

Université du Québec
INRS-Eau, Terre et Environnement

**Étude du comportement des matériaux énergétiques dans la zone
non saturée du champ de tirs anti-chars Arnhem, Valcartier**

Par

Nathalie Arel

Mémoire présenté pour l'obtention
du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)

Jury d'évaluation

Examineur interne

René Therrien, ing., Ph.D.
Université Laval

Examineur externe

Sonia Thiboutot, Ph.D.
RDDC-Valcartier

Directeur de recherche

Richard Martel, ing., Ph.D.
INRS-Eau, Terre et Environnement

Codirecteur de recherche

René Lefebvre, ing., jr., Ph.D.
INRS-Eau, Terre et Environnement

Janvier 2004



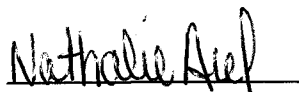
RÉSUMÉ

Le champ de tirs anti-chars Arnhem est utilisé, depuis les années 1970, pour les entraînements à feu réel sur la base militaire de Valcartier. Les munitions utilisées lors des pratiques sont des roquettes M72 dont la charge explosive est faite de 300 g d'Octol (70% HMX et 30% TNT). Les roquettes M72 ont un haut taux de ratés (jusqu'à 40%) et lorsqu'elles n'explosent pas, la charge explosive qu'elles contiennent se répand à la surface du sol. Lors des événements de précipitation comme la fonte des neiges et la pluie, les matériaux énergétiques (ME) contenus dans la charge sont dissous et s'infiltrent dans le sol au travers de la zone non saturée et atteignent l'eau souterraine de l'aquifère sous-jacent.

Les travaux de cette étude ont porté sur la caractérisation de la zone non saturée. Cinq casiers lysimétriques ont été installés à des profondeurs de 0,5 et 1 m à trois endroits. Des morceaux d'Octol et un traceur conservatif (NaCl) ont été épandus à la surface de chaque casier pour suivre l'infiltration de l'eau de fonte des neiges et de la pluie et observer le transport et la transformation des ME sous les conditions du site. Les résultats démontrent que le TNT et le HMX n'ont pas le même comportement. Le TNT semble se transformer et n'est que ponctuellement détecté dans l'eau d'infiltration. Le HMX est régulièrement détecté dans l'eau d'infiltration mais à concentrations variables. Il ne semble pas se transformer ni s'adsorber au sol. Sa mise en solution à partir de l'Octol semble être reliée aux événements de précipitations qui contrôlent aussi son transport dans le sol.

D'autres expériences ont aussi été faites en laboratoire afin de reproduire le comportement des ME sous des conditions non saturées en eau du sol. Il y a d'abord eu des essais dans 4 colonnes de larges dimensions (diamètre de 0,21 m). De l'Octol et un traceur (NaCl) ont été épandus à la surface de chaque colonne. Des essais en microcosmes ont aussi évalué la transformation et la minéralisation des ME sous des conditions non saturées et aérobies. L'ensemble de ces essais ont démontré que le TNT se transforme sans toutefois se minéraliser tandis que le HMX ne se transforme pas et ne minéralise pas non plus.

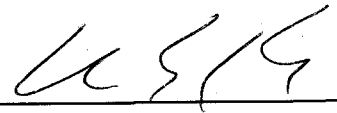
Le modèle numérique VS2D a été utilisé pour mieux comprendre l'écoulement de l'eau et le transport du HMX dans la zone non saturée. Les paramètres de l'écoulement, comme les paramètres de van Genuchten, ont pu être définis en faisant la modélisation de l'essai de traceur. La modélisation du HMX a permis de déduire les concentrations de HMX émises lors des différents événements d'infiltration mais surtout de mieux comprendre la dissolution du HMX en plus d'observer l'effet de la diffusion sur le transport du HMX. Ainsi, la quantité de HMX mise en solution dans l'eau ne dépend pas seulement des quantités de précipitation mettant de l'eau en contact avec l'Octol, mais aussi de la durée des précipitations et de leur fréquence.



Nathalie Arel
Étudiante



Richard Martel
Directeur de recherche



René Lefebvre
Codirecteur de recherche

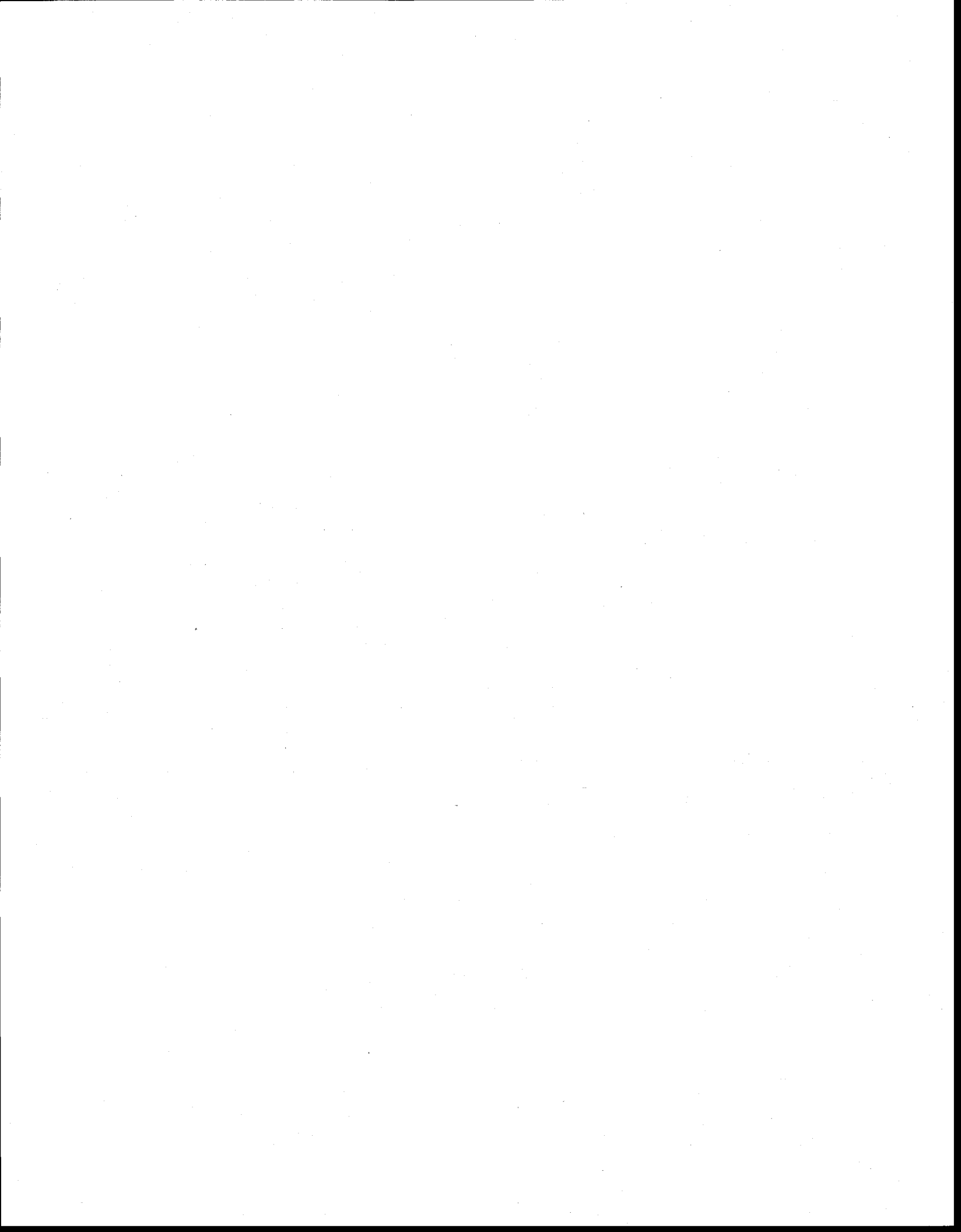
ABSTRACT

The Arnhem anti-tank range, located at the Valcartier military base, has been used since the 70's for livefire military training. The rockets used for training, the M72, had an explosive charge made from Octol (70% HMX and 30% TNT). M72 had a high misfire rate, up to 40%, and unexploded charges remained on the soil surface. HMX and TNT were dissolved during infiltration events following rain and snowmelt and reached the underlying groundwater.

This study focused mainly on the characterisation of the vadose zone. Five lysimeter boxes were installed at 0.5 and 1 m depth. Octol pieces and sodium chloride were spread at the soil surface to follow water infiltration and EM transport and transformation in the vadose zone. Results showed that TNT and HMX did not have the same behaviour. TNT seems to transform and was almost undetected in water. HMX did not seem to be transformed or adsorbed in the soil. HMX was detected in water in variable concentrations. Its dissolution from Octol flakes seems to depend on precipitation events that also control its transport into the soil.

Tests were also performed in the laboratory to simulate the unsaturated zone. Four large column tests were performed to follow the transport of a tracer (NaCl) and Octol flakes spread at the soil surface. Microcosms tests evaluated the degradation and the mineralisation of EM under unsaturated and aerobic conditions. These tests showed TNT transformation but no TNT mineralisation. HMX did not transform or mineralise.

A numerical model, VS2D, was used to better understand water flow and HMX transport in the vadose zone. Flow parameters were evaluated from the modeling of the tracer test. HMX transport modeling allowed to infer HMX concentrations related to water infiltration and provided an explanation of HMX dissolution in Octol flakes. Modeling also showed that diffusion affects HMX transport. Thus, the amount of HMX in solution in water infiltration did not only depend on the amount of precipitation in contact with Octol, but also depended on the duration and the frequency of the precipitation.



REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier Richard Martel, mon directeur de recherche à l'INRS-ETE, pour m'avoir permis de travailler sur ce projet de recherche, pour le temps qu'il m'a consacré et pour son aide sur le terrain. Je tiens aussi à remercier René Lefebvre, mon codirecteur à l'INRS-ETE, pour tout le temps qu'il m'a consacré pendant l'année sabbatique de Richard malgré son horaire très chargé.

Je veux aussi remercier Sonia Thiboutot et Guy Ampleman de RDDC-Valcartier pour le soutien financier apporté au projet ainsi que pour le temps qu'ils m'ont accordé pour répondre mes questions. Je tiens à souligner l'importance du travail d'analyses effectué par les membres de leur équipe, particulièrement Annie Gagnon et Mélanie Bouchard. Je dois aussi remercier Jalal Hawari de l'Institut de Recherche en Biotechnologie qui m'a permis d'aller effectuer des essais dans son laboratoire et aussi tout le personnel qui s'est si bien occupé de moi lors de mon passage là-bas, particulièrement Claude Masson.

Je ne peux passer sous silence l'aide de Luc Trépanier lors de mes travaux de terrain, mais aussi lors de la planification de mes essais en colonne. Je veux aussi remercier les étudiants (Michel Mailloux, Thomas Robert, Alexandre Boutin et Andréanne Hamel) et aussi Uta Gabriel et Jean-Marc Ballard pour être venus m'aider sur le terrain.

Enfin, je voudrais remercier François, pour m'avoir encouragé et soutenu pendant les moments de découragement et pour avoir partagé avec moi les moments plus joyeux.

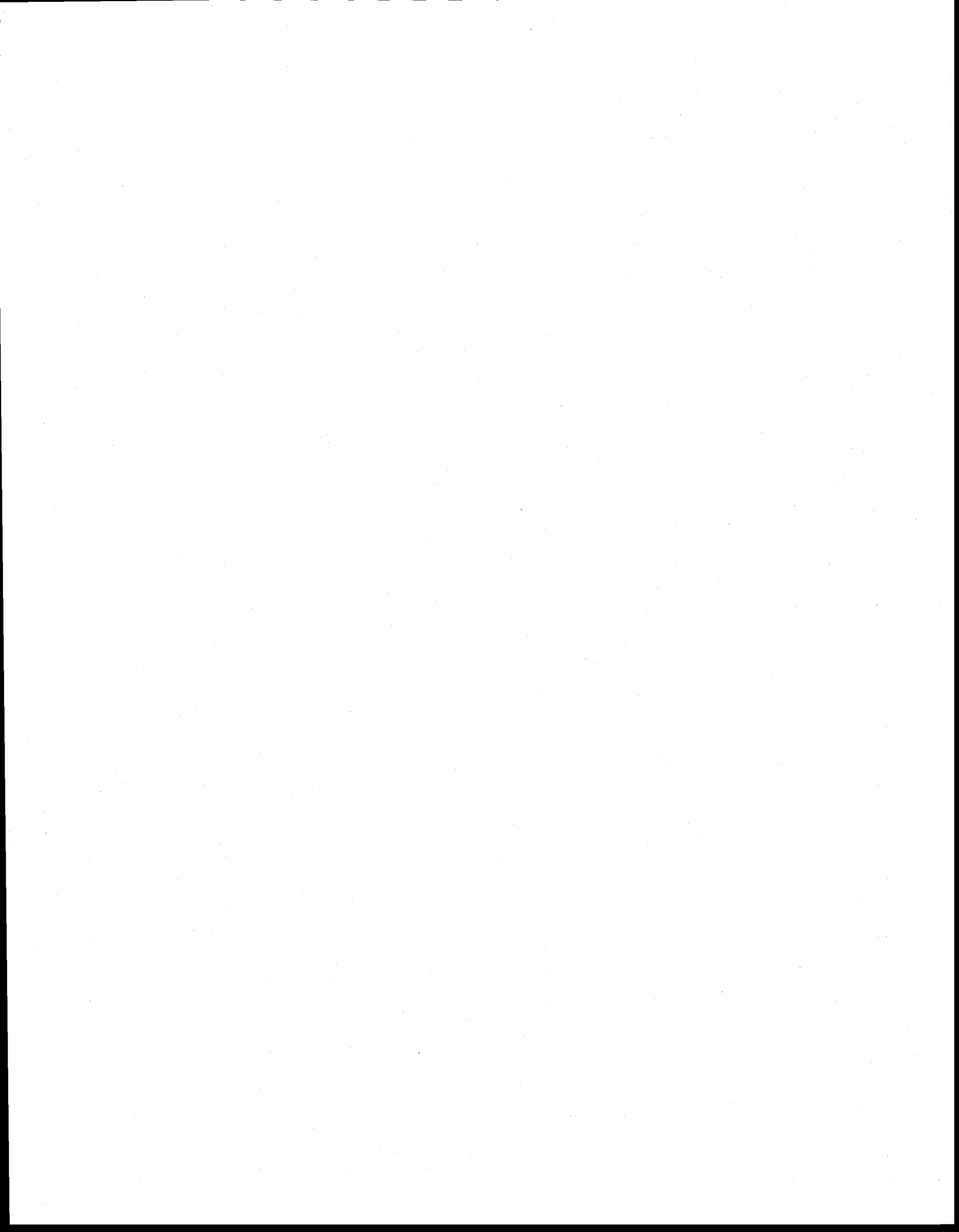


TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	iii
ABSTRACT.....	v
REMERCIEMENTS.....	vii
Liste des figures.....	xiii
Liste des tableaux.....	xv
Chapitre 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Contexte du projet.....	1
1.2 Problématique	2
1.3 Objectifs.....	3
1.4 Méthodologie	3
1.4.1 Travaux de terrain.....	4
1.4.2 Travaux de laboratoire	4
1.4.3 Modélisation numérique	5
1.5 Structure du mémoire.....	5
Chapitre 2 PROCESSUS AFFECTANT LE COMPORTEMENT DES MATÉRIAUX ÉNERGÉTIQUES DANS LA ZONE NON SATURÉE DU SOL.....	9
2.1 Caractéristiques générales.....	9
2.2 Comportement des matériaux énergétiques	10
2.2.1 État solide (forme cristalline).....	11
2.2.2 Dissolution et précipitation	11
2.2.3 Transport.....	13
2.2.4 Adsorption et désorption.....	15
2.2.4.1 TNT et produits de transformation	16
2.2.4.2 RDX et HMX.....	18
2.2.5 Transformation.....	19
2.2.5.1 TNT.....	19

2.2.5.2 RDX et HMX.....	22
2.2.6 Minéralisation.....	24
2.2.6.1 TNT.....	24
2.2.6.2 RDX et HMX.....	24
2.3 Processus abiotiques.....	25
2.3.1 Photolyse ou photodégradation.....	25
2.3.1.1 TNT.....	25
2.3.1.2 RDX et HMX.....	25
2.3.2 Volatilisation.....	26
Chapitre 3 ENERGETIC MATERIAL TRANSPORT IN THE VADOSE ZONE AT AN ANTI-TANK TRAINING RANGE.....	29
3.1 Introduction.....	31
3.2 Methodology.....	34
3.2.1 Field investigations.....	34
3.2.1.1 Lysimeter Boxes.....	35
3.2.1.2 Octol and Chloride Tracer Test.....	37
3.2.2 Laboratory Investigations.....	39
3.2.2.1 Soil Column Tests.....	39
3.2.2.2 Microcosm Tests.....	42
3.2.3 Analytic methods.....	43
3.3 Results.....	44
3.3.1 Field Investigations.....	44
3.3.1.1 Infiltration.....	44
3.3.1.2 Tracer Test and EM Analyses.....	46
3.3.1.3 Emissions of EM on the Arnhem range.....	53
3.3.2 Laboratory Investigations.....	54
3.3.2.1 Soil Column Tests.....	54
3.3.2.2 Microcosms Tests.....	59
3.4 Discussion and conclusion.....	62
3.4.1 EM fate and behaviour in the vadose zone on Arnhem range.....	62

3.4.1.1 TNT and HMX dissolution in Octol.....	62
3.4.1.2 TNT transport and transformation.....	63
3.4.1.3 HMX and RDX.....	64
3.4.1.4 Conceptual model.....	65
3.5 Main conclusions.....	66
Chapitre 4 MODÉLISATION NUMÉRIQUE.....	69
4.1 Choix et description des paramètres du modèle.....	69
4.2 Modélisation des essais de terrain.....	70
4.2.1 Paramètres du modèle des casiers L2-100 et L2-50.....	71
4.2.1.1 Propriétés du domaine du modèle des casiers L2-100 et L2-50.....	71
4.2.1.2 Paramètres de l'écoulement du modèle des casiers L2-100 et L2-50.....	72
4.2.1.3 Paramètres de transport du modèle des casiers L2-100 et L2-50.....	73
4.2.1.4 Périodes de recharge du modèle des casiers L2-100 et L2-50.....	74
4.2.1.5 Application du traceur et du HMX dans le modèle des casiers L2-100 et L2-50.....	77
4.2.2 Résultats de la modélisation des essais dans les casiers L2-100 et L2-50.....	78
4.2.2.1 Modélisation de l'écoulement dans le modèle des casiers L2-100 et L2-50.....	78
4.2.2.2 Modélisation du transport du traceur et du HMX dans les casiers L2-100 et L2-50.....	80
4.2.2.3 Erreurs sur les bilans de masse dans le modèle des casiers L2-100 et L2-50.....	85
4.3 Modélisation des essais de laboratoire.....	86
4.3.1 Paramètres du modèle de la Colonne 4.....	86
4.3.1.1 Propriétés du domaine du modèle de la Colonne 4.....	86
4.3.1.2 Paramètres de l'écoulement du modèle de la Colonne 4.....	87
4.3.1.3 Paramètres de transport du modèle de la Colonne 4.....	87
4.3.1.4 Périodes de recharge du modèle de la Colonne 4.....	88
4.3.1.5 Application du traceur et du HMX dans le modèle de la Colonne 4.....	88
4.3.2 Résultats de la modélisation de l'essai de la Colonne 4.....	89
4.3.2.1 Modélisation de l'écoulement de la Colonne 4.....	89

4.3.2.2	Modélisation du transport du traceur et du HMX dans la Colonne 4	90
4.3.2.3	Erreurs sur les bilans de masse dans le modèle de la Colonne 4	93
4.4	Discussion sur les résultats de la modélisation	93
4.4.1	Paramètres de l'écoulement	93
4.4.2	Transport des chlorures	95
4.4.3	Transport du HMX	96
4.4.4	Erreurs sur le bilan de masse	98
4.5	Conclusion.....	98
 Chapitre 5 CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET RECOMMANDATIONS.....		103
5.1	Conclusions	103
5.2	Recommandations	107
 RÉRÉRENCES		109
 ANNEXES		119

LISTE DES ANNEXES

- ANNEXE A Article présenté dans un compte-rendu de conférence de l'AIH :
«Dissolved energetic materials transport under unsaturated conditions at an anti-tank training range»
- ANNEXE B Résultats détaillés d'échantillonnage et d'analyse des essais effectués sur chaque casier lysimétrique
- ANNEXE C Protocole des essais en colonne
- ANNEXE D Résultats détaillés de l'échantillonnage et de l'analyse des essais en colonne
- ANNEXE E Protocole des essais en microcosme
- ANNEXE F Dates d'échantillonnage et résultats détaillés des essais en microcosme
- ANNEXE G Exemple d'un fichier produit par le modèle VS2D

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1. Structure moléculaire du TNT, HMX et RDX	10
Figure 2.2. Phases du TNT, du RDX et du HMX.....	11
Figure 3.1. Arnhem anti-tank range	32
Figure 3.2. Groundwater flow directions	32
Figure 3.3. Surficial geology and cross section of the Arnhem range	33
Figure 3.4. Location of the instrumentation for vadose zone monitoring at the Arnhem range	35
Figure 3.5. Lysimeter boxes set up	36
Figure 3.6. Column tests set up.....	40
Figure 3.7. Cumulative infiltration in each lysimeter box.	46
Figure 3.8. Breakthrough curves for lysimeter boxes experiment.....	47
Figure 3.9. Chloride recovery for lysimeter boxes experiment	48
Figure 3.10. HMX trends associated to the HMX dissolution in water recovered in lysimeter boxes	49
Figure 3.11. Cumulative mass of HMX recovered in infiltrated water in lysimeter boxes	50
Figure 3.12. EM concentration at the end of the experiment in the first 15 cm soil samples	52
Figure 3.13. HMX emission in lysimeter boxes	54
Figure 3.14. Chloride breakthrough curves for soil column tests.....	56
Figure 3.15. Recovery of chloride in soil column tests.....	57
Figure 3.16. HMX breakthrough curves in soil column tests	57
Figure 3.17. HMX cumulative mass in soil column tests	58
Figure 3.18. Microcosm results.....	60
Figure 3.19. Transformation kinetics for TNT.....	61
Figure 3.20. Mineralisation of TNT and HMX.....	61

Figure 4.1.	Caractéristiques du domaine associées au casier lysimétrique L2-50	72
Figure 4.2.	Conditions imposées aux limites du modèle des casiers.....	75
Figure 4.3.	Taux d'infiltration d'eau au haut du casier L2-100	79
Figure 4.4.	Hauteur d'eau récupérée au bas des casiers L2-100 et L2-50.....	80
Figure 4.5.	Concentration de chlorure dans l'eau d'infiltration au haut du casier L2-100	81
Figure 4.6.	Concentration et masse de chlorure dans l'eau récupérée au bas du casier L2-100.....	82
Figure 4.7.	Concentration et masse de chlorure dans l'eau récupérée au bas du casier L2-50.....	83
Figure 4.8.	Concentration de HMX dans l'eau d'infiltration au haut du casier L2-100	84
Figure 4.9.	Concentration et masse de HMX dans l'eau récupérée au bas du casier lysimétrique L2-100.....	85
Figure 4.10.	Taux d'infiltration d'eau au haut de la Colonne 4	89
Figure 4.11.	Hauteur d'eau cumulée au haut de la Colonne 4 et hauteur d'eau cumulée récupérée au bas de la Colonne 4.....	90
Figure 4.12.	Concentration et masse de chlorure dans l'eau récupérée au bas de la Colonne 4	91
Figure 4.13.	Concentration de chlorure dans l'eau d'infiltration au haut de la Colonne 4	91
Figure 4.14.	Résultats de modélisation du transport du HMX dans la Colonne 4	92
Figure 4.15.	Concentration de HMX dans l'eau d'infiltration au haut de la Colonne 4 ..	93
Figure 4.16.	Courbes capillaires associées aux paramètres de van Genuchten.....	94
Figure 5.1.	Modèle conceptuel de la zone non saturée du champ de tirs Arnhem.....	106

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1. Coefficient de diffusion moléculaire dans l'air et dans l'eau	12
Tableau 2.2. Solubilité aqueuse des explosifs	12
Tableau 2.3. Coefficient de partition des explosifs	13
Tableau 2.4. Pression de vapeur et constante de Henry des explosifs.....	26
Table 3.1. Soil block description for all lysimeter boxes	37
Table 3.2. Soil properties for lysimeter boxes	37
Table 3.3. Soil characteristics for the column tests	41
Table 3.4. Column characteristics.....	41
Table 3.5. Irrigation conditions.....	42
Table 3.6. Water infiltration in lysimeter boxes for a 330 days period	45
Table 3.7. Octol mass recovery at the soil surface at the end of the lysimeter tests.....	51
Table 3.8. EM concentration at the end of the experiment in the first 15 cm soil samples	51
Table 3.9. EM mass balance in field investigation.....	52
Table 3.10. HMX release in water infiltrated in the lysimeter boxes.....	54
Table 3.11. Irrigation and recovered water in soil column tests.....	55
Table 3.12. EM content in Octol flakes at the end of the column test.....	59
Table 3.13. Conceptual model of EM behaviour at the Arnhem Range.....	66
Tableau 4.1. Paramètres utilisés dans le modèle	71
Tableau 4.2. Propriétés du domaine du modèle des casiers L2-100 et L2-50	72
Tableau 4.3. Paramètres de l'écoulement dans le modèle des casiers L2-100 et L2-50 ...	73
Tableau 4.4. Paramètres de transport du chlorure dans le modèle des casiers L2-100 et L2-50.....	74
Tableau 4.5. Paramètres de transport du HMX dans le modèle du casier L2-100	74
Tableau 4.6. Erreurs sur les bilans de masse dans le casier L2-100	86
Tableau 4.7. Paramètre de l'écoulement dans le modèle de la Colonne 4	87

Tableau 4.8. Paramètre de transport du traceur et du HMX dans le modèle de la Colonne 4.....	88
Tableau 4.9. Erreurs sur les bilans de masse dans le modèle de la Colonne 4	93





CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Contexte du projet

La gestion des sites d'entraînement militaires a été, pendant un grand nombre d'années, limitée aux pratiques militaires, laissant de côté les impacts possibles de leur utilisation sur l'environnement. Cette vision a cependant changé suite à la fermeture d'une réserve militaire du Massachusetts, aux États-Unis, où une problématique de contamination de l'eau souterraine par du RDX a été observée. Au Canada, de nombreuses études et travaux de recherche sont en cours, depuis plusieurs années, dans le but d'évaluer l'impact des activités d'entraînement des bases militaires sur l'environnement.

Ainsi, Recherche et Développement de Défense Canada-Valcartier (RDDC-Valcartier), anciennement le Centre de Recherche pour la Défense Valcartier (CRDV) en collaboration avec l'INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE), ont développé une expertise visant à caractériser et mieux comprendre la problématique reliée à la contamination des sols et de l'eau de surface et souterraine par des matériaux énergétiques et des métaux lourds rencontrés sur les sites d'entraînement militaires dans les différentes bases de l'armée canadienne. Ensemble, ils ont participé à la caractérisation du site d'OB/OD de Dundurn et des Bases des Forces Canadiennes (BFC) de Shilo et Gagetown et à des études hydrogéologiques du champ de tirs anti-chars Arnhem, du champ de tirs à la grenade Vaucelles, de la zone d'impact Leary et de la butte de tirs de RDDC-Valcartier situés sur la base militaire de Valcartier.

Depuis 1995, une caractérisation hydrogéologique est menée sur le champ de tirs anti-chars Arnhem à Valcartier. Les roquettes utilisées lors des entraînements, les M72, ont un taux assez élevé de ratés, jusqu'à 40%. Lorsque les roquettes n'explorent pas, les fissures sur les roquettes laissent échapper de l'Octol (70% HMX avec 1 à 10% de RDX et 30% TNT) sur la surface du sol. Les précipitations comme la neige et la pluie dissolvent les matériaux énergétiques qui forment l'Octol, permettant ainsi leur infiltration dans le sol.

Les travaux effectués jusqu'à 2000 ont principalement porté sur l'étude de la zone saturée et les données obtenues ont servi à l'élaboration d'un modèle numérique 3-D simulant le transport des matériaux énergétiques sous les conditions du champ de tirs Arnhem (Mailloux 2002). Dans ce modèle, des suppositions ont été faites sur le comportement des matériaux énergétiques dans la zone non saturée parce que cette zone n'a pas été directement instrumentée et que peu de données sont disponibles dans la littérature sur le sujet.

1.2 Problématique

Les caractérisations antérieures ont démontré que la zone non saturée occupe une place importante sous la zone d'entraînement du champ de tirs Arnhem. L'épaisseur saturée des sédiments de surface n'atteint pas 1 mètre dans ce secteur (Mailloux et al. 2000). Les conditions aérobies retrouvées dans la zone non saturée ont donc une influence non négligeable sur le comportement des matériaux énergétiques lorsqu'ils s'écoulent vers l'eau souterraine.

Jusqu'à maintenant, le comportement (transport et transformation) des matériaux énergétiques en conditions non saturées ou aérobies a été étudié principalement en laboratoire (TNT : Boopathy et al. 1994, Bradley et Chapelle 1995, Brannon et al. 1997, Comfort et al. 1995, Gilcrease et Murphy 1995, Haïdour et Ramos 1996, McCormick et al. 1976, Myers et al. 1998, Shackmann et Müller 1991, Vorbeck et al. 1998, Webb et al. 1999; HMX et RDX : Binks et al. 1995, Coleman et al. 1998, McCormick et al. 1981, Myers et al. 1998, Speitel et al. 2001) mais peu d'études rapportent des observations prises directement sur le terrain sauf celle de Hains (2002).

1.3 Objectifs

Ce projet de maîtrise a été réalisé dans le cadre d'un partenariat entre RDDC-Valcartier et l'INRS-Eau, Terre et Environnement et fait suite à l'étude de Mailloux et al. (2000 et 2001) et Mailloux (2002). Les objectifs de ce mémoire sont principalement les suivants :

- Évaluer le comportement des matériaux énergétiques dans la zone non saturée du champ de tirs Arnhem;
- Évaluer la transformation des matériaux énergétiques en conditions aérobies représentatives de la zone non saturée;
- Évaluer le flux de HMX dans le sol en conditions de terrain;
- Élaborer un modèle conceptuel expliquant le comportement des matériaux énergétiques dans la zone non saturée du champ de tirs Arnhem;
- Intégrer les données obtenues dans un modèle numérique simulant le transport en une dimension.

1.4 Méthodologie

La méthodologie employée pour réaliser ce projet de maîtrise est divisée en trois grandes phases, soient les travaux de terrains, les travaux de laboratoire et la modélisation numérique.

1.4.1 Travaux de terrain

La zone non saturée du champ de tirs Arnhem a été instrumentée à l'aide de deux types d'installation, des casiers lysimétriques et des lysimètres à succion. Cinq casiers lysimétriques ont été installés en périphérie du champ de tirs à des profondeurs de 0,5 et 1 m. Un essai de traceur à l'aide de morceaux d'Octol et de chlorure de sodium (NaCl) a été réalisé sur chacun des casiers. Des échantillons d'eau provenant des casiers ont été prélevés après chaque événement de précipitation-infiltration de décembre 2000 à octobre 2001. Les échantillons d'eau récupérés ont été analysés pour leur contenu en chlorure (traceur), en matériaux énergétiques et leurs produits de transformation. Les analyses des échantillons d'eau pour la teneur en matériaux énergétiques ont été effectuées par le personnel de RDDC-Valcartier. Ces essais ont permis d'avoir des données sur le transport et le comportement des matériaux énergétiques sous des conditions de terrain.

Quatre lysimètres à succion ont été installés, aussi en périphérie du champ de tirs. Un essai de traceur avec seulement du NaCl a été fait sur la surface au-dessus des lysimètres. Peu de données ont été obtenues à partir de ces essais, elles n'ont donc pas été considérées lors de l'interprétation des résultats. Par contre, la méthodologie employée pour l'installation et pour l'épandage du traceur est présentée en annexe dans un article publié dans un compte-rendu de conférence de l'AIH (Arel et al. 2002).

1.4.2 Travaux de laboratoire

À la suite des essais de terrain, des essais de laboratoire ont été réalisés. Des essais en colonne en conditions non saturées ont été réalisés au laboratoire FCI (Fondation Canadienne pour l'Innovation) de l'INRS-RDDC à Valcartier. Quatre colonnes de dimensions allant de 0,5 m à 3,3 m de hauteur et de 0,21 m de diamètre ont été montées. Un essai de traceur à l'aide de chlorure et d'Octol en morceaux a été réalisé sur la surface de chaque colonne. Un système automatisé permettait l'irrigation des colonnes en surface en reproduisant les conditions de précipitation retrouvées sur le champ de tirs Arnhem pendant l'automne, l'hiver et au printemps. La simulation a été faite sur une période de 5

mois, de février 2002 à juin 2002. Des échantillons d'eau ont été prélevés régulièrement à la base des colonnes et ont été analysés pour leur contenu en chlorure (traceur), en matériaux énergétiques et leurs produits de transformation. Ces essais se voulaient une reproduction des essais de terrain mais sous des conditions contrôlées qui nous permettait de mieux définir les paramètres de transport et le comportement des matériaux énergétiques sous des conditions non saturées.

Des essais en microcosme froids et radioactifs ont aussi été réalisés en laboratoire entre les mois de juin 2002 et décembre 2002. Les microcosmes froids ont permis d'avoir des données sur la transformation des matériaux énergétiques sous des conditions aérobies tandis que les microcosmes radioactifs portaient sur la minéralisation des matériaux énergétiques. Ces essais ont été réalisés dans les laboratoires de l'Institut de Recherche en Biotechnologie (IRB) à Montréal et les analyses pour les matériaux énergétiques ont été effectuées par le personnel de l'IRB.

1.4.3 Modélisation numérique

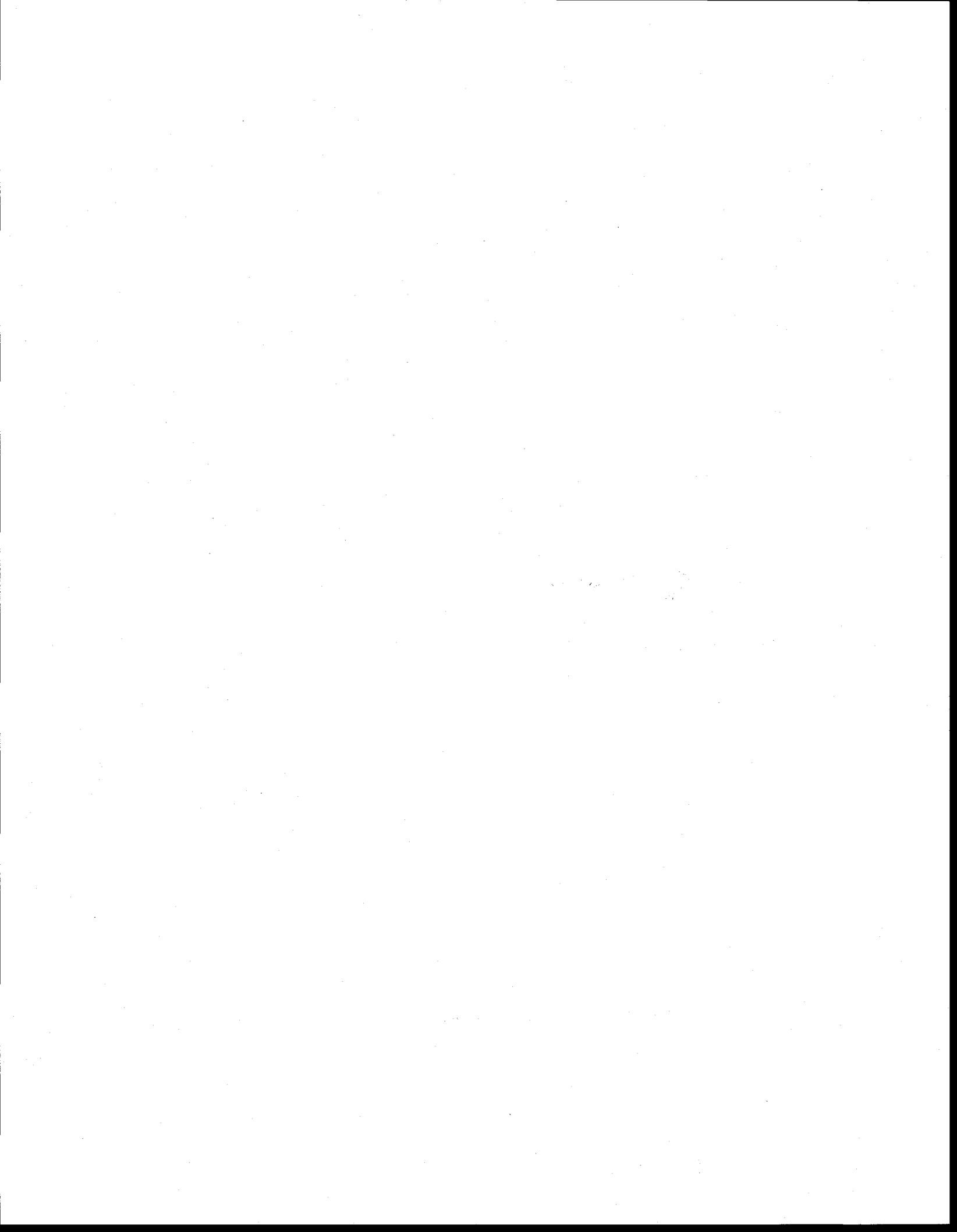
Certains des essais de terrain et de laboratoire ont été modélisés à l'aide d'un modèle d'écoulement et de transport à saturation variable, le VS2D (Lappala et al. 1993 et Healy 1990). Cette modélisation a permis d'obtenir les paramètres d'écoulement de l'eau et de transport pour les chlorures et le HMX.

1.5 Structure du mémoire

Le mémoire, outre l'introduction se divise en 4 chapitres. Le CHAPITRE 2 présente une revue des phénomènes pouvant affecter le comportement (transport et transformation) des matériaux énergétiques sous des conditions aérobies, présentes dans la zone non saturée. Le CHAPITRE 3 contient le manuscrit d'un article qui sera soumis pour publication dans le futur. Ce chapitre donne d'abord de façon détaillée la méthodologie employée lors de la caractérisation de la zone non saturée sur le terrain et en laboratoire. Ce chapitre présente aussi, à l'aide de plusieurs tableaux et graphiques, l'analyse des résultats obtenus

et le modèle conceptuel expliquant le comportement des matériaux énergétiques dans la zone non saturée. Le CHAPITRE 4 présente les résultats de la modélisation numérique de certains essais de terrain et de laboratoire et de nouvelles explications sur le comportement du HMX dans la zone non saturée déduites de la modélisation. Le CHAPITRE 5 présente les conclusions et les recommandations qui aideront à la poursuite de la recherche dans ce domaine.

Une série d'annexes est présentée à la fin du mémoire. L'annexe A contient un article publié dans un compte-rendu de conférences (Arel et al. 2002), les résultats des essais de terrain sont présentés à l'annexe B. Les protocoles et les résultats des essais de laboratoire se retrouvent aux annexes C à F. L'annexe G présente un exemple des fichiers produits par le modèle numérique VS2D pour la modélisation du transport du chlorure et du HMX dans la Colonne 4.





CHAPITRE 2

PROCESSUS AFFECTANT LE COMPORTEMENT DES MATÉRIAUX ÉNERGÉTIQUES DANS LA ZONE NON SATURÉE DU SOL

L'Octol est composé d'un mélange de deux matériaux énergétiques (ME), le HMX (70%) et le TNT (30%). Du RDX peut être retrouvé dans l'Octol parce qu'il constitue une impureté de fabrication du HMX (Yinon 1990 dans Card et Autenrieth 1998). Dans l'Octol, la proportion de RDX dans le HMX peut atteindre 10% du contenu en HMX. Ces trois composés ont des caractéristiques et des propriétés différentes. Les matériaux énergétiques sont des contaminants organiques composés principalement de carbone, d'azote et d'hydrogène. Le TNT est un nitroaromatique tandis que le HMX et le RDX sont des nitroamines (McGrath 1995).

2.1 Caractéristiques générales

Le TNT est un explosif que l'on retrouve sous forme solide de couleur jaune et qui n'a pas d'odeur (ATSDR 1996a). La molécule de TNT a une structure qui comporte un cycle aromatique autour duquel se retrouvent des groupements nitro (NO_2^-), des groupements méthyles et des groupements amines (figure 2.1). La présence des groupements nitro crée un déséquilibre électrique à l'intérieur de la molécule ce qui rend la molécule plus sensible aux transformations (Hains 2002). Les groupements méthyles agissent comme donneurs d'électrons et sont aussi sensibles à l'attaque de certaines bactéries. Les groupements amines ont un rôle important au niveau de l'adsorption (Hains 2002).

Le RDX est une poudre blanche très explosive (ATSDR 1996b). Le RDX a été développé pendant la 2^e Guerre mondiale. RDX est l'abréviation de «Research Department eXplosive» ou «Royal Demolition eXplosive». Le RDX est connu sous plusieurs appellations comme le cyclonite, l'hexogène ou l'hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (Card et Autenrieth 1998). La molécule du RDX consiste en un anneau de six atomes de carbone et d'azote alternés avec un groupement nitro (NO_2^-) sur l'anneau d'azote et un