

Une description détaillée du problème des mines pour les militaires, une comparaison entre déminages militaire et humanitaire, un résumé des recherches et études effectuées dans ces deux domaines en France, l'article ci-dessous aborde tous ces points. Il est reproduit ici avec les autorisations de l'auteur et de l'éditeur de la revue.

article publié dans LA REVUE défense nationale, décembre 1998

Adresse géographique : École militaire, 1 place Joffre, Paris 7e

Adresses postales : BP 8607, 75325 Paris cedex 07 ou BP 64, 00445 Armées

E-Mail : redac@revuedefensenationale.com

Sciences et techniques de déminage

ICA Jacques VERMOREL

Adjoint Scientifique de la Direction de l'Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis
(anciennement)

Résumé

Une certaine pression médiatique amène le thème du déminage au premier plan des priorités nationales et internationales. Il en résulte une profusion de projets devant déboucher à assez court terme sur des démonstrateurs. Au niveau des études fondamentales, il y a matière à de grands progrès, qui devront passer par la constitution d'équipes très interdisciplinaires. Dans divers domaines, l'ISL pourra sans doute jouer un rôle important, grâce au projet déminage, et en s'appuyant sur de nécessaires coopérations.

1. Les antécédents

La mine tire son nom des galeries souterraines destinées à saper les bases des remparts des anciennes places fortes. Par analogie, les premières mines antichar étaient censées immobiliser, voire renverser les véhicules blindés. C'est la dernière guerre mondiale qui a réellement vu l'utilisation des mines prendre une autre dimension : le monde militaire passe alors de la guerre de siège où les champs de mines servent de fortifications avancées, à la guerre de mouvement, où les mines doivent ralentir et gêner le mouvement des unités motorisées. Lors de ce conflit, les mines ont été utilisées intensément : mines sous-marines pour bloquer l'accès aux ports ou les voies navigables, mines antichar pour ralentir les blindés, mines antipersonnel pour condamner des passages destinés aux troupes à pied, ou pour compléter et protéger un dispositif de mines antichar.

Une nouvelle utilisation des mines antipersonnel s'est généralisée depuis les trente dernières années : elles servent de moins en moins contre des objectifs militaires, et de plus en plus contre des populations civiles. Le faible prix de certaines mines produites industriellement (environ 10 dollars l'unité) permet de polluer des zones agricoles, des voies de communication, des abords d'agglomération. La mine antipersonnel devient ainsi une arme économique et politique qui sert à asphyxier ou à déstabiliser une région, une tribu, une faction.

C'est cette utilisation de moins en moins militaire des mines qui émeut les organismes humanitaires, puis, par ricochets successifs les médias, l'opinion publique et les pouvoirs politiques : il en a résulté, de façon visible en 1997, l'attribution du prix Nobel de la paix à Mme Jody Williams, militante en faveur du bannissement total des mines antipersonnel, et l'élaboration de la Convention d'Ottawa qui vient d'être ratifiée par un grand nombre de pays (pratiquement tous les pays d'Europe Occidentale), mais à l'exclusion de la Russie, de la Chine, et des États-Unis. Celle-ci limite très fortement l'emploi des mines, en se basant sur la notion juridique "d'effets traumatisants excessifs ou frappant sans discrimination". De façon plus discrète, mais sensible, les budgets affectés aux améliorations techniques des systèmes de déminage se sont accrus. Les acteurs se sont multipliés de façon notable dans ce domaine. En effet, du fait de l'accroissement de la demande, des laboratoires et des industries se sont lancés à la conquête du marché du déminage. Mais surtout de nouveaux donneurs d'ordre sont apparus : tenant compte de l'aspect philanthropique et médiatique du sujet, le Congrès aux États-Unis, le Parlement Européen et la Commission Européenne se sont aussi emparés du sujet et ont distribué des subsides. Aux États-Unis, le Congrès a chargé le Département de la Défense de mener pour son compte des études de déminage. En Europe, l'article 233 du traité de Rome exclut du domaine communautaire "la protection des intérêts essentiels de sécurité et [...] la production [...] d'armes, de munitions ou de matériel de guerre". Dès lors, compte tenu de la sacro-sainte séparation entre le domaine communautaire et les affaires de défense, la Commission européenne s'est chargée elle-même de lancer des appels d'offre sur les techniques de déminage. Ceci n'a pas été sans poser quelques problèmes : les industriels ou laboratoires compétents sont souvent à vocation militaire, ce qui n'est pas un critère favorable pour être retenu par la Commission ; le domaine était assez différent de celui que traite la Commission, qui a cependant préféré ne pas utiliser les experts que lui proposaient les pays de l'union de l'Europe Occidentale, pour les mêmes raisons ; finalement, les quelques 15 millions d'euros prévus au budget 1998 de la Commission pour effectuer des recherches dans le domaine seront dépensés de façon totalement désynchronisée du budget que chaque État, seul ou en coopération, va mettre en oeuvre par les soins de son ministère de la défense.

2. Les contraintes opérationnelles du déminage : déminage civil et déminage militaire

Le minage et le déminage constituent des domaines extrêmement variés : ils dépendent de la tactique employée, de l'environnement et du millier de modèles de mines terrestres actuellement disponibles. Cependant, le déminage peut arbitrairement se scinder en deux sous-domaines : le déminage effectué par des militaires en opération, et le déminage fait dans le cadre d'opérations humanitaires après un conflit.

Les **objectifs** du déminage militaire sont de trois types :

- soit nettoyer des bandes de terrain, pour créer des brèches et faciliter la progression,
- soit nettoyer des routes et leurs abords,
- soit dégager des zones pour le déploiement et le stationnement d'unités et de matériels.

Les objectifs humanitaires se rapprochent plus de ce dernier type : déminer un champ de bataille pollué, ou nettoyer des zones pour permettre une utilisation civile du terrain.

La **menace** à laquelle doivent faire face les démineurs militaires consiste en tous types de mines, en munitions non explosées et en nouvelles mines dites "hors itinéraire" qui interdisent, à distance, un accès. La menace pour l'humanitaire est la même, mais avec une forte priorité donnée aux mines antipersonnel et aux munitions.

La **menace future**, les **dispositions des mines** et les **environnements** à considérer sont les mêmes dans les deux cas, si ce n'est que les missions humanitaires ont parfois à traiter des mines déposées depuis des années, investies par la végétation ou recouvertes de plusieurs dizaines de centimètres de sédiments - voire de mètres de sable sur certains sites d'Égypte.

Les **fenêtres opérationnelles** sont, pour les militaires, de vingt-quatre heures sur vingt-quatre, avec une capacité maintenue par tous les temps, de jour comme de nuit. Par contre, le déminage humanitaire est compatible avec une activité uniquement diurne et par beau temps.

Le commandement militaire a le **choix de la zone** à déminer et il peut décider de déminer certaines bandes de terrain et se contenter de marquer d'autres zones. Au contraire, le démineur humanitaire n'a pas de choix possible. Pour le déminage militaire, la surface à traiter est limitée et consiste souvent en une bande de terrain, alors que les surfaces concernées par l'humanitaire sont généralement très étendues : on raisonne alors en termes de champs, de collines, de vallées.

Le **temps disponible** pour le déminage peut être très court dans les opérations militaires, alors que dans le cadre humanitaire plusieurs cycles de détection et de neutralisation sont possibles sur la même zone.

L'**enlèvement des matériels** dangereux achève la mise hors de danger du champ de bataille. Ce n'est pas une mission militaire, alors qu'en opération humanitaire, tous les matériels dangereux et les débris doivent être évacués.

Les **démineurs** militaires sont des professionnels du Génie, alors que le déminage humanitaire peut se faire par des militaires, par des civils sous contrat, et le plus souvent par la population locale plus ou moins formée sur le tas.

En combat, un compromis doit être trouvé entre la **sécurité** du démineur militaire et sa mission. Par contre, hors combat, la sécurité revêt une très grande importance. Dans les opérations humanitaires, la sécurité est toujours primordiale.

En ce qui concerne le **matériel**, dans le cadre d'opérations militaires, celui-ci doit avoir un coût compatible avec les missions, et une logistique associée également compatible avec les standards militaires. Il est par ailleurs préférable que ce matériel soit produit dans un pays allié ou contrôlé, à défaut de fabrication nationale. Pour l'utilisation humanitaire, il faut tenir compte du fait que l'ensemble du budget est faible, car le problème du déminage se pose essentiellement dans les pays du tiers monde. Aussi le coût du matériel doit s'inscrire dans les capacités financières locales ou humanitaires internationales ; la production doit si possible être locale, avec une logistique très rustique, un faible entretien, une utilisation simple et un apprentissage facile.

Le **niveau d'efficacité** du déminage souhaité pour les missions militaires est de l'ordre de 95%. Pour les opérations humanitaires, l'efficacité demandée avoisine les 100%. Notons qu'il y a encore loin des souhaits à la réalité, si l'on compare ces chiffres aux objectifs d'un démonstrateur américain en cours de financement (le CIMMD : *close in man portable mine detector*) : les probabilités recherchées de détection sont respectivement de 50%, 92%, 80% et 92% pour les mines antipersonnel non métalliques, antipersonnel métalliques, antichar non métalliques, et antichar métalliques. Le taux de fausse alarme toléré est de 1 pour 6 m². La vitesse de déminage doit être au moins égale à 10 m² par minute.

Ces deux volets du déminage étant ainsi schématiquement décrits, chaque domaine se subdivise ensuite en techniques de détection et techniques de neutralisation. Ces techniques sont distinctes, mais pas indépendantes : une mine ne s'élimine pas de la même façon si elle est ou non bien identifiée et localisée.

Par ailleurs, la détection est dite lointaine si elle s'effectue à partir d'un aéronef. Dans l'état actuel de la technique, il s'agit de détecter des mines posées sur le sol ou enfouies selon un

réseau ordonné. La détection proche s'effectue à l'aide d'un véhicule ou manuellement. Dans ce dernier cas, l'ergonomie amène de sérieuses limitations de masse et de formes. La neutralisation peut s'opérer soit en détruisant radicalement la mine, soit en la rendant inopérante sans la détruire (*soft kill*). En cas de destruction, on peut opérer de façon globale sur une étendue donnée, ou mine par mine.

3. L'état de l'art du déminage

En matière de neutralisation de mines, il existe, notamment en France, des engins qui ont une action mécanique (fraisage, hersage, ...) sur le sol devant eux. Ce type de matériel a été utilisé très efficacement pour nettoyer le *no man's land* le long du rideau de fer. Mais dans ce cas, la situation était très favorable : le terrain était dépouillé de végétation, la terre était meuble et il ne s'agissait que de mines antipersonnel, de type connu. En présence de mines antichar, ces systèmes ont de fortes limitations d'emploi et d'efficacité.

Des sociétés proposent les produits suivants : explosifs solides, mousses explosives, explosifs liquides, fioul-air explosifs, duplicateurs de signatures magnétiques. La France procède à des évaluations de la plupart des principes utilisés. Leur efficacité dépend fortement des caractéristiques du minage et de l'environnement et jusqu'à présent aucun ne constitue une solution entièrement satisfaisante.

Pour ce qui est de la détection des mines enfouies, les trois méthodes utilisées actuellement sont les détecteurs de métaux - dont les modes de fonctionnement n'ont pas beaucoup changé depuis 50 ans -, les chiens et les sondes métalliques (type baïonnette). Seule la dernière méthode garantit une très grande efficacité en toutes circonstances. L'opérateur étant en position couchée, elle consiste à enfoncer une tige métallique d'environ 50 cm dans le sol, tous les 2 à 3 cm, et à dégager manuellement les objets rencontrés.

D'autres moyens ont été développés récemment. Ce sont presque tous des systèmes nécessitant un véhicule (téléopéré ou non), disposant de radar à pénétration de sol (GPR : *Ground Penetrating Radar*) ou de capteurs optiques, sensibles au rayonnement visible ou infrarouge.

L'efficacité des systèmes et méthodes actuels se traduit par quelques chiffres : alors qu'une mine antipersonnel peut coûter 10 dollars, il faut dépenser en moyenne 1000 dollars pour éliminer une mine. Le rythme de déminage est d'environ 100 000 mines enlevées par an, à comparer aux 100 000 000 de mines à extraire du sol actuellement et au 2 ou 3 000 000 posées chaque année. En moyenne, un démineur est tué pour 1000 mines enlevées. En

résumé, dire que l'état actuel du déminage n'est pas satisfaisant ne peut être taxé d'exagération.... Bien sûr, ces chiffres concernent surtout le déminage humanitaire, mais l'opération "Tempête du Désert", en 1991, a montré que la traversée d'un champ de mines restait un problème majeur pour les armées occidentales, même face à un adversaire d'un niveau technique inférieur.

4. Les études effectuées ou en cours

Neutralisation des mines : combustion ou détonation

En matière de neutralisation, les études visent à annihiler les capacités des mines de façon plus sûre, par l'utilisation de solutions minimales (en terme d'énergie utilisée, de logistique associée et de coût).

Deux voies se dessinent :

- soit obtenir la combustion totale de l'explosif dans le cas de mines disposées en surface ou très faiblement enterrées. La combustion (par opposition à une réaction violente, déflagration ou détonation) permettrait de minimiser les dégâts latéraux et peut être vérifiée visuellement ;
- soit amener la détonation complète de l'explosif des mines enterrées : en effet, dans cette situation, une détonation garantirait la destruction effective de l'engin.

Détection des mines

Les techniques de détection des mines profitent actuellement d'un concours de circonstances favorables, lié aux évolutions de la géophysique. En effet, les progrès de ce secteur étaient, jusqu'à une quinzaine d'années, presque entièrement motivés - et financés par la prospection pétrolière. Suite à la baisse des cours du dollar et du pétrole, les sociétés et laboratoires développant du matériel de géophysique ont dû chercher de nouveaux clients. Parmi ceux-ci, beaucoup étaient demandeurs de sondages plus proches de la surface du sol que les pétroliers, et d'une échelle de précision plus fine : alors que les sondages pétroliers s'étendent sur des kilomètres, avec une précision de l'ordre de 10 mètres, la détection de soubassement autoroutier, ou de canalisations dans les villes, ont nécessité des profondeurs de sondages de quelques mètres, et des images de résolution voisine de 1 centimètre. Depuis une dizaine d'années, des matériels (sismiques, résistifs, radars) ont donc été développés avec des performances qui se rapprochent des besoins du déminage. L'effort de détection porte

essentiellement sur les capteurs utilisés. L'idée de base consiste à mesurer une grandeur physique et à déterminer dans quelle mesure les variations spatiales ou temporelles de sa valeur sont modifiées par la présence d'une ou de plusieurs caractéristiques de la mine.

Ces caractéristiques peuvent être liées à la nature des atomes ou des liaisons atomiques de l'explosif. Dans ce cas, les grandeurs physiques considérées sont des flux de neutrons ou des intensités de champ électromagnétique, et les techniques utilisées sont l'activation neutronique, la résonance nucléaire quadripolaire et la spectrographie.

Dans la plupart des cas, la détection consiste à mesurer les perturbations apportées sur l'environnement par la mine elle-même - ou par son enfouissement dans la propagation d'une onde. Cette onde est, soit préexistante (détection passive), soit émise pour les besoins de la mesure (détection active). Ont été ainsi testées des méthodes basées sur des ondes électromagnétiques ou sur des ondes mécaniques. Les techniques correspondantes testées s'appellent infrarouge, magnétique, multi-spectral hyperfréquence, multi-spectral visible, radiométrie, radar très large bande, acoustique, sismique.

5. Les orientations prévisibles

Les besoins humanitaire et militaire sont les mêmes en terme de techniques

Entre les utilisations humanitaire et militaire, les scénarios diffèrent, et les contraintes opérationnelles aussi. Néanmoins, les techniques de base sont les mêmes, et les points durs dimensionnant aussi. Il y a de fortes chances pour que les industriels, tout en entretenant l'ambiguïté sur la distinction des deux missions, proposent des solutions techniques très voisines aux différentes instances (nationales, communautaires et internationales) qui gèrent les fonds affectés au déminage.

Détection lointaine : un besoin essentiellement militaire

La détection lointaine (c'est-à-dire, en pratique, aéroportée) de champs de mines risque fort de devenir un créneau bien spécifique d'un besoin purement militaire : détecter des champs de mines antichar soit posées sur le sol, soit enfouies de façon globalement structurée. Bien sûr, être capable de détecter par avion des mines antipersonnel dissimulées depuis plusieurs mois, présenterait un grand intérêt, mais, sauf saut technologique, les trente prochaines années devront sans doute se contenter de solutions moins ambitieuses. La détection lointaine semble donc un secteur un peu à part, où le nombre de capteurs potentiels est plus réduit, avec un fort échelonnement temporel prévisible des scénarios maîtrisables.

La détection rapprochée va être portée par des courants d'innovation

La détection rapprochée risque à moyen et long terme d'être effectuée à l'aide de deux types de matériels : d'une part, des détecteurs portables par un individu, qui seront dans un premier temps un perfectionnement des détecteurs magnétiques actuels, avec l'adjonction d'un ou plusieurs capteurs. D'autre part, des véhicules opérant soit seuls, soit à plusieurs (un détecteur et un neutralisateur, par exemple), possédant une panoplie importante de capteurs et d'aides à la décision. À court et moyen terme, le domaine humanitaire, qui aura fortement contribué (politiquement et financièrement) à l'évolution des techniques de déminage rapproché, risque d'être assez peu satisfait par les produits obtenus : l'efficacité des matériels portables risque d'être très en deçà des exigences humanitaires, et les contraintes financières et techniques liées aux véhicules de déminage risquent de les mettre hors de portée des utilisateurs potentiels.

Grâce aux progrès de la micro-électronique, les capteurs sont en train de bénéficier d'améliorations importantes en miniaturisation et en performance. La détection des mines va en bénéficier, et les futurs détecteurs comporteront sans doute au moins trois types différents de capteurs. Le problème à résoudre est spécialement ardu : il faut finalement détecter des objets qui peuvent avoir n'importe quelle forme, composés de matériaux très divers, enfouis dans un sol qui peut être ou ne pas être humide, conducteur, hétérogène, isotrope, pollué par d'autres objets, etc. La détection des mines va bénéficier d'un autre domaine scientifique nouveau et en pleine expansion, qui est la fusion de données issues de capteurs. Cette fusion consiste à utiliser les informations brutes issues de chaque capteur, à les comparer, et en tenant compte de l'ensemble des phénomènes physiques dont ils sont une représentation, à effectuer un traitement de signal en détection qui augmente la probabilité de détection et minimise le taux de fausses alarmes. Cette fusion de données a d'autant plus de chance d'être efficace (robustesse, fiabilité, et indépendance des conditions d'emploi) que les capteurs retenus sont sensibles à des phénomènes physiques très différents les uns des autres et non couplés (par exemple la propagation électromagnétique, la diffraction sismique et la résonance de liaisons atomiques).

Un autre domaine sera également mis à contribution : la simulation numérique. Il comportera d'abord une modélisation du système global : simuler finement le fonctionnement du système est nécessaire, ne serait-ce que pour évaluer les associations possibles de capteurs. En effet, il existe actuellement une trentaine de familles de capteurs candidates à la détection des mines. La plupart de ces familles comportent plusieurs types de capteurs. Les associations possibles de trois ou quatre capteurs doivent ensuite être testées face au millier de types de mines existantes, suivant différents scénarios, et en fonction de terrains-types et de météorologies standards. Dans chaque cas, il faut décrire le phénomène physique à mesurer, son interaction avec le capteur concerné, éventuellement les interactions entre capteurs. De toute évidence, le bon sens du concepteur ne suffit pas, et il doit être aidé par une simulation numérique complexe du système de déminage, des mines et de l'environnement incluant tous les phénomènes physiques impliqués. En parallèle, les mines vont également bénéficier de la

miniaturisation de l'électronique, et de la baisse des coûts dus à l'emploi de technologies civiles en matériaux, électronique, informatique, capteurs, et transmissions : les mines vont communiquer entre elles et avec une éventuelle station de contrôle déportée, (se) faire part de leur expérience sur l'environnement et sur les cibles, agir de concert. Notons que les mines antipersonnel seront développées, fabriquées et utilisées en infraction de la Convention d'Ottawa.

Conclusion

Récemment, le domaine du minage et du déminage s'est caractérisé par une forte imbrication du civil et du militaire (utilisation de technologies militaires contre des populations civiles, opérations humanitaires menées par des unités militaires, crédits civils pour faire progresser des technologies militaires, retombées techniques et scientifiques croisées). Cette évolution est sous-tendue par de fortes pressions politiques et médiatiques, et les footballeurs succèdent aux princesses pour appuyer des actions en faveur des organisations non gouvernementales oeuvrant dans le domaine. Les objectifs à long terme du déminage sont très ambitieux, puisqu'ils reviennent à être capable de détecter des objets qui n'ont pas grand chose de commun ni de caractéristique, si ce n'est leur aptitude à exploser. Néanmoins, les techniques de déminage vont profiter de la reconversion des études de géophysique, des progrès réalisés grâce au financement humanitaire, et des avancées importantes dans les domaines des capteurs, de la fusion de données, de la miniaturisation de l'électronique et de l'informatique.

Par contre, le domaine va subir la pression politique, l'enchevêtrement des acteurs, et le risque d'illusion de l'existence de solutions radicales à court terme. En particulier, une relecture juridique pointilleuse de la Convention d'Ottawa, rédigée assez rapidement, risque de se révéler difficile à concilier avec l'utilisation militaire "normale" des armes de défense futures. Par ailleurs, les interdictions qu'elle contient risquent de s'appliquer exclusivement aux pays démocratiques et avancés : en effet, autant il est réaliste de vouloir faire appliquer un traité de non-prolifération nucléaire, car fabriquer une bombe atomique nécessite une concentration de moyens au niveau d'un État, autant il paraît plus illusoire de vérifier la non-fabrication d'un objet, qui, comme une mine, peut s'obtenir avec des moyens qui peuvent facilement se trouver réunis dans une ville de faible importance (chimie élémentaire, mécanique de précision et plasturgie).

Pour le futur, la France possède des atouts importants : les laboratoires impliqués (ONERA, ISL), et les industriels (Thomson, Intertechnique, GIAT Industrie) couvrent bien les aspects très multidisciplinaires du secteur. La direction des travaux d'étude amont est, au moins au niveau du ministère de la défense, bien synchronisée entre le groupement du minage et du contre-minage de la Délégation Générale pour l'Armement, la Section Technique des Études Tactiques et le bureau Études de l'Armée de Terre. Il reste à compléter, par des coopérations bien choisies, les nombreuses techniques utiles à la maîtrise du déminage. Par ailleurs, pour atteindre les objectifs très ambitieux à long terme du déminage, il faudra revenir à des études

scientifiques assez fondamentales de compréhension phénoménologique, et consentir un effort particulier à la simulation numérique, depuis le capteur de base, jusqu'au véhicule complet.