquer une certaine retombée économique dans les localités concernées, si possible. Ainsi, si des équipements doivent être achetés, le marché local doit être favorisé. Ce critère est important, il est donc pondéré 3.

### **Développement de nouvelles technologies**

Enfin, le dernier critère concerne le développement de nouvelles technologies. La technologie choisie doit permettre d'encourager la recherche et le développement dans son domaine. S'il s'agit, par exemple, d'une méthode biologique, la recherche devrait permettre de l'optimiser à long terme. Cependant, ce critère est peu important, étant donné que l'objectif n'est pas de développer une nouvelle technologie, mais plutôt de considérer l'application d'une technologie déjà disponible, il n'est pas indispensable au choix de la technologie, il est donc pondéré 1.

### **3.3.3. Sphère sociale**

Les critères de la sphère sociale sont présentés ci-dessous.

#### **Amélioration de la qualité du paysage**

La technologie choisie ne doit pas avoir d'impact négatif sur le paysage. L'excavation peut avoir des désavantages à ce niveau puisque pendant cette étape le paysage est complètement transformé. Elle peut être une source de rejet des populations locales. Ce

critère est important d'un point de vue social, mais n'influence pas beaucoup le choix de la technologie, il est donc pondéré 1.

### **Amélioration de la qualité de vie**

Une décontamination peut constituer un trouble du bon voisinage. La qualité de vie doit occuper une grande place dans le choix de la technologie. Ainsi, la pollution sonore engendrée par la technologie ainsi que la pollution olfactive doivent être réduites au maximum. Ces deux nuisances sont très importantes, elles sont donc pondérées 5.

### **Sécurité des populations et des travailleurs**

La sécurité doit être considérée à deux niveaux : la sécurité des travailleurs ainsi que celle des populations. La technologie ne doit pas causer des torts irréparables aux populations locales ni aux employés. La santé de tous doit être préservée. Ces deux critères sont considérés importants, ils sont donc pondérés 3.

### **Durée courte des travaux**

La durée des travaux a des répercussions sur la réutilisation des sites concernés, mais aussi la dynamique sociale et parfois la mobilité. Ainsi, une technologie de faible durée serait plus à considérer afin de permettre à la vie de reprendre son cours normal rapidement. Ce critère est pondéré 1.

### **Création d'emploi**

Une technologie qui emploie de la main-d'œuvre locale a un impact plus positif aux yeux de la société. Ce critère est considéré important, il est donc pondéré 3.

### **Disponibilité de la technologie**

Enfin, le dernier critère concerne l'accessibilité de la technologie. Il s'agit de savoir si la technologie étudiée est accessible, est-elle exportable au Mali? Les barrières douanières sont elles insurmontables? Ce critère est jugé très important puisque s'il n'est pas respecté la décontamination n'aura pas lieu. Il est donc pondéré 5.



#### **4. ANALYSE DES TECHNOLOGIES ET RECOMMANDATIONS SUR LA TECHNOLOGIE LA PLUS APPROPRIÉE**

Une technologie doit obtenir la note de 100 %, pour tous les pôles, afin d'être qualifiée de totalement durable. Aucune technologie ne répondant à ce critère, le choix portera donc sur celle qui tend le plus vers le développement durable. Pour être sélectionnée, une technologie doit donc obtenir pour chaque pôle une note supérieure à 50 %, mais également une note globale supérieure à celle des autres technologies.

L'analyse des technologies consiste à leur attribuer des notes et de les multiplier par la pondération des critères. Le résultat pour chaque pôle consiste en une moyenne arithmétique de toutes les notes pondérées des critères. La note d'un pôle indique son degré de conformité aux critères. Plus le résultat de l'évaluation d'un pôle se rapproche de 100 % plus ce dernier va dans le sens du critère.

Par la suite, toutes les moyennes des différents pôles sont répertoriées dans un tableau afin de calculer la note globale du projet. Elle consiste, également, à effectuer une moyenne arithmétique de tous les pôles de développement durable. La technologie ayant obtenu la meilleure moyenne est considérée comme la plus durable.

Les évaluations peuvent varier de 0 à 100 % et les pondérations de 1 à 5 comme indiqué plus haut.

Les résultats sont présentés de trois manières :

- Un tableau indique les valeurs moyennes pour les pôles environnemental, économique et social et la moyenne globale pour chaque technologie.
- Une seconde représentation consiste en un triangle de durabilité dont chaque sommet est un pôle de développement durable.
- Enfin, une troisième représentation indique les forces et faiblesses des différentes technologies sous forme de barres échelonnées de 0 à 100 % (OCEE, 2008).

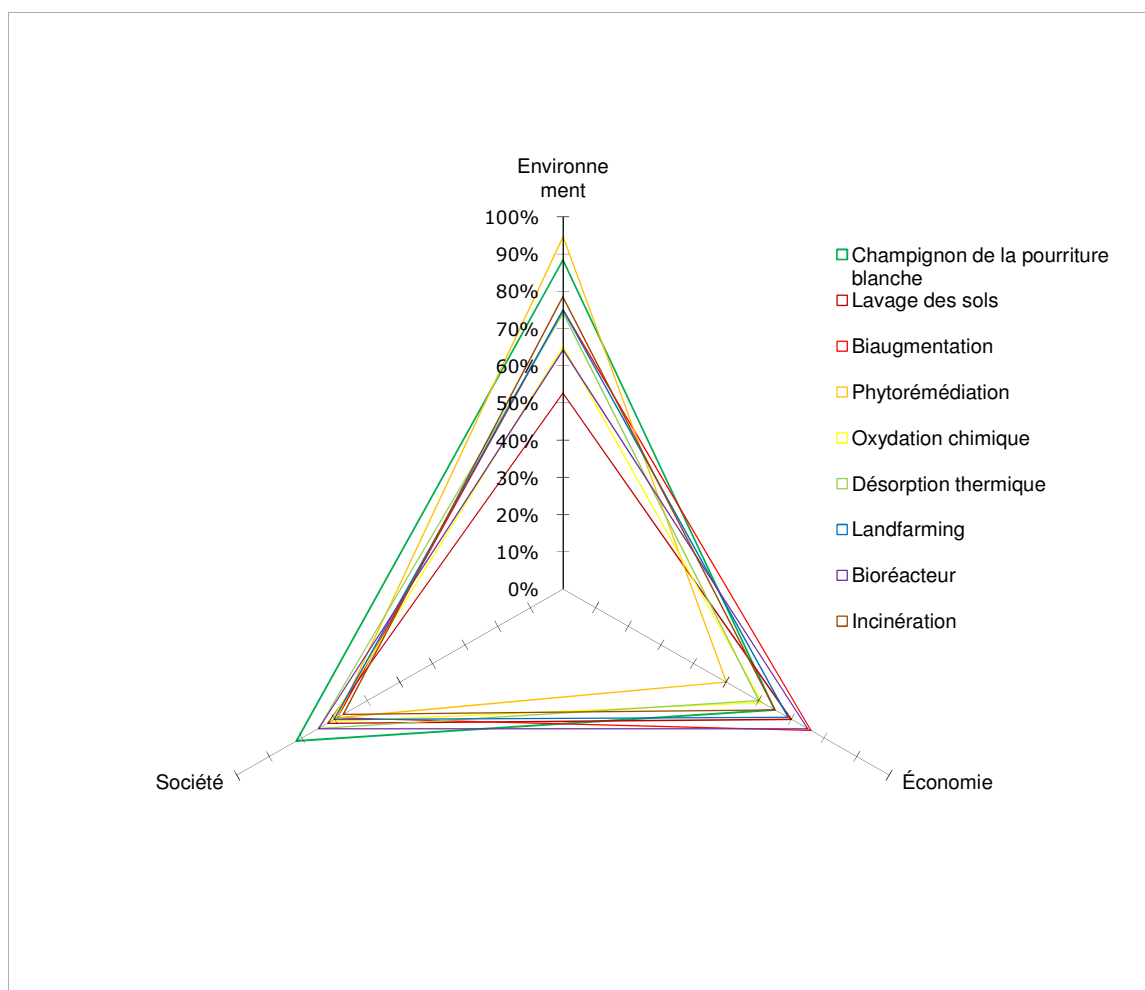
L'analyse des technologies applicables a donné les résultats suivants, présentés de trois façons.

Le tableau suivant représente les moyennes pour les pôles environnemental, économique et social ainsi que la moyenne globale des technologies.

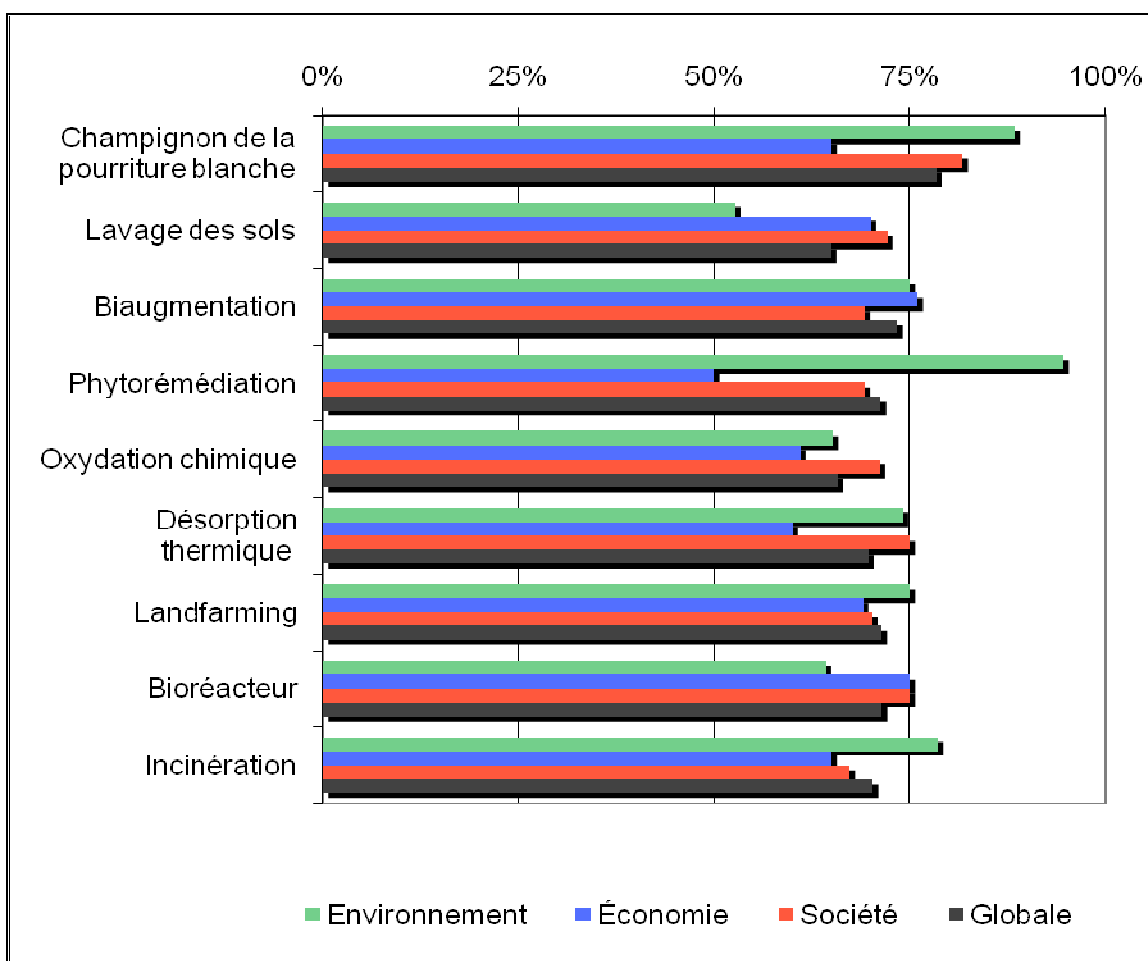
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Environnement	88%	53%	75%	95%	65%	74%	75%	64%	79%
Économie	65%	70%	76%	50%	61%	60%	69%	75%	65%
Société	82%	72%	69%	69%	71%	75%	70%	75%	67%
Globale	78%	65%	73%	71%	66%	70%	71%	71%	70%

Les numéros allant de 1 à 9 représentent l'ordre par le lequel les technologies ont été décrites dans la section 2.2.

Les résultats ont également été présentés sous forme de triangle de durabilité. Les sommets du triangle représentent chacun des trois pôles de développement durable.



Le troisième type de représentation est sous forme de barre dont la progression peut aller de 0 à 100 %. La figure suivante donne les résultats de l'analyse obtenus.



#### 4.1. Analyse par pôle de la technologie sélectionnée

Après évaluation, la technologie du champignon de la pourriture blanche apparaît comme étant la plus durable. Elle sera donc analysée par pôle de développement durable, les pôles environnemental, économique et social, afin d'établir ces forces et faiblesses par rapport aux critères définis pour le projet. Sa note globale est évaluée à 78 %. Elle devance donc toutes les autres technologies.

##### 4.1.1. Pôle environnemental

La technologie du champignon de la pourriture blanche présente un excellent bilan environnemental. La note moyenne du pôle est de 88 %.

Pour ce qui est de la gestion de l'eau, la technologie obtient une note de 100 %. Elle ne consomme donc pas beaucoup d'eau. Cet aspect est un grand atout en considérant que le Mali est un pays de type sahélien et donc qui ne possède pas beaucoup d'eau. La zone de Molodo, par exemple, a connu une pluviométrie totale de 547,3 mm, en 2007. L'approvisionnement en eau, à proximité du site contaminé, est influencé par le cours d'eau situé aux alentours de cette zone. La zone de Yélimané, quant à elle, n'a pu comptabiliser que 47,1 mm pendant toute l'année 2007 (PASP, 2009a). L'eau y est donc une denrée très précieuse qu'il faut protéger. Une technologie qui ne consomme pas d'eau devient alors un véritable atout.

La technologie de décontamination par le champignon de la pourriture blanche présente des effets bénéfiques sur la qualité de l'eau souterraine. Elle permet, grâce à une élimination des contaminants des sols, d'éviter leur migration vers les eaux souterraines contribuant ainsi indirectement à leur qualité. Pour le cas à l'étude, les expériences ne montrent pas une contamination des eaux souterraines, une caractérisation plus poussée devrait permettre de s'assurer de leurs niveaux de contamination.

Concernant la qualité des sols, la technologie permet leur amélioration en dégradant les pesticides qui y sont présents. La technologie a, en effet, été employée pour dégrader plusieurs sortes de pesticides avec succès. Les résultats dépendent, cependant, de la souche de champignon utilisée. Des expériences préliminaires devront donc être effectuées afin de déterminer la souche la plus appropriée. Les caractéristiques détaillées du sol doivent également être connues.

La consommation de matériaux par la technologie n'est pas très importante. Cependant, un substrat capable de stimuler la croissance du champignon est nécessaire. Généralement, des copeaux de bois sont utilisés puisque les enzymes capables de dégrader les contaminants sont exactement les mêmes que celles qui dégradent la lignine du bois. Cette consommation de copeaux de bois n'entraîne donc pas forcément une production de déchets puisqu'ils sont transformés. La technologie obtient une bonne note pour ce critère.

La biodiversité est un élément important à considérer surtout dans des zones semi-arides. Pour ce critère, il s'agissait de vérifier si la technologie avait des impacts sur la faune et la flore. Le résultat de l'évaluation montre que la réponse à cette question est négative puisque tout le processus se passe dans une biopile. Les seuls éléments qui risquent

d'être perturbés sont les microorganismes vivants sous terre. Cependant, il n'est pas démontré que la présence de champignon inhibe leur croissance. Des études à ce niveau seraient indispensables afin de s'y assurer. La faune et la flore ne sont pas touchées par la technique à l'heure actuelle des connaissances disponibles.

Le thème de la qualité de l'air a été divisé en trois parties : les émissions de particules en suspension  $PM_{10}$ , les émissions de composés organiques volatiles, mais également les émissions d'autres gaz à effet de serre tels que le méthane, les CFC. La technologie ne semble pas avoir des impacts négatifs sur la qualité de l'air. Elle n'est émettrice ni de poussières, ni de COV ni de gaz à effet de serre. Le champignon préfère d'ailleurs les milieux pauvres en azote. Bien que la transformation du contaminant ne soit pas très bien connue, il est important de souligner que leur minéralisation et leur volatilisation sont négligeables. De même dans certains cas comme celui du PCP, la méthylation est très faible. La conclusion qui peut donc être tirée est que la contribution aux émissions de gaz à effet de serre d'une manière générale n'est pas démontrée. La technologie obtient donc une bonne note pour la qualité de l'air.

La consommation d'énergie peut avoir des conséquences sur les critères précédents. Le thème est très important à considérer à l'heure où les changements climatiques occupent une place importante dans le débat actuel sur l'environnement. La consommation d'énergie fossile doit être minimisée au maximum tant pour le fonctionnement intrinsèque de la technologie que pour le transport qui y est affilié. Ce thème comporte donc deux critères, à savoir si la technologie consomme beaucoup d'énergie issue du pétrole ou si le transport qui y est associé s'effectue avec une utilisation efficace d'énergie. L'évaluation montre que la technologie une fois mise en œuvre n'a pas besoin d'énergie pour bien fonctionner. Il faut simplement s'assurer d'être en milieu aérobie pour permettre la survie du champignon. Aussi, le transport lié à la technologie est celui qui permet d'apporter le matériel nécessaire sur les sites à décontaminer. Il n'est donc pas très important.

#### **4.1.2. Pôle économique**

La note globale pour le pôle économique est relativement faible. Elle est de 65 %. Les critères pris en compte sont relatifs à l'économie du Mali et plus particulièrement des zones d'étude.

La création d'emploi a une fonction économique, mais également sociale; elle peut jouer un rôle dans l'acceptabilité d'un projet. En effet, un projet créateur d'emplois est beaucoup plus facilement accepté par le public. Ce critère n'obtient pas une bonne note puisque la technologie, une fois mise en place, ne nécessite pas beaucoup d'opérateurs. Les seuls emplois qui seraient utiles concernent les analyses chimiques et biologiques à effectuer, mais également les emplois en rapport avec la manutention qui sont souvent temporaires. Sous ce rapport, la technologie ne crée donc pas beaucoup d'emploi. C'est la raison pour laquelle, elle obtient une note faible en ce qui concerne ce critère.

Le coût de la technologie est un élément indispensable à considérer. Il va déterminer le plus souvent le choix ou non d'une technologie. Une technologie efficace, mais qui est hors de portée n'est pas viable pour un pays comme le Mali. Deux coûts sont à considérer : le coût de la technologie elle-même et le coût lié aux infrastructures à mettre en place pour traiter les sols. Pour ce qui est de la technique du champignon de la pourriture blanche, le coût directement lié à la technologie elle-même gravite autour de 98 \$ américain par m<sup>3</sup> de sol à traiter. Il dépend, principalement, du type de sol et de la qualité de la souche de champignon qui servira à dégrader les microorganismes. Cependant, ce critère n'est pas bien noté puisqu'il existe des technologies moins chères. Le coût lié aux infrastructures est relativement bien noté.

Le critère de la fiabilité de la technologie est très important. Il s'agit de vérifier si la technologie va permettre de redonner aux sols leur usage précédent. Le champignon de la pourriture blanche a été employé pour dégrader beaucoup de pesticides avec succès. Les différentes catégories de pesticides organochlorés et organophosphorés ont toutes fait l'objet d'une étude afin de vérifier s'ils pouvaient être dégradés par la technologie. Les résultats ont été concluants le plus souvent, mais avec des souches appropriées. Plusieurs souches ont montré des capacités de transformer les contaminants à l'étude avec des rendements élevés.

Concernant la durée de traitement, elle a deux conséquences, une sur le prix de la technologie et une autre sur la patience des populations et leur acceptabilité du projet. La durée de traitement avec cette technologie est estimée à moins de trois ans. Elle peut durer moins d'une année, mais cela dépend, évidemment, de la nature et de l'étendue de la contamination. La qualité du sol peut également être un facteur limitatif concernant la durée.

Le critère concernant les retombées économiques locales est important, mais n'est pas indispensable. Les retombées qui peuvent être escomptées concernent, principalement, l'achat local de certains matériaux, l'hébergement des travailleurs et leur nourriture, mais aussi l'emploi local. La technologie n'obtient pas une bonne note pour ce critère puisqu'il n'y a pas besoin de beaucoup d'opérateurs pour effectuer la décontamination. Beaucoup de matériels ne sont plus nécessaires pour mener à bien le projet de décontamination.

La technologie n'encourage pas le développement de nouvelles technologies puisqu'une fois les souches isolées et incorporées dans les sols, aucune autre technologie n'est indispensable. Ce critère obtient une mauvaise évaluation.

#### **4.1.3. Pôle social**

Avec une note moyenne de 82 % dans le domaine du social, on peut qualifier cette technologie de durable. La qualité du paysage n'est pas affectée par la technologie. Ceci est, principalement, dû au fait que la technologie opère dans un périmètre bien délimité et que peu d'éléments de la nature en surface ne sont affectés en dehors des zones d'opération. Elle n'a donc pas d'impact sur le paysage. La technologie obtient une bonne note pour ce critère.

Les pollutions sonores et olfactives sont des critères très importants à prendre en compte du point de vue des populations environnantes. Il s'agit de voir si la technologie cause des nuisances au voisinage. De ce point de vue, elle obtient une bonne note puisque la machinerie employée pour introduire le champignon dans les sols n'est pas très lourde. Toutefois, il faut considérer l'arrivée et le départ des véhicules motorisés pendant la première phase du projet. Ces critères obtiennent une bonne note.

La durée des travaux a un impact social important. Si les travaux durent trop longtemps, les populations vont finir par se lasser du projet. Ceci pourrait affecter son acceptabilité. Pour ce qui est de la technologie du champignon de la pourriture blanche, sa durée de traitement ne dépasse pas trois ans. Pendant cette période les populations ne pourront donc pas utiliser les terres comprises dans les zones à décontaminer. L'accès à la terre étant problématique dans les pays du sud, il convient de souligner son importance relative. Le critère est moyennement noté.

L'impact de la technologie sur la création d'emploi est très relatif : la technologie étant importée, il n'y a pas de création d'emplois significatifs. L'impact sur les emplois locaux est donc pratiquement faible. Ce critère est noté moyennement.

L'accès à la technologie concerne sa transférabilité. Peut-elle être introduite au Mali avec ou sans restriction. Ce critère obtient une bonne note puisque le matériel nécessaire à l'efficacité de la technologie peut être introduit dans le pays. Toutefois, il faudra vérifier si les souches de champignon nécessaires à la dégradation des contaminants peuvent être produites sur place. Autrement, l'importation de tels microorganismes doit certainement obéir à certaines règles dont il faut s'assurer le respect.

#### **4.2. Applicabilité de la technologie au Mali et facteurs contribuant à son coût**

La technologie peut être employée *in situ* ou dans un réacteur après excavation des sols. La méthode *in situ* n'est pas recommandée dans le cas à l'étude puisque d'après les analyses la contamination serait en surface. Une injection *in situ* serait donc inopportune.

L'excavation des sols et le traitement dans une biopile s'avèrent être la meilleure solution envisageable. Les sols sont donc confinés dans une biopile à l'intérieur de laquelle sont introduits des copeaux de bois et de l'air humidifié pour alimenter les microorganismes. Le système est comparable au compostage. Les sols, traités en biopile, sont empilés à des hauteurs variant de 1 à 3 m. Ils sont ensuite recouverts pour contrôler la teneur en eau et éviter que les éléments volatiles s'échappent dans l'atmosphère. Il est également recommandé d'installer une membrane pour éviter la migration des contaminants vers les eaux souterraines. Dans cette même optique, la collecte du lixiviat et son traitement pourraient s'avérer nécessaires (FRTR, 2007).

Pour assurer le succès du système, il convient d'effectuer des analyses préliminaires : des essais de minéralisation et de biodégradation. L'essai de minéralisation consiste à déterminer si les microorganismes sont capables de minéraliser les pesticides et les conditions dans lesquelles cette minéralisation peut s'effectuer. Pour ce qui est de l'essai de biodégradation, il s'agit de vérifier les souches de champignon qui sont en mesure de dégrader les pesticides présents dans les sols, mais également les conditions qui s'y rattachent. Ces essais devraient permettre de déterminer les conditions optimales pour traiter les sols contaminés par la méthode recommandée (FRTR, 2007).



En plus de déterminer les conditions d'application de la technologie, les facteurs qui influencent le coût doivent être revus. Les besoins sont donc listés ci-dessous dans le but d'avoir une idée sur les paramètres les plus importants.

Tableau 4.1 : Facteurs contribuant au coût de la technologie choisie

Ressources nécessaires	Coût
Besoins en eau	Coût des besoins en énergie pour les systèmes de pompage
Besoins en personnels	Coût fixes et frais de personnels
Besoins en matériels d'analyses de laboratoire	Coûts d'installation
Gestion des déchets	Coût de préparation des sites
Besoins en souches de champignon	Coût de suivi
Communication	Coût des communications

À cela s'ajoutent les frais d'importation des souches de microorganismes, les taxes, les frais de douanes.

Pour avoir une idée des coûts pour les trois zones étudiées, voici un calcul sommaire en considérant les superficies connues à ce jour, mais en excluant les frais de douanes et les coûts d'acquisition des souches.

Coût = prix unitaire \* volume total contaminé

Volume = surface \* hauteur de contamination

Volume pour la zone de Molodo =  $12,5 \text{ m}^2 \times 2,4 \text{ m} = 30 \text{ m}^3$

Volume pour la zone de Sévaré =  $5000 \text{ m}^2 \times 0,1 \text{ m} = 500 \text{ m}^3$

Volume pour la zone de Yélimané =  $2000 \text{ m}^2 \times 2,1 \text{ m} = 4200 \text{ m}^3$

$$\text{Volume total} = 30 \text{ m}^3 + 500 \text{ m}^3 + 4200 \text{ m}^3 = 4730 \text{ m}^3$$

$$\text{COÛT TOTAL ESTIMÉ} = 98 \times 4730 = 463\,540 \text{ \$ américain.}$$

## CONCLUSION

La décontamination des sols contaminés au Mali est devenue une priorité du fait qu'elle peut engendrer des dommages à l'environnement et à la santé humaine. Le Mali fait donc beaucoup d'effort afin d'y remédier. Il essaie de trouver des solutions idoines aux problèmes de ses sols contaminés aux pesticides. Plusieurs technologies de décontamination existent et peuvent être appliquées au Mali. Toutefois, il convient d'en choisir la plus opportune et celle qui convient le plus au contexte de pays du sud qu'est le pays des Dogons. Une analyse de différentes technologies, à l'aide d'une grille de développement durable applicable aux sols contaminés, a donc été menée dans le but de recommander la meilleure technologie possible.

Cet essai a permis, dans un premier temps, d'identifier les critères de décontamination qui pourraient s'appliquer au Mali puisque ce dernier ne possède pas de réglementation en la matière. Ainsi, le critère B de décontamination des sols et des eaux souterraines du Ministère du Logement, de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement de la Hollande a été privilégié. Ce choix a été motivé par la présence de zones d'habitations ou d'activités humaines à proximité des zones contaminées. Ensuite, une grille d'analyse de développement durable a permis de choisir une technologie qui respecte l'environnement, mais également qui est abordable financièrement et socialement bénéfique pour les populations aux alentours des sites contaminés.

La technologie choisie, celle du champignon de la pourriture blanche, a démontré son efficacité dans l'élimination de différents pesticides qu'ils soient organochlorés ou organophosphorés. Plusieurs études montrent des taux d'élimination pouvant aller jusqu'à plus de 90 % pourvu que le choix des souches de champignon employées soit adéquat. Pour plus d'efficacité de la technologie, les sols doivent être excavés avant d'être traités dans une biopile. Ainsi, les incertitudes et la durée liées au traitement *in situ* seraient levées.

Bien que cet essai se veuille réaliste, il convient d'indiquer le manque de certaines données qui pourraient améliorer l'analyse des technologies. En effet, la profondeur exacte de la contamination n'est pas connue et l'extension latérale n'a été que préliminairement évaluée. Une caractérisation plus approfondie permettra une précision supplémentaire. De même, les surfaces contaminées utilisées pour calculer le volume total de sols à décontaminer ne sont qu'approximatives. Cependant, cela n'enlève en rien

la pertinence de l'analyse puisque cette incertitude est la même pour toutes les technologies.

La mise en application de la technologie choisie demeure un enjeu à venir pour les professionnels qui travaillent dans le domaine des pesticides au Mali. Son adaptation doit donc être effectuée en s'appuyant sur ce qui a déjà été fait aux États-Unis notamment. De même, les enjeux de production suffisante de souches de champignon de la pourriture blanche devraient être considérés.

## RÉFÉRENCES

- Aust, S. D. et Benson, J. T. (1998). The Fungus among Us: Use of White Rot Fungi to Biodegrade Environmental Pollutants. *In* National Institute of Environmental Health Sciences. <http://ehpnet1.niehs.nih.gov/>, [En ligne].  
<http://ehpnet1.niehs.nih.gov/docs/1993/101-3/innovations.html> (Page consultée le 12 avril 2010).
- Bathalon, M., Delisle, S., Drouin, K., & Morin, D. (2009a). *Oxydation chimique - traitement au permanganate*. Unpublished manuscript.
- Bathalon, M., Delisle, S., Drouin, K., & Morin, D. (2009b). *Oxydation chimique ex situ par l'ozone*. Unpublished manuscript.
- Bernardeau, J., Bonneton, A., Brouat, V., Germain De Montauzan, M. et Herriot, L.. (2006). L'eau. *In* free.fr. <http://afrique2005.free.fr/>, [En ligne].  
<http://afrique2005.free.fr/pages/pays.htm#omali> (Page consultée le 28 février 2010).
- Bonnet, C., & Juck, D. (2008). *Bioréacteur ex situ*. Unpublished manuscript.
- Camara, M. (2006). *Analyse des impacts des stocks de pesticides sur les communautés locales et l'environnement : Cas du site de pesticides obsolètes de la base du Service Régional de la Protection des Végétaux (SPRV) de Gao au Mali*. Dakar, 56 p. 12/ASP/avril 2006.
- CEDRE (2007). Traitements Biologiques. *In* Hippocampe. <http://www.cedre.fr/>, [En ligne].  
<http://www.cedre.fr/fr/lutte/mpp/biologique.php> (Page consultée le 22 février 2010).
- Center for Public Environmental Oversight (2002a). *Ex situ* Chemical Oxidation. *In* Dreamhost. <http://www.cpeo.org/>, [En ligne].  
<http://www.cpeo.org/techtree/ttdescript/exchemox.htm> (Page consultée le 27 mars 2010).
- Center for Public Environmental Oversight (2002b). Incineration. *In* Dreamhost. <http://www.cpeo.org/>, [En ligne].  
<http://www.cpeo.org/techtree/ttdescript/incinr.htm> (Page consultée le 13 février 2010).
- Center for Public Environmental Oversight (2002c). Phytoremediation. *In* Dreamhost. <http://www.cpeo.org/>, [En ligne].  
<http://www.cpeo.org/techtree/ttdescript/phytrem.htm> (Page consultée le 20 mars 2010).
- Center for Public Environmental Oversight (2002d). White rot fungus. *In* Dreamhost. <http://www.cpeo.org/>, [En ligne].

- <http://www.cpeo.org/techtree/ttdescript/whitfung.htm> (Page consultée le 10 avril 2010).
- Chu, W., Chan, K.H. et Choy, W.K. (2006). The partitioning and modelling of pesticide parathion in a surfactant-assisted soil-washing system. *Chemosphere*, vol. 64, n° 5, p. 711-716.
- Clyde Engineering Service (2010). Treatment, Extraction, Containment or Removal Technologies. In 2010 OCETA. <http://www.aboutremediation.com>, [En ligne]. [http://www.aboutremediation.com/techdir/treatment\\_details.asp?techid=350](http://www.aboutremediation.com/techdir/treatment_details.asp?techid=350) (Page consultée le 20 avril 2010).
- CNRC (2009). GOST : Technologies. In Anonyme . <http://gost.irb-bri.cnrc-nrc.gc.ca>, [En ligne]. [http://gost.irb-bri.cnrc-nrc.gc.ca/Technologies/show\\_all.aspx](http://gost.irb-bri.cnrc-nrc.gc.ca/Technologies/show_all.aspx) (Page consultée le 25 février 2010).
- Conseil canadien des ministres de l'environnement. (septembre 1991). *Interim canadian environmental quality criteria for contaminated sites*. Unpublished manuscript.
- Dams, R.I., Paton, G. et Killham, K. (2007). Bioaugmentation of pentachlorophenol in soil and hydroponic systems. *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 60, n° 3, p. 171-177.
- Delisle, S., Greer, C., Drouin, K., & Morin, D. (2009). *Oxydation chimique ex situ - Peroxyde/Réactif de fenton*. Unpublished manuscript.
- Dellens, A. D. (2007). *Green remediation and the use of renewable energy for remediation projects*. Unpublished manuscript. Retrieved 20 avril 2010, from <http://www.clu-in.org/download/studentpapers/Green-Remediation-Renewables-A-Dellens.pdf>
- Environnement Canada (2002a). *Ex situ Remediation Technologies for Contaminated Sites*. In Monds, S. <http://www.on.ec.gc.ca>, [En ligne]. <http://www.on.ec.gc.ca/pollution/ecnpd/tabs/tab23-e.html> (Page consultée le 27 février 2010).
- Environnement Canada (2002b). *Ex situ Remediation Technologies for Contaminated Sites*. In Monds, S. <http://www.on.ec.gc.ca>, [En ligne]. <http://www.on.ec.gc.ca/pollution/ecnpd/tabs/tab23-e.html> (Page consultée le 22 février 2010).
- Environnement Canada (2002c). Technologies d'assainissement des eaux souterraines polluées. In Monds, S. <http://www.on.ec.gc.ca>, [En ligne]. <http://www.on.ec.gc.ca/pollution/ecnpd/tabs/tab24-f.html> (Page consultée le 14 avril 2010).
- Environnement Canada (2002d). Technologies d'assainissement *ex situ* des lieux contaminés. In Monds, S. <http://www.on.ec.gc.ca>, [En ligne].

- <http://www.on.ec.gc.ca/pollution/ecnpsd/tabs/tab23-f.html> (Page consultée le 13 avril 2010).
- Evdokimov, E. et Von Wandruszka, R. (1998). Decontamination of DDT-Polluted Soil by Soil Washing/Cloud Point Extraction. *Analytical Letters*, vol. 31, n° 13, p. 2289-2298.
- FAO (2009). *Évaluation de la contamination des sols : manuel de référence*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 198 p. (Collection Élimination des pesticides 8).
- FRTR (2007a). Incineration. In U.S. Army Environmental Center. <http://www.frtr.gov>, [En ligne]. <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-23.html> (Page consultée le 16 avril 2010).
- FRTR (2007b). Treatment Perspectives. In U.S. Army Environmental Center. <http://www.frtr.gov>, [En ligne]. [http://www.frtr.gov/matrix2/section3/sec3\\_int.html](http://www.frtr.gov/matrix2/section3/sec3_int.html) (Page consultée le 15 mars 2010).
- FRTR (2002a). Landfarming. In U.S. Army Environmental Center. <http://www.frtr.gov>, [En ligne]. [http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4\\_13a.html](http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_13a.html) (Page consultée le 06 avril 2010).
- FRTR (2002b). Phytoremediation. In U.S. Army Environmental Center. <http://www.frtr.gov>, [En ligne]. <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-3.html> (Page consultée le 25 mars 2010).
- FRTR (2002c). Soil washing. In U.S. Army Environmental Center. <http://www.frtr.gov>, [En ligne]. <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-19.html> (Page consultée le 20 février 2010).
- FRTR (2002d). Thermal Desorption. In U.S. Army Environmental Center. <http://www.frtr.gov>, [En ligne]. <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-26.html#top> (Page consultée le 02 avril 2010).
- Golder Associates Ltd. (2009). *Development of a sustainability screening tool for site remediation planning*. Unpublished manuscript. Retrieved 21 avril 2010, from [http://www.dtsc.ca.gov/omf/upload/GolderSET\\_CalUSEPA\\_GreenRem\\_2009\\_Final.pdf](http://www.dtsc.ca.gov/omf/upload/GolderSET_CalUSEPA_GreenRem_2009_Final.pdf)
- Gourcy, L. (1994). *Fonctionnement hydrogéochimique de la cuvette lacustre du fleuve niger (mau) : Bilans et suivi des flux hydriques, particulaires et dissous et des flux de méthane*. Thèse pour l'obtention du grade de docteur en sciences, Université Paris XI Orsay, Paris, 341 p.
- Jauregui, J., Valderrama, B., Albores, A. et Vazquez-Duhalt, R. (2003). Microsomal transformation of organophosphorus pesticides by white rot fungi. *Biodegradation*, vol. 14, n° décembre/2003, p. 397-406.

- Kamei, I., Takagi, K. et Kondo, R. (2010). Bioconversion of dieldrin by wood-rotting fungi and metabolite detection. *Pest Management Science*, vol. 9999, n° février/2010, p. n/a-n/a.
- Keita, B. (2003). *Quatorzième réunion du sous-comité ouest et centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres*. Abomey, Bénin, FAO, 227 p. (Collection Rapports sur les ressources en sols du monde).
- Koné, B. et PAN (2006). *Utilisation et gestion des pesticides dans la lutte anti-acridienne de 2004-2005 au Mali*. Pesticides Action Network édition, Dakar, n°9/ASP/avril 2006,
- Korade, D.L. et Fulekar, M.H. (2009). Rhizosphere remediation of chlorpyrifos in mycorrhizospheric soil using ryegrass. *Journal of hazardous materials*, vol. 172, n° 2-3, p. 1344-1350.
- Lesquel, E. (2009). Sols pollués- La phytoremédiation, un procédé prometteur. In Google. <http://becque.blogspot.com>, [En ligne].  
<http://becque.blogspot.com/2009/12/sols-pollues-la-phytoremediation-un.html> (Page consultée le 11 avril 2010).
- Li, R., Yang, C., Chen, H., Zeng, G., Yu, G. et Guo, J. (2009). Removal of triazophos pesticide from wastewater with Fenton reagent. *Journal of hazardous materials*, vol. 167, n° 1-3, p. 1028-1032.
- Lima, D., Viana, P., André, S., Chelinho, S., Costa, C., Ribeiro, R., Sousa, J.P., Fialho, A.M. et Viegas, C.A. (2009). Evaluating a bioremediation tool for atrazine contaminated soils in open soil microcosms: The effectiveness of bioaugmentation and biostimulation approaches. *Chemosphere*, vol. 74, n° 2, p. 187-192.
- Maldonado, M.I., Malato, S., Pérez-Estrada, L.A., Gernjak, W., Oller, I., Doménech, X. et Peral, J. (2006). Partial degradation of five pesticides and an industrial pollutant by ozonation in a pilot-plant scale reactor. *Journal of hazardous materials*, vol. 138, n° 2, p. 363-369.
- MDDEP (2002a). Annexe 2 : Les critères génériques pour les sols et pour les eaux souterraines. In Tremblay, J. <http://www.mddep.gouv.qc.ca>, [En ligne].  
[http://www.mddep.gouv.qc.ca/sol/terrains/politique/annexe\\_2\\_grille\\_eaux.htm#pesticide](http://www.mddep.gouv.qc.ca/sol/terrains/politique/annexe_2_grille_eaux.htm#pesticide) (Page consultée le 15 mars 2010).
- MDDEP (2002b). Annexe 2 : Les critères génériques pour les sols et pour les eaux souterraines. In Tremblay, J. <http://www.mddep.gouv.qc.ca>, [En ligne].  
[http://www.mddep.gouv.qc.ca/sol/terrains/politique/annexe\\_2\\_tableau\\_1.htm#pesticide](http://www.mddep.gouv.qc.ca/sol/terrains/politique/annexe_2_tableau_1.htm#pesticide) (Page consultée le 15 mars 2010).
- MDDEP (2002c). Annexe 2 : Les critères génériques pour les sols et pour les eaux souterraines. In Tremblay, J. <http://www.mddep.gouv.qc.ca>, [En ligne].  
[http://www.mddep.gouv.qc.ca/sol/terrains/politique/annexe\\_2.htm](http://www.mddep.gouv.qc.ca/sol/terrains/politique/annexe_2.htm) (Page consultée le 16 mars 2010).



- Meng, J., Yang, B., Zhang, Y., Dong, X. et Shu, J. (2010). Heterogeneous ozonation of suspended malathion and chlorpyrifos particles. *Chemosphere*, vol. 79, n° 4, p. 394-400.
- Niu, G., Zhang, J., Zhao, S., Liu, H., Boon, N. et Zhou, N. (2009). Bioaugmentation of a 4-chloronitrobenzene contaminated soil with *Pseudomonas putida* ZWL73. *Environmental Pollution*, vol. 157, n° 3, p. 763-771.
- Nurzhanova, A., Kulakow, P., Rubin, P., Rakhimbayev, I., Sedlovskiy, A., Zhambakin, K., Kalugin, S., Kolysheva, E. et Erickson, L.. (2009). Obsolete Pesticides Pollution and Phytoremediation of Contaminated Soil in Kazakhstan. *Earth and Environmental Science*, vol. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, n° octobre 2009, p. 87-111.
- OCEE (2008). *La boussole bernoise de développement durable*. Centre de compétence pour le développement durable, 20 p.
- Office québécois de la langue française (2010). Vocabulaire de la décontamination des sols. In Gouvernement du Québec. <http://www.olf.gouv.qc.ca/>, [En ligne]. [http://www.olf.gouv.qc.ca/ressources/bibliotheque/dictionnaires/terminologie\\_dcontamination\\_sols/index\\_anglais.html](http://www.olf.gouv.qc.ca/ressources/bibliotheque/dictionnaires/terminologie_dcontamination_sols/index_anglais.html) (Page consultée le 12 février 2010).
- Olivier, M.J. (2007). *Chimie de l'environnement*. 5e édition, Québec, Canada, Les productions Jacques Bernier, 316 p.
- Omar, S.A. (1998). Availability of phosphorus and sulfur of insecticide origin by fungi. *Biodegradation*, vol. 9, n° septembre 1998, p. 327-336.
- O'Neill, T. (2010). ITRC - Green & Sustainable Remediations. In Interstate Technology & Regulatory Council. <http://www.itrcweb.org/>, [En ligne]. [http://www.itrcweb.org/teampublic\\_GSR.asp](http://www.itrcweb.org/teampublic_GSR.asp) (Page consultée le 25 avril 2010).
- Organisation pour la mise en valeur du fleuve sénégal (2009). Les États membres de l'OMVS. In OMVS. <http://www.omvs.org>, [En ligne]. <http://www.omvs-soe.org/membres.htm> (Page consultée le 15 février 2010).
- PALUCP (2006). *Rapport mensuel : Volet environnemental*. Mali, 11 p.
- PASP (2009a). *Annexes - Étude d'Impact Environnemental et Social du programme PASP-Mali*. Bamako, Mali, Ministère de l'Environnement et de l'Assainissement du Mali, 191 p.
- PASP. (2009b). *Plan de gestion environnementale spécifique pour le nettoyage et la décontamination du site de niogoméra*. Unpublished manuscript.
- PASP. (2007). *Note technique. Nettoyage du site de molodo*. Unpublished manuscript.

- Pignatello, J.J. et Sun, Y. (1995). Complete oxidation of metolachlor and methyl parathion in water by the photoassisted Fenton reaction. *Water research*, vol. 29, n° 8, p. 1837-1844.
- Récupère Sol (2010). Le procédé d'oxydation thermique. In Anonyme. <http://www.recuperesol.com>, [En ligne].  
<http://www.recuperesol.com/procede.htm> (Page consultée le 16 février 2010).
- Rubinos, D.A., Villasuso, R., Muniategui, S., Barral, M.T. et Díaz-Fierros, F. (2006). Using the Landfarming Technique to Remediate Soils Contaminated with Hexachlorocyclohexane Isomers. *Water, Air, & Soil Pollution*, vol. 181, n° mai 2007, p. 385-399.
- Sidibé, D. (2010). Communication personnelle. Communication orale. *Critère de décontamination des sols et des eaux souterraines au Mali*, 25 mars 2010, Bamako, Mali.
- Sidibé, D. (2007). *Note d'information sur les risques posés par les emballages vides de pesticides à l'environnement et à la santé des populations de Molodo et de Niogomera*. Mali, 6 p.
- Silcox, G.D., Larsen, F.S., Owens, W.D. et Choroszy-Marshall, M. (1995). Kinetics of hydrocarbon and pesticide removal from clay soils during thermal treatment in a pilot-scale rotary kiln. *Waste Management*, vol. 15, n° 5-6, p. 339-349.
- Sylla, C. H. (2007). *Rapport de mission : Investigation des sites contaminés (niogoméra, molodo et sévaré)*. Unpublished manuscript.
- Tarhy, M. (2007). Diagnostic des capacités d'analyses de résidus de pesticides du laboratoire central vétérinaire de Bamako. Mali, 44 p.
- Taysser, M. (2009). Green Remediation. In State of California. <http://www.dtsc.ca.gov/>, [En ligne]. [http://www.dtsc.ca.gov/OMF/Grn\\_Remediation.cfm](http://www.dtsc.ca.gov/OMF/Grn_Remediation.cfm) (Page consultée le 15 avril 2010).
- Thiam, A., Sarr, A., Adou, M. et Bada, S.A. (2006). *Gestion des pesticides dans la lutte antiacridienne en 2004 au mali*. PAN UK édition, Dakar, PAN-Afrique, 6 p. Inconnu. (Collection Briefing pesticides obsolètes). (1).
- Thibodeau, J., Delisle, S., & Désilets, M. (2008). *Incineration ex situ*. Unpublished manuscript.
- Thibodeau, J., & Désilets, M. (2008). *Désorption thermique haute température ex situ*. Unpublished manuscript.
- Thibodeau, J., Juck, D., & Drouin, K. (2009). *Lavage des sols ex situ*. Unpublished manuscript.

- Turgeon, M., Delisle, S., & Drouin, K. (2008a). *Bioaugmentation in situ*. Unpublished manuscript.
- Turgeon, M., Delisle, S., & Drouin, K. (2008b). *Champignon de la pourriture blanche*. Unpublished manuscript.
- Turgeon, M., Delisle, S., & Drouin, K. (2008c). *Épandage contrôlé ex situ*. Unpublished manuscript.
- Turgeon, M., Delisle, S., & Drouin, K. (2008d). *Phytoremédiation des composés organiques*. Unpublished manuscript.
- USEPA. (2008). *Green remediation : Incorporating sustainable environmental practices into remediation of contaminated sites*. Unpublished manuscript. Retrieved 22 avril 2010, from [www.cluin.info/download/remed/Green-Remediation-Primer.pdf](http://www.cluin.info/download/remed/Green-Remediation-Primer.pdf)
- USEPA. (2004). *Chemical oxidation*. Unpublished manuscript.
- USEPA. (1994). *Landfarming*. Unpublished manuscript.
- Villeneuve, C. (2007). Chaire Éco-Conseil : Guide d'utilisation de la grille d'analyse de développement durable, Chicoutimi, Université du Québec à Chicoutimi, p. 37.
- Visvanathan, C., Thu, L.N., Jegatheesan, V. et Anotai, J. (2005). Biodegradation of pentachlorophenol in a membrane bioreactor. *Desalination*, vol. 183, n° 1-3, p. 455-464.
- VROM. (1994). *Appendix A : Soil and groundwater remediation criteria*. Unpublished manuscript. Retrieved 20 mars 2010, from <http://www.epd.gov.hk/eia/register/permit/latest/figure/vep159appendixa.pdf>
- Wikipédia (2010). Bioremédiation. In MediaWiki. <http://fr.wikipedia.org>, [En ligne]. [http://fr.wikipedia.org/wiki/Biorem%C3%A9diation#Avantages\\_et\\_Inconv.C3.A9nients](http://fr.wikipedia.org/wiki/Biorem%C3%A9diation#Avantages_et_Inconv.C3.A9nients) (Page consultée le 19 avril 2010).
- Wikipédia (2009a). Photodegradation. In MediaWiki. <http://en.wikipedia.org>, [En ligne]. <http://en.wikipedia.org/wiki/Photodegradation> (Page consultée le 15 mai 2010 2010).
- Wikipédia (2009b). Talweg. In MediaWiki. <http://fr.wikipedia.org>, [En ligne]. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Talweg> (Page consultée le 14 mai 2010 2010).
- Wikisource (2009). Notre avenir à tous - Rapport Brundtland/Chapitre 2 - Wikisource. In Mediawiki. <http://fr.wikisource.org>, [En ligne]. [http://fr.wikisource.org/wiki/Notre\\_avenir\\_%C3%A0\\_tous\\_-\\_Rapport\\_Brundtland/Chapitre\\_2](http://fr.wikisource.org/wiki/Notre_avenir_%C3%A0_tous_-_Rapport_Brundtland/Chapitre_2) (Page consultée le 16 mai 2010).

Wu, J., Lan, C. et Chan, G.Y.S. (2009). Organophosphorus pesticide ozonation and formation of oxon intermediates. *Chemosphere*, vol. 76, n° 9, p. 1308-1314.

**ANNEXE 1**  
**BIBLIOGRAPHIE**

- Acero, J.L., Real, F.J., Javier Benitez, F. et González, A. (2008). Oxidation of chlorfenvinphos in ultrapure and natural waters by ozonation and photochemical processes. *Water research*, vol. 42, n° 12, p. 3198-3206.
- Aitken, M.D., Venkatadri, R. et Irvine, R.L. (1989). Oxidation of phenolic pollutants by a lignin degrading enzyme from the white-rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*. *Water research*, vol. 23, n° 4, p. 443-450.
- Amondham, W., Parkpian, P., Polprasert, C., DeLaune, R.D. et Jugsujinda, A. (2006). Paraquat Adsorption, Degradation, and Remobilization in Tropical Soils of Thailand. *Journal of Environmental Science & Health, Part B -- Pesticides, Food Contaminants, & Agricultural Wastes*, vol. 41, n° 5, p. 485-507.
- Bandala, E.R., Andres-Octaviano, J., Pastrana, P. et Torres, L.G. (2006). Removal of aldrin, dieldrin, heptachlor, and heptachlor epoxide using activated carbon and/or *Pseudomonas fluorescens* free cell cultures (English). *J. environ. sci. health, Part B, Pestic. food contam. agric. wastes*, vol. 41, n° 5, p. 553-569.
- Bending, G.D., Friloux, M. et Walker, A. (2002). Degradation of contrasting pesticides by white rot fungi and its relationship with ligninolytic potential. *FEMS microbiology letters*, vol. 212, n° 1, p. 59-63.
- Bending, G.D., Friloux, M. et Walker, A. (2002). Degradation of contrasting pesticides by white rot fungi and its relationship with ligninolytic potential. *FEMS microbiology letters*, vol. 212, n° 1, p. 59-63.
- Blanchette, R.A., Burnes, T.A., Leatham, G.F. et Effland, M.J. (1988). Selection of white-rot fungi for biopulping. *Biomass*, vol. 15, n° 2, p. 93-101.
- Chevalier, P. (2005). *Technologies d'assainissement et prévention de la pollution*. Sainte-Foy (Québec), Télé-université, 440 p. (Collection Sciences de l'environnement).
- Couto, H.J.B., Massarani, G., Biscaia Jr., E.C. et Sant'Anna Jr., G.L. (2009). Remediation of sandy soils using surfactant solutions and foams. *Journal of hazardous materials*, vol. 164, n° 2-3, p. 1325-1334.
- Eggen, T. et Sveum, P. (1999). Decontamination of aged creosote polluted soil: the influence of temperature, white rot fungus *Pleurotus ostreatus*, and pre-treatment. *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 43, n° 3, p. 125-133.
- Fragoero, S. et Magan, N. (2008). Impact of *Trametes versicolor* and *Phanerochaete chrysosporium* on differential breakdown of pesticide mixtures in soil microcosms at two water potentials and associated respiration and enzyme activity. *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 62, n° 4, p. 376-383.
- Higarashi, M.M. et Jardim, W.F. (2002). Remediation of pesticide contaminated soil using TiO<sub>2</sub> mediated by solar light. *Catalysis Today*, vol. 76, n° 2-4, p. 201-207.
- Hunter, W.J. et Shaner, D.L. (2009). Biological remediation of groundwater containing both nitrate and atrazine. *Current Microbiology*, vol. 60, n° 1, p. 42-46.

- Inoue, M.H., Oliveira Jr., R.S., Regitano, J.B., Tormena, C., Constantin, J. et Tornisielo, V.L. (2006). Sorption-Desorption of Atrazine and Diuron in Soils from Southern Brazil. *Journal of Environmental Science & Health, Part B -- Pesticides, Food Contaminants, & Agricultural Wastes*, vol. 41, n° 5, p. 605-621.
- Juhasz, A.L., Smith, E., Smith, J. et Naidu, R. (2003). *In situ* remediation of ddt-contaminated soil using a two-phase cosolvent flushing-fungal biosorption process. *Water, Air, & Soil Pollution*, vol. 147, n° 1-4, p. 263-274.
- Kah, M. et Brown, C.D. (2007). Changes in pesticide adsorption with time at high soil to solution ratios. *Chemosphere*, vol. 68, n° 7, p. 1335-1343.
- Karthikeyan, R., Davis, L.C., Erickson, L.E., Kassim Al-Khatib, L.E., Kulakow, P.A., Barnes, P.L., Hutchinson, S.L. et Nurzhanova, A.A. (2004). Potential for Plant-Based Remediation of Pesticide-Contaminated Soil and Water Using Nontarget Plants such as Trees, Shrubs, and Grasses. *Critical Reviews in Plant Sciences*, vol. 23, n° 1, p. 91-101.
- Korade, D.L. et Fulekar, M.H. (2009). Rhizosphere remediation of chlorpyrifos in mycorrhizospheric soil using ryegrass. *Journal of hazardous materials*, vol. 172, n° 2-3, p. 1344-1350.
- Lagadec, A., Miller, D., Lilke, A. et Hawthorne, S. (2000). Pilot-scale subcritical water remediation of polycyclic aromatic hydrocarbon- and pesticide-contaminated soil. *Environmental science & technology*, vol. 34, n° 8, p. 1542-1548.
- Logan, B.E., Alleman, B.C., Amy, G.L. et Gilbertson, R.L. (1994). Adsorption and removal of pentachlorophenol by white rot fungi in batch culture. *Water research*, vol. 28, n° 7, p. 1533-1538.
- Marco-Urrea, E., Pérez-Trujillo, M., Caminal, G. et Vicent, T. (2009). Dechlorination of 1,2,3- and 1,2,4-trichlorobenzene by the white-rot fungus *Trametes versicolor*. *Journal of hazardous materials*, vol. 166, n° 2-3, p. 1141-1147.
- Park, S. et Bielefeldt, A.R. (2005). Non-ionic surfactant flushing of pentachlorophenol from NAPL-contaminated soil. *Water research*, vol. 39, n° 7, p. 1388-1396.
- PASP. (2009). *Étude d'impact environnemental et social des activités d'élimination du PASP-mali*. Unpublished manuscript.
- Rama Krishna, K. et Philip, L. (2008). Adsorption and desorption characteristics of lindane, carbofuran and methyl parathion on various Indian soils. *Journal of hazardous materials*, vol. 160, n° 2-3, p. 559-567.
- Sleep, B.E. et McClure, P.D. (2001). Removal of volatile and semivolatile organic contamination from soil by air and steam flushing. *Journal of contaminant hydrology*, vol. 50, n° 1-2, p. 21-40.

- Subramanian, V. et Yadav, J.S. (2008). Regulation and heterologous expression of P450 enzyme system components of the white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*. *Enzyme and microbial technology*, vol. 43, n° 2, p. 205-213.
- Thummes, K., Kämpfer, P. et Jäckel, U. (2007). Temporal change of composition and potential activity of the thermophilic archaeal community during the composting of organic material. *Systematic and applied microbiology*, vol. 30, n° 5, p. 418-429.
- Vogel, T.M. (1996). Bioaugmentation as a soil bioremediation approach. *Current opinion in biotechnology*, vol. 7, n° 3, p. 311-316.
- Zhou, W. et Zhu, L. (2008). Influence of surfactant sorption on the removal of phenanthrene from contaminated soils. *Environmental Pollution*, vol. 152, n° 1, p. 99-105.



**ANNEXE 2**  
**RÉSULTATS D'ANALYSES DES SOLS PRÉLEVÉS LE 21/07/07 AU NIVEAU DE**  
**MOLODO**

Modifié de Tarhy (2007, p. 40)

N° ordre	pt	d (m)	h (cm)	Matières actives	Résultats	Unités
1	1	21	92	RAS		
2	1	21	252	cyanophos	0,05	mg/kg
				fenitrothion	0,3	mg/Kg
2'	1	21	10	dieldrine	24	mg/kg
				malathion	60	mg/kg
				cyhalothrine	1,3	mg/kg
3	2	7	10	dieldrine	3,5	mg/kg
				chlorpyriphos ethyle	0,08	mg/kg
4	2	7	50	dieldrine	<LOD	
				fenitrothion	0,03	mg/kg
5	2	7	120	dieldrine	<LOD	

6	2	7	250	dieldrine	0,04	mg/kg
				chlorpyriphos ethyle	1,6	mg/kg
7	2	7	320	dieldrine	0,05	mg/kg
				chlorpyriphos ethyle	0,2	mg/Kg
8	3	HS	10	fenitrothion	33,00	mg/Kg
				dieldrine	26,00	mg/Kg
				fenvalerate	19,00	mg/Kg
				parathion ethyle	76,00	g/Kg
9	3	HS	50	dieldrine	12,5	mg/Kg
				parathion ethyle	3900	g/Kg
10	3	HS	100	dieldrine	651	mg/Kg
				Parathion ethyle	2,3	g/Kg

11	3	HS	150	cyhalothrine	0,2	mg/Kg
				dieldrine	25	mg/Kg
				Parathion ethyle	266	mg/Kg
12	3	HS	200	cyanophos	0,20	mg/Kg
				dieldrine	1,30	g/Kg
				cyhalothrin	1,30	mg/Kg
				malathion	0,08	mg/Kg
				pyridaphenthion	0,06	mg/Kg
				fenitrothion	6,70	mg/Kg
				parathion ethyle	5,90	g/Kg
				parathion methyle	5,10	mg/Kg
phenthoate	5,00	mg/Kg				

13	3	HS	220	dieldrine	76,00	mg/Kg
				fenitrothion	0,40	mg/Kg
				parathion ethyle	375,00	mg/Kg
				phenthoate	0,40	mg/Kg
				parathion methyle	0,50	mg/Kg
14	3	HS	240	fenvalerate	0,1	mg/Kg
				dieldrine	171	mg/Kg
				parathion ethyle	920	mg/Kg
				Parathion methyle	1,2	mg/Kg
				fenitrothion	0,1	mg/Kg
				phenthoate	0,1	mg/Kg
				tetrachlorovinphos	0,03	mg/Kg

				pyridaphanthion	0,03	mg/Kg
				phosalone	0,3	mg/Kg
15	EAU#1	149		fenvalerate	1	ppb

**ANNEXE 3**  
**RÉSULTATS D'ANALYSES DES SOLS PRÉLEVÉS LE 21/07/07 AU NIVEAU DE**  
**SÉVARÉ**

Modifié de Tarhy (2007, p. 41)

N° ordre	pt	d (m)	h (cm)	Matières actives	Résultats	Unité
17	1	11	10	dièldrine	0,03	mg/Kg
				fenvalerate	0,05	mg/Kg
				Fenthion	2,1	mg/Kg
				fenitrothio	0,2	mg/Kg
				chlorpyriphos ethyle	0,2	mg/Kg
				Parathion ethyle	0,1	mg/Kg
				tetrachlorvinphos	0,07	mg/Kg
18	2	16	10	fenvalerate	0,3	mg/Kg
				cyanophos	0,3	mg/Kg
				fenthion	0,2	mg/Kg
19	2	16	50	cyanophos	0,2	mg/Kg
				Fenthion	0,02	mg/Kg



20	3	13	10	fenvaterate	0,02	mg/Kg
				fenthion	0,3	mg/Kg
				tetrachlorvinphos	0,02	mg/Kg
21	3	13	40	cyanophos	0,1	mg/Kg
				fenthion	0,05	mg/Kg
22	3	13	50	fenthion	0,07	mg/Kg
23	4	24	10	RAS		
24	4	24	50	RAS		
25	5	37	10	fenvaterate	0,2	mg/Kg
				chlorpyriphos ethyle	0,03	mg/Kg
				fenitrothion	0,03	mg/Kg
26	6	48	10	RAS		
27	6	48	20	fenvaterate	0,09	mg/Kg

				fenitrothion	0,02	mg/Kg
28	7	HS	(au bord)	fenitrothion	1,3	g/Kg
				fenthion	1	g/Kg
				chlorpyriphos et	514	mg/Kg
				phenthoate	22,5	mg/Kg
				parathion ethyle	7,4	mg/Kg
				fenvalerate	546	mg/Kg

**ANNEXE 4**  
**RÉSULTATS D'ANALYSES DES SOLS PRÉLEVÉS LE 21/07/07 AU NIVEAU DE**  
**YÉLIMANÉ**

Modifié de Tarhy (2007, p. 42)

N° ordre	pt	d (m)	h (cm)	Matières actives	Résultats	Unités
29	1	36	10	dièldrine	0,7	mg/Kg
				RAS		
30	1	36	72	dièldrine	0,9	mg/Kg
				fenvalerate	0,03	mg/Kg
				chlorpyriphos ethyle	0,03	mg/Kg
31	1	36	135	cyanophos	0,07	mg/Kg
				dièldrine	0,4	mg/Kg
				chlorpyriphos ethyle	0,09	mg/Kg
32	1	36	188	cyanophos	1,8	mg/Kg
				dièldrine	0,09	mg/Kg
				Fenvalerate	0,2	mg/Kg
				chlorpyriphos ethyle	0,08	mg/Kg

33	2	HS	10	cyhalothrine	35	mg/Kg
				parathion ethyle	1,6	mg/Kg
34	2	HS	63	dièldrine	0,01	mg/Kg
				parathion ethyle	0,05	mg/Kg
35	2	HS	210	cyanophos	0,2	mg/Kg
				dièldrine	21	mg/Kg
				parathion ethyle	0,4	mg/Kg
				malathion	0,04	mg/Kg
36	2	HS	250	cyanophos	0,1	mg/Kg
				dièldrine	0,1	mg/Kg
				fenvalerate	0,1	mg/Kg
				RAS		
37	3	27	5	RAS		

				RAS		
38	4	60	5	dièldrine	0,1	mg/Kg
				RAS		
39	5	45	20	dièldrine	1,2	mg/Kg
				parathion ethyle	0,05	mg/Kg
40	5	45	35	RAS		mg/Kg
				parathion ethyle	0,2	mg/Kg
41	6	11	10	RAS		
				dièldrine	0,3	mg/Kg
				fenvalerate	0,2	mg/Kg
				fenitrothion	0,04	mg/Kg
				parathion ethyle	0,33	mg/Kg
44	6	11	76	dièldrine	0,3	mg/Kg

45	6	11	133	dièldrin	0,3	mg/Kg
46	6	11	163	dièldrine	1,6	mg/Kg
				parathion ethyle	0,3	mg/Kg
42	7	48	10	dièldrine	0,9	mg/Kg
				parathion ethyle	1	mg/Kg
				phentho	0,2	mg/Kg
				tetrachv	0,1	mg/Kg
43	7	48	20	dièldrine	0,05	mg/Kg
				chlorpyriphos ethyle	0,02	mg/Kg
47	8	500	500	dièldrine	0,1	ppb
			eau	ethion		
				parathion ethyle	5	ppb
				malathion	3	ppb

				fenitrothion	2	ppb
48	9		eau marre	dieldrine	2	ppb
				cyhalothrine	0,5	ppb
				chlorpyriphos ethyle	5	ppb



**ANNEXE 5**  
**LOCALISATION ET QUANTITÉ DE PESTICIDES OBSOLÈTES RÉPERTORIÉS AU**  
**MALI**

Tiré de Camara (2006, p. 10)

Région	Nombre de sites	Quantité (tonnes)
District Bamako	1	8,758
Kayes	16	22,906
Koulikoro	84	40,296
Sikasso	41	20,602
Ségou	15	22,942
Mopti	13	9,214
Gao/Kidal	25	148,768
Tombouctou	29	1,843
TOTAL	224	275,329

**ANNEXE 6**  
**RÉSULTATS DE L'ANALYSE DE DÉVELOPPEMENT DURABLE DES**  
**TECHNOLOGIES**

# Boussole bernoise : Résultats

Projet : Technologie de décontamination de sols contaminés par des pesticides au Mali

Forces et des faiblesses du projet		Champignon de la pourriture blanche						Lavage des sols							
		PÔLE	Critères	Moyenne	s'éloigne du DD		se rapproche du DD		Moyenne	s'éloigne du DD		se rapproche du DD			
0	25%				50%	75%	100%	0		25%	50%	75%	100%		
ENVIRONNEMENT	Gestion de l'eau	100%							25%						
	Qualité de l'eau souterraine	75%							50%						
	Qualité du sol	75%							75%						
	Flux des matériaux	100%							50%						
	Biodiversité	100%							75%						
	Qualité de l'air	100%							67%						
	Consommation d'énergie	91%							50%						
ÉCONOMIE	Emploi	50%							75%						
	Coût de la technologie	75%							63%						
	Technologie	75%							88%						
	Retombée sur l'économie locale	25%							50%						
	Nouvelles technologies	0%							25%						
SOCIÉTÉ	Qualité du paysage	100%							75%						
	Qualité de vie	100%							75%						
	Sécurité	75%							75%						
	Durée des travaux	50%							75%						
	Emploi	50%							50%						
	Disponibilité de la technologie	75%							75%						
	Environnement	88%							53%						
	Économie	65%							70%						
	Société	82%							72%						
	Globale	78%							65%						

Forces et des faiblesses du projet		Biaugmentation					Phytoremédiation				
		Moyenne	s'éloigne du DD		se rapproche du DD			Moyenne	s'éloigne du DD		se rapproche du DD
PÔLE	Critères	0	25%	50%	75%	100%	0	25%	50%	75%	100%
ENVIRONNEMENT	Gestion de l'eau	75%					75%				
	Qualité de l'eau souterraine	75%					100%				
	Qualité du sol	75%					100%				
	Flux des matériaux	75%					100%				
	Biodiversité	75%					75%				
	Qualité de l'air	75%					100%				
	Consommation d'énergie	75%					100%				
	ECONOMIE	Emploi	75%					75%			
Coût de la technologie		75%					50%				
Technologie		88%					50%				
Retombée sur l'économie locale		50%					50%				
Nouvelles technologies		50%					25%				
SOCIÉTÉ	Qualité du paysage	75%					50%				
	Qualité de vie	75%					75%				
	Sécurité	63%					75%				
	Durée des travaux	75%					25%				
	Emploi	50%					50%				
	Disponibilité de la technologie	75%					75%				
		Environnement	75%					95%			
	Économie	76%					50%				
	Société	69%					69%				
	Globale	73%					71%				

Forces et des faiblesses du projet		Oxydation chimique					Désorption thermique								
		PÔLE	Critères	Moyenne	s'éloigne du DD		se rapproche du DD			Moyenne	s'éloigne du DD		se rapproche du DD		
0	25%				50%	75%	100%	0	25%		50%	75%	100%		
ENVIRONNEMENT	Gestion de l'eau	100%							100%						
	Qualité de l'eau souterraine	75%							75%						
	Qualité du sol	75%							75%						
	Flux des matériaux	100%							100%						
	Biodiversité	100%							100%						
	Qualité de l'air	100%							100%						
	Consommation d'énergie	91%							91%						
ECONOMIE	Emploi	50%							50%						
	Coût de la technologie	75%							75%						
	Technologie	75%							75%						
	Retombée sur l'économie locale	25%							25%						
	Nouvelles technologies	0%							0%						
SOCIÉTÉ	Qualité du paysage	100%							100%						
	Qualité de vie	100%							100%						
	Sécurité	75%							75%						
	Durée des travaux	50%							50%						
	Emploi	50%							50%						
	Disponibilité de la technologie	75%							75%						
	Environnement	65%						74%							
	Économie	61%						60%							
	Société	71%						75%							
	Globale	66%						70%							

Forces et des faiblesses du projet		Landfarming					Bioréacteur				
		s'éloigne du DD					se rapproche du DD				
PÔLE	Critères	Moyenne 0	25%	50%	75%	100%	Moyenne 0	25%	50%	75%	100%
ENVIRONNEMENT	Gestion de l'eau	100%					100%				
	Qualité de l'eau souterraine	75%					75%				
	Qualité du sol	75%					75%				
	Flux des matériaux	100%					100%				
	Biodiversité	100%					100%				
	Qualité de l'air	100%					100%				
	Consommation d'énergie	91%					91%				
ECONOMIE	Emploi	50%					50%				
	Coût de la technologie	75%					75%				
	Technologie	75%					75%				
	Retombée sur l'économie locale	25%					25%				
	Nouvelles technologies	0%					0%				
SOCIÉTÉ	Qualité du paysage	100%					100%				
	Qualité de vie	100%					100%				
	Sécurité	75%					75%				
	Durée des travaux	50%					50%				
	Emploi	50%					50%				
	Disponibilité de la technologie	75%					75%				
	Environnement	75%					64%				
	Économie	69%					75%				
	Société	70%					75%				
	Globale	71%					71%				

Forces et des faiblesses du projet		Incinération				
		Moyenn	0	25%	50%	75%
PÔLE	Critères					
ENVIRONNEMENT	Gestion de l'eau	100%				
	Qualité de l'eau souterraine	75%				
	Qualité du sol	75%				
	Flux des matériaux	100%				
	Biodiversité	100%				
	Qualité de l'air	100%				
	Consommation d'énergie	91%				
ECONOMIE	Emploi	50%				
	Coût de la technologie	75%				
	Technologie	75%				
	Retombée sur l'économie locale	25%				
	Nouvelles technologies	0%				
SOCIÉTÉ	Qualité du paysage	100%				
	Qualité de vie	100%				
	Sécurité	75%				
	Durée des travaux	50%				
	Emploi	50%				
	Disponibilité de la technologie	75%				
	Environnement	79%				
	Économie	65%				
	Société	67%				
	Globale	70%				