

Le déminage terrestre est-il robotisable ?

M. Défourneaux⁽¹⁾

Résumé : L'élimination des dizaines de millions de mines terrestres et de munitions non-explosées qui polluent la Terre (et de celles qui continuent à s'y ajouter malgré des accords politiques vertueux) est une activité dangereuse qui justifie pleinement des tentatives de robotisation. Pourtant, à part quelques véhicules télécommandés pour certaines tâches très particulières, elle s'effectue encore par des méthodes manuelles rustiques qui contrastent étonnamment avec l'abondance des travaux scientifiques qui lui sont consacrés. De fait, des percées sont encore nécessaires dans le domaine des nouveaux capteurs, celui des techniques avancées de traitement et de fusion des signaux donnés par ces capteurs, et aussi celui de l'intelligence artificielle appliquée à l'identification automatique. Malheureusement, il y a une grande différence entre les modèles idéalisés employés dans les travaux scientifiques - des mines proprement posées dans des sols bien plats et homogènes sans fausses alarmes - et la réalité du monde, sans même compter les problèmes supplémentaires créés par l'imagination vicieuse de l'Homme.

Abstract : *Eliminating the tens of millions of landmines and unexploded ordnance which currently pollute the Earth (plus those still coming in spite of virtuous political agreements) is a hazardous activity which fully justifies attempts to robotization. However, except for a few remotely controlled vehicles specialized in very specific tasks, demining is still carried out with unsophisticated manual methods, in surprising contrast with the large number of scientific works devoted to its improvement. Actually, breakthroughs are necessary in the areas of new sensors, of advanced processing and fusing techniques applied to the signals from these sensors, and also of artificial intelligence as applied to automatic identification. Unfortunately, there is quite a gap between the idealized models used in scientific works - i.e. cleanly laid mines in nice flat homogeneous grounds without false alarms - and the real world, even regardless of the additional problems generated by the vicious imagination of Man.*

La situation actuelle

Les espoirs et les réalités

Le 3 décembre 1997, à l'issue d'une grande campagne de sensibilisation des opinions publiques par diverses organisations non-gouvernementales, 122 pays signèrent à Ottawa un traité bannissant l'emploi, la production et le transfert des mines antipersonnel, coupables d'innombrables morts et mutilations - notamment d'enfants - dans

des pays où avaient sévi récemment des guerres de guérilla. Ce traité entra en vigueur le 1^{er} mars 1999 après sa quarantième ratification.

Cela étant, s'abstenir de poser de nouvelles mines ne fait pas disparaître celles déjà posées. Le traité « résolut » le problème en décrétant que chaque partie s'engageait à détruire, dans un délai de dix ans, toutes les mines situées « dans les zones sous sa juridiction ou son contrôle ». La tâche était certes facile pour un pays tels que la France, qui n'avait « sous sa juridiction ou son contrôle » que des

(1) Ingénieur-conseil - PDG de CEDALES S.A. - 3 rue du Faubourg Saint-Honoré, 75008 Paris.

mines stockées dans des dépôts : la France a ainsi détruit sa dernière mine antipersonnel le 20 décembre 1999, avec plus de trois ans d'avance sur les exigences du traité d'Ottawa. Mais il en allait tout autrement des pays où les mines étaient dispersées dans la nature sous les pieds des habitants, en plusieurs dizaines de millions d'exemplaires au total.

Les Etats Unis, quoique non signataires du traité, affirmèrent alors haut et fort, par la bouche de leur Secrétaire d'Etat, que leur technologie allait permettre de relever ce défi sans coup férir. De fait, on vit s'accroître plus encore le rythme déjà élevé des grandes réunions internationales où de grands scientifiques exposaient de grandes équations montrant que tout était résolu... en théorie. Mais le désenchantement et le scepticisme reprirent rapidement place dans la communauté des démineurs :

- ★ dans le domaine politique, lorsque, le 3 mai 1999, commença à Maputo une conférence internationale destinée à dresser un premier bilan du traité d'Ottawa, non seulement une cinquantaine de pays manquait toujours parmi les signataires du traité - notamment les Etats Unis, la Russie et la Chine - mais même des pays signataires tels que l'Angola transgressaient sans hésiter leur signature dès lors que la situation militaire leur paraissait le justifier :

- ★ et dans le domaine technique, lorsque les premières troupes de l'OTAN pénétrèrent au Kosovo en juin 1999, c'est par les méthodes manuelles les plus rustiques qu'elles se frayèrent un chemin au milieu des mines et des munitions non-explosées, laissant aux scientifiques dans leurs laboratoires le soin de vanter leurs grands projets mécanisés et robotisés.

Alors où en sommes-nous ? Sans épiloguer plus avant sur les aspects politiques du problème, on va en examiner ci-après les aspects scientifiques afin de préciser la situation actuelle et les perspectives à court et moyen terme, en insistant sur les capacités d'intervention de la robotique.

Des champs de mines aux dispersions aléatoires

La problématique générale du déminage a déjà été exposée dans un autre article [1]. On va donc simplement en rappeler le principe, illustré sur la *figure 1* et souvent résumé par la formule « chercher une mine dans le sol, c'est comme chercher une aiguille dans une meule de foin ». Formule exacte, à cela près qu'il faut en premier lieu rechercher les meules elle mêmes - c'est-à-dire les zones minées - par des méthodes de détection générale (*survey*) dont on parlera plus loin.

Jusqu'aux années 1960, ces zones étaient le plus souvent des

Pour la petite histoire...

En décembre 1995, lorsque la Banque mondiale et la Commission européenne éditérent conjointement la liste des opérations de reconstruction à mener en Bosnie-Herzégovine, un chapitre particulier fut consacré au déminage, préalable indispensable à tout retour de réfugiés en de nombreux endroits. Les lecteurs eurent alors la surprise de trouver, à la fin de ce chapitre, une carte dûment renseignée intitulée « emplacement des mines ».

Renseignement pris, il s'agissait d'une carte donnant l'emplacement des mines de charbon, que l'éditeur avait placée là par mégarde... ★

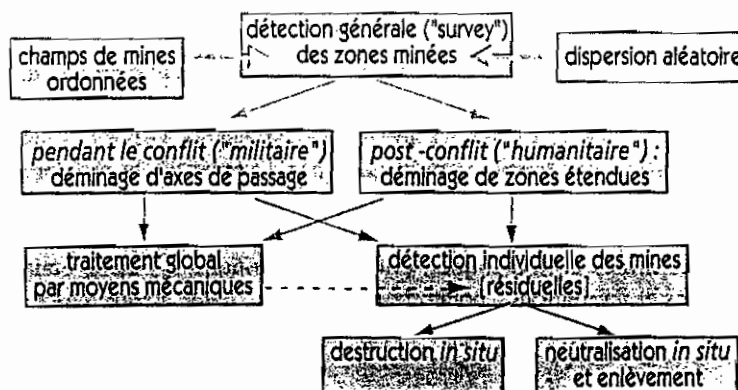
« champs de mines » posés par des militaires sur la ligne de front selon des plans réguliers et dûment relevés, non connus de l'ennemi bien sûr, mais qui, après la fin du conflit, permettaient un repérage rapide des mines. Cette méthode continue d'être pratiquée par les armées régulières : elle le fut par les Irakiens lors de la guerre du Golfe de 1991, et les Américains entretiennent toujours des champs de mines à la frontière nord de la Corée du Sud (d'où leur refus de signer le traité d'Ottawa). Mais au fil des ans, divers événements sont venus modifier cet état de fait :

- ★ d'une part l'emploi des mines dans des guerres de guérilla sans ligne de front :

- ★ d'autre part, même dans les armées régulières, l'avènement de mines dispersables :

- ★ sans compter certaines causes naturelles : ainsi, lorsque des mines ont été posées sur des dunes de sable que le vent déplace - comme celles de la Deuxième guerre mondiale, toujours présentes en Egypte et en Libye - ou bien sur un terrain qu'une inondation vient brutalement laver de temps en temps - comme au Nicaragua lors du cyclone Mitch de 1998 - même un champ de mines ordonné peut se transformer en un chaos.

FIG. 1. - Organigramme général d'une opération de déminage terrestre.



Tout ceci a abouti à remplacer les champs de mines ordonnés par des zones minées de façon aléatoire et non-mémorisée, où la recherche de l'aiguille et même de la meule devient infiniment plus longue et où, de ce fait, le coût d'élimination d'une mine peut atteindre cent à mille fois celui de sa fabrication et de sa pose.

Les munitions non-explosées

Aux mines volontairement dispersées pour constituer une menace rémanente se sont toujours ajoutées les munitions involontairement non-explosées (UXO=Unexploded-Ordnance). La France est encore riche de telles munitions remontant souvent à la Première guerre mondiale, mais elle « vit avec », car la plupart d'entre elles sont suffisamment peu sensibles ou suffisamment enfouies pour avoir résisté pendant des décennies au passage de piétons et même de véhicules. C'est donc en général lors de chantiers de travaux publics qu'on les découvre - notamment les autoroutes et voies de TGV dans l'est et le nord du pays.

Il en va tout autrement de pays où se sont déroulés des conflits récents. L'exemple typique est le Kosovo où le principal danger vient moins des mines posées par les belligérants terrestres (armée et milices serbes d'un côté, guérilleros albanophones de l'autre) que des sous-munitions larguées par les munitions-cargos de l'OTAN, dont 5 à 10 % n'ont pas explosé et qui, en pratique, présentent les mêmes dangers et les mêmes caractéristiques de dispersion aléatoire que des mines antipersonnel. Ce sont elles qui causèrent la mort des premiers démineurs dès le lendemain de l'entrée des forces de l'OTAN dans le pays.

Au déminage proprement dit doit donc s'ajouter la « dépollution », terme consacré pour l'élimination des munitions non-explosées. Dans la suite de cet article, par simplification, on combinera ces deux notions sous le terme générique de « déminage ».

Déminages « militaire » et « humanitaire »

C'est seulement après avoir repéré et délimité les zones minées ou « polluées » que l'on peut entreprendre d'en éliminer les mines et munitions. Là, le problème se pose très différemment selon que l'on se situe :

★ pendant le conflit (déminage « militaire »), où le problème est de sécuriser très rapidement des axes de passage (ouverture de routes ou création de brèches à travers des zones minées) ;

★ après le conflit (déminage « humanitaire »), où le problème est de rendre à leur utilisation civile d'avant-minage - en général l'agriculture ou l'habitat - non plus de simples axes de passage, mais la totalité des zones minées.

Pendant le conflit, le facteur primordial est la rapidité, même si c'est parfois au prix d'un pourcentage appréciable de mines résiduelles. Lorsqu'il s'agit d'ouvrir une brèche à travers un champ de mines, cette exigence de rapidité sans exhaustivité est assez bien remplie par des moyens mécaniques tels que des rouleaux ou des fléaux (cf. figure 2), ou encore des tapis explosifs, moyens dont la mise en œuvre est très rapide et qui brisent ou font détoner une bonne partie des mines sans chercher à les détecter une par une au préalable.

Après le conflit, en revanche, le facteur primordial est l'exhaustivité : la norme de l'ONU exige un minimum de 99,6 % d'efficacité, soit un maximum d'une mine non-éliminée sur 250. Ce risque résiduel est encore énorme pour le paysan à qui l'on rend son champ « déminé », mais pour les démineurs c'est une exigence technique extrêmement difficile à tenir. En fait, elle est intenable par le seul emploi de moyens mécaniques « aveugles », c'est-à-dire qui ne cherchent pas à détecter les mines individuellement. Et même en recherchant individuellement toutes les mines (ou bien les mines résiduelles après une destruction mécanique préalable), cette exigence n'est encore réalisable, à ce jour, que si la détection est effectuée à la main par des opérateurs humains :

★ d'abord avec des détecteurs maniés à bout de bras (les « poêles à frire ») selon des mouvements optimisés par instinct plus que par méthode scientifique (cf. figure 3) :

★ puis en sondant le sol avec une pointe inclinée de 30° sur l'horizontale - parfois une simple baïonnette - là où le détecteur a perçu ou cru percevoir la présence d'une mine.

Enfin, chaque fois qu'une mine est détectée, il faut l'éliminer. Cela se pratique toujours à la main, selon deux méthodes :

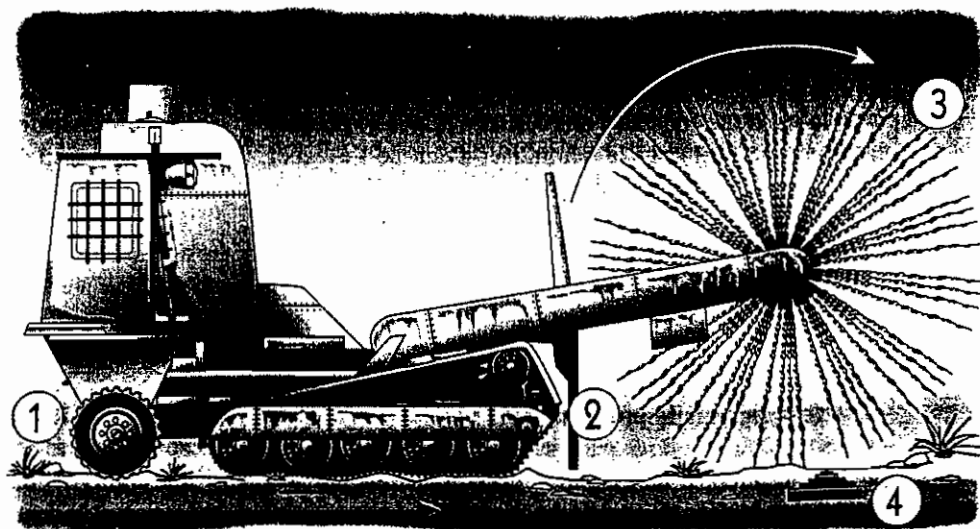


FIG. 2. - Principe du fléau.

① : véhicule tout terrain, ② : plaques de protection, ③ : chaînes tournantes, ④ : mine

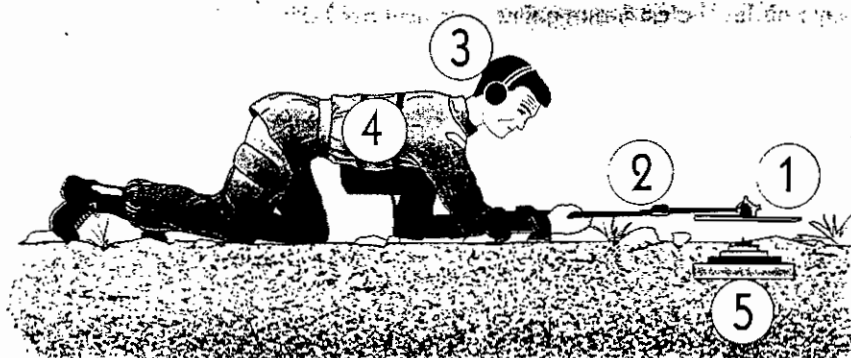


FIG. 3. - Attitudes de la détection manuelle.

- ① détecteur (généralement de métaux) ;
- ② manche ;
- ③ écouteurs (pour alarme auditive) ;
- ④ accessoires (batterie, etc.) ;
- ⑤ mine.

• la méthode anglo-saxonne qui consiste à détruire la mine in situ par explosif ;

• la méthode française qui consiste à la dégager précautionneusement pour la neutraliser avant de l'évacuer pour la détruire plus loin.

Le progrès technique

Homme ou robot ?

Décrire de pareils procédés dans une série d'articles consacrée à la robotique peut sembler une incongruité ou une provocation. Il faut plutôt le prendre comme un défi et un point de départ : après tout, c'est avec des méthodes

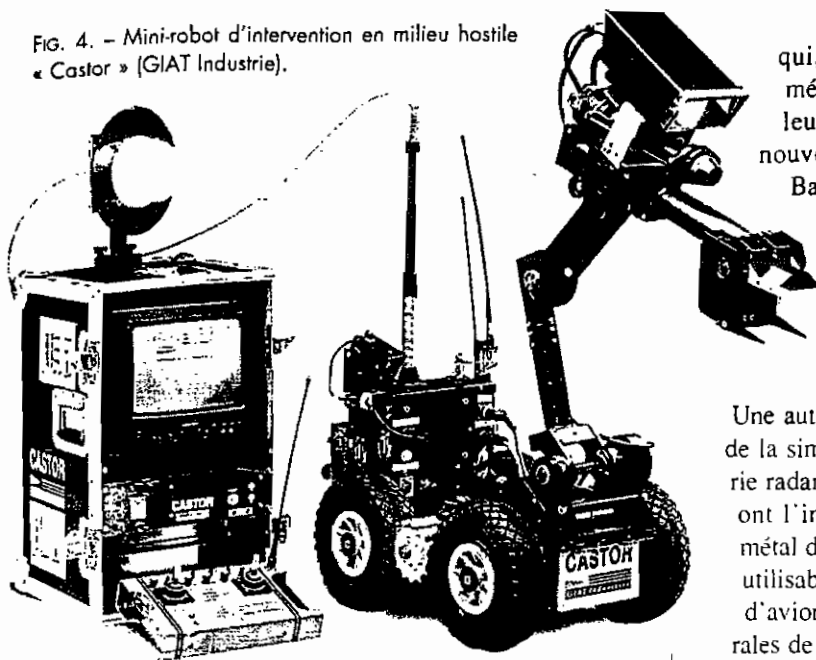
manuelles et artisanales du même type que l'on fabriquait les voitures il y a encore quelques décennies. Or le déminage est bien plus justiciable encore d'une robotisation que la fabrication de voitures, vu les dangers qu'il implique.

Seulement l'argument du danger s'étend à toutes les actions guerrières : il serait logique de remplacer tous les combattants par des robots afin d'aboutir à une guerre de type « zéro mort ». Pourtant, sur terre pour le moins, la guerre continue de se faire avec des hommes [2]. Il existe certes des « robots » permettant à des spécialistes de la sécurité civile d'examiner et éventuellement détruire un colis ou un véhicule suspect (cf. figure 4), mais il faut se garder de généralisations hâtives, car ces « robots » sont employés dans une logique de temps de paix, dans des pays développés et face à des situations exceptionnelles, c'est-à-dire dans des conditions où il est de règle de minimiser le risque quel qu'en soit le prix. Ceci n'est le cas ni dans des opérations militaires, ni face à des dizaines de millions de mines dans le déminage humanitaire. De plus, le mot « robot » est souvent employé indifféremment dans le langage courant pour désigner deux entités bien distinctes : d'une part un système autonome, d'autre part un mécanisme simplement télécommandé par un opérateur humain. Or les « robots de déminage » actuels appartiennent à la seconde catégorie, la plus facile à réaliser puisqu'elle conserve le cerveau humain dans la boucle de visualisation et de décision, en le déportant simplement à une distance qui évite le danger.

De fait, dans tous les projets actuels de véhicules de déminage ou de détection de mines, la robotisation se réduit modestement à une télécommande du véhicule, et même cette option n'est souvent qu'un effet d'annonce. En effet, si la perte accidentelle d'un pilote humain est certes jugée inacceptable, celle du véhicule et de son équipement n'est pas acceptée non plus de gaité de cœur, si bien que la tendance est plutôt à l'adoption de véhicules fortement protégés, lesquels peuvent alors être confiés sans trop de risque à des pilotes humains.

Faut-il en conclure que le déminage est condamné à rester une activité de « basse » technologie ? L'*homo scientificus* a un étrange masochisme qui le conduit à traiter avec dédain les activités dont la complexité est telle qu'elles ne peuvent pas encore être traitées par une intelligence artificielle, et où l'on en est réduit (sic) à utiliser l'intelligence humaine. On va donc étudier en détail les raisons de cette complexité afin de cerner les conditions d'une intervention de l'intelligence artificielle dans la détection et l'identification des mines.

FIG. 4. - Mini-robot d'intervention en milieu hostile « Castor » (GIAT Industrie).



Principes de détection

Les diverses techniques de détection de mines ont été décrites dans un autre article [1]. Les principales catégories en sont brièvement rappelées dans les trois encadrés ci-après.

La technique la plus ancienne est la détection de métal - par des moyens passifs ou actifs (*cf. encadré*) - car les toutes premières mines terrestres étaient souvent entourées de métal, ou tout au moins comprenaient dans leur mécanisme une masse appréciable d'éléments métalliques. Ceci reste vrai aujourd'hui pour les sous-munitions non explosées, mais de moins en moins pour les mines proprement dites, surtout les mines antipersonnel

Détection de métal

Deux types d'appareils :

- ☉ Magnétomètre (passif) : mesure la déviation locale du champ magnétique terrestre produite par un objet ferromagnétique.
- ☉ Inducteur (actif) : induit et détecte des courants de Foucault dans tous les objets métalliques, même amagnétiques.

Emplois et limitations :

- ☉ Magnétomètre : peut repérer de grosses munitions non détonées (généralement entourées d'acier épais), même profondément enfouies. Il exige un équipement amagnétique, ce qui pose des problèmes techniques lorsqu'on le monte sur un véhicule.
- ☉ Inducteur : appareil le plus courant pour détecter des mines et des munitions faiblement enfouies. Il est capable de détecter des masses de métal extrêmement faibles, mais plus on augmente sa sensibilité, plus on accroît le taux de fausses alarmes. ★

qui, au fil des ans, ont évolué vers un contenu métallique de plus en plus faible : d'une part dans leur enveloppe (ce qui n'est pas vraiment une nouveauté puisque les enveloppes en bois ou en Bakélite avaient déjà fait leur apparition pendant la Deuxième guerre mondiale), et aussi dans leur mécanisme, où le métal s'est progressivement réduit à une minuscule tête de percuteur avant de disparaître totalement dans les modèles les plus récents.

Une autre catégorie de techniques est la visualisation, de la simple observation en lumière visible à l'imagerie radar en passant par l'imagerie IR. Ces techniques ont l'intérêt de ne pas préjuger de la présence de métal dans les mines et d'être les seules pratiquement utilisables jusqu'à de grandes distances - c'est-à-dire d'avion ou d'hélicoptère - pour les détections générales de zones minées préalables à la détection individuelle des mines. Mais chaque portion du spectre électromagnétique a ses avantages et ses limites (*cf. encadré*) :

- ★ l'observation en visible ou en polarimétrie IR donne de très bonnes images, mais uniquement pour des mines en surface :

- ★ l'IR moyen (3-5 μ) ou thermique, (8-12 μ) permet, en mode passif, de détecter des mines très faiblement enfouies, mais il exige de forts ensoleillements, certes faciles à simuler en caisse à sable par chauffage artificiel

Visualisation

Portions du spectre électromagnétique exploitées :

- ☉ Visible et IR (naturel ou polarisé) pour les mines en surface.
- ☉ IR passif (3-5 μ ou 8-12 μ) pour les mines à très faible profondeur : détecte les infimes différences de température que produit la présence d'une mine (ou d'une fausse alarme) à la surface d'un sol irradié par le rayonnement solaire, aux heures de plus fort contraste thermique.
- ☉ Millimétrique passif : un peu plus pénétrant mais ne captant que des énergies très faibles.
- ☉ Décimétrique actif (radar de pénétration de sol GPR = *Ground-Probing Radar*) pour les mines plus profondes : détecte des différences de constante diélectrique entre les mines (ou les fausses alarmes) et le sol environnant.

Intérêt et limites des diverses techniques :

- ☉ Intérêt : ne préjugent pas d'un contenu métallique, et sont utilisables jusqu'à de grandes distances pour des détections générales de zones minées.
- ☉ Limitations : si les mines sont enfouies, l'augmentation de pénétration du rayonnement exige une augmentation de longueur d'onde au détriment de la résolution spatiale, ce qui impose des compromis généralement situés entre 10 et 30 cm de longueur d'onde pour les GPR. ★

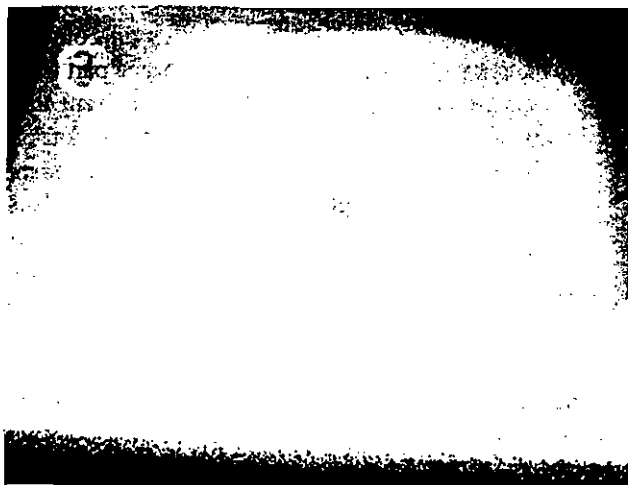


FIG. 5. - Image d'une mine antipersonnelle enfouie sous 5 mm de sable, donnée par une caméra infrarouge après plusieurs minutes de chauffage par une lampe de 1 kW (Centre Commun de Recherches européen d'Ispra).

(cf. figure 5), mais pas toujours aussi évidents à trouver sur le terrain :

↳ pour des mines plus profondément enfouies, il faut passer à des longueurs d'ondes supérieures, mais on s'éloigne alors du maximum de rayonnement propre du sol qui se produit vers 10 microns. Ce rayonnement propre est encore mesurable en millimétrique passif, mais au delà il est nécessaire de passer en mode actif avec des radars de pénétration de sol (GPR), dont la pénétration croît avec la longueur d'onde mais dont la résolution spatiale - donc la capacité de discrimination - diminue corrélativement (cf. figure 6).

La détection d'explosif (cf. encadré) est au contraire la technique la plus discriminatrice puisque tout ce qui ne contient pas d'explosif est inoffensif. L'une des méthodes consiste à détecter les traces d'explosif ayant migré vers la surface du sol en recourant à l'odorat de chiens ou

Détection d'explosif

Deux options possibles :

- Détection de molécules explosives à la surface du sol (concentrations : quelques 10^{-6} en phase solide, quelques 10^{-9} en phase gazeuse).
- Détection *in situ* d'atomes caractéristiques de ces molécules, essentiellement l'azote N.

Méthodes employées :

- Pour la détection de molécules en surface : odorat de chiens ou d'autres animaux, « nez électroniques », bactéries luminescentes.
- Pour la détection d'atomes *in situ* : excitation électromagnétique et détection par résonance nucléaire quadrupolaire, ou bien irradiation neutronique et analyse des rayons gamma induits. ★

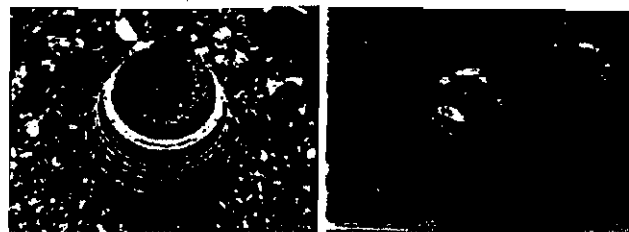


FIG. 6. - Mine antichar (gauche) et son images GPR sous 3 cm de terre (à droite) (ERA, Royaume Uni).

d'autres animaux (efficace, mais pas toujours fiable) ou à des « nez électroniques » (plus fiables mais moins performants). L'autre méthode consiste à détecter *in situ* les atomes caractéristiques de ces explosifs (essentiellement l'azote N) par résonance quadrupolaire ou par irradiation neutronique et analyse des rayons gamma induits. Cette dernière technique donne des résultats fiables, mais avec une lenteur rédhibitoire qui en réduit l'usage à la discrimination d'alarmes préalablement détectées par d'autres moyens.

Fusion de données

Tant qu'il est resté un peu de métal dans les mines, les détecteurs inductifs ont été capables de le déceler. Le problème est que, plus un détecteur est sensible, plus il détecte aussi les fausses alarmes que sont les éclats d'obus et tous les débris métalliques de notre « civilisation » : les boîtes de boissons, puis les capsules de bouteilles, puis les clous et les bouts de fil de fer, jusqu'au moment où, la sensibilité croissant toujours, on finit par détecter toutes les hétérogénéités du sol, et le signal se perd alors dans le bruit ambiant. Ceci souligne le principal problème de la détection de mines :

↳ le risque le plus évident est celui d'une non-détection, et il existe effectivement pour les mines totalement dépourvues de métal :

↳ mais le risque le plus pervers est, au contraire, le foisonnement des fausses alarmes qui, avec les détecteurs de métal, peut atteindre des taux rédhibitoires.

Le problème est donc d'accroître non pas tant la sensibilité des détecteurs que leur capacité de discrimination. La seule façon d'y parvenir est de combiner plusieurs détecteurs, par exemple en les alignant sur une plate-forme portée par un véhicule perpendiculairement à son déplacement (cf. figure 7) afin de réaliser une couverture en x-y du terrain. Toutes choses égales par ailleurs, en effet, une série de n capteurs employés en synergie peut fournir beaucoup plus d'information que les mêmes n capteurs employés de façon indépendante. Ceci est vrai même si ces capteurs sont tous identiques : une batterie des détecteurs de métal peut ainsi fournir des pseudo-images approximatives des objets détectés (mines ou fausses alarmes : cf. figure 8) et des indications sur leur profondeur. Mais la diminution du risque de non-détection et l'amélioration de la discrimination sont encore meilleures si l'on emploie en synergie des

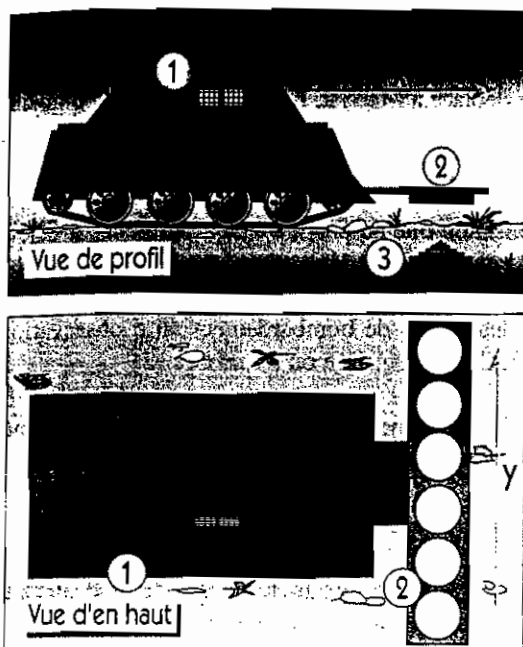


FIG. 7. - Principe d'un système de détection porté par un véhicule terrestre.

1. véhicule terrestre se déplaçant selon l'axe des x
2. batterie de détecteurs alignés selon l'axe des y
3. mine

batteries de capteurs fondés sur des principes physiques différents et complémentaires, par exemple la détection de métal, l'IR et le radar de pénétration de sol.

Mais pour passer de n capteurs indépendants à un système intégré de n capteurs, le problème le plus ardu est de fusionner toutes les données reçues et d'en extraire sous forme synthétique l'information nécessaire, ce qui exige des logiciels informatiques et des algorithmes très élaborés pour le traitement des signaux et l'interprétation des résultats. Ce problème mobilise actuellement de nombreux chercheurs à travers le monde, notamment les participants aux projets GEODE (*Ground Explosive Ordnance DEtection system*) et DREAM (*Data fusion as a REmedy Against Mines*) financés par la Commission européenne dans le cadre d'un programme de recherche sur de 15 millions d'Euros sur les technologies du déminage [3], lancé fin 1997.

Ces travaux doivent aboutir à présenter des images des objets détectés qui soient suffisamment traitées - sans être pour autant faussées - pour permettre une aide à la décision cruciale « vraie mine ou fausse alarme » par un œil et un cerveau humain. Mais on ne peut pas en res-



FIG. 8. - Mines et autres objets « vus » en pseudo-couleurs par un alignement de détecteurs de métal déplacé perpendiculairement à lui-même à l'avant d'un véhicule terrestre (système VAMIDS de Schiebel, Autriche).

ter là, car l'intervention du cerveau humain est un facteur de lenteur considérable incompatible avec les systèmes opérationnels du futur. Alors il faut viser plus loin en recherchant la possibilité d'une reconnaissance automatique des objets détectés : c'est en cela que réside actuellement l'application la plus indispensable de l'intelligence artificielle.

Traitement de signaux et interprétation

Pour expliquer le caractère indispensable de l'intelligence artificielle dans le perfectionnement des techniques de déminage, on peut examiner l'un des projets financés par l'Union européenne : la détection de zones minées à partir d'un avion, par IR ou GPR. Dans ce projet, non seulement l'avion explore de longues bandes de terrain à une vitesse élevée, mais à l'intérieur même de ces bandes, le faisceau d'observation effectue un balayage latéral, ce qui multiplie le kilométrage de terrain balayé. Rechercher des mines visuellement sur les kilomètres d'enregistrements serait infiniment long (même si, en l'occurrence, le but recherché est de détecter des zones minées et non des mines individuelles), si bien que la seule solution est de faire lire et interpréter ces enregistrements par les équivalents électroniques d'un œil et d'un cerveau humains. Mais pour ce faire, il faudrait définir de façon claire et non-ambiguë les signatures des mines recherchées en les distinguant des fausses alarmes. Or, si l'on examine les signatures représentées sur les figures 5 et 6 et si l'on considère qu'elles ont été obtenues en caisse à sable dans des conditions extrêmement idéalisées, on imagine l'ésotérisme d'images aériennes fugitives, donc la gageure que représente leur interprétation automatique, même après un traitement d'image poussé destiné à extraire le mieux possible le signal du bruit : même pour une intelligence humaine, l'exercice reste d'une extrême difficulté.

On peut se dire que l'on a choisi là le cas le plus difficile vu la vitesse de l'avion et sa distance au sol, et que le problème est plus simple lorsque les détecteurs sont montés sur des plates-formes à l'avant d'un véhicule terrestre (cf. figure 7). Ce type de solution fait l'objet de nombreux travaux, au stade des recherches dans le programme de coopération européenne (projet CIMIC) et au stade de développements dans l'*US Army*. De fait, les signatures d'objets divers à très faible distance sont un peu plus lisibles, mais elles restent tout de même ésotériques, même après traitement. De plus, contrairement à un avion, un véhicule qui se déplace sur un terrain miné a un contact physique avec le sol et ne peut donc se permettre aucune erreur ; mais il ne peut pas se permettre non plus de s'arrêter sur toutes les fausses alarmes. Or la décision « mine ou fausse alarme » doit être prise en temps quasi-réel, c'est-à-dire entre l'instant où la plate-forme de détection passe à la verticale d'une mine et celui où les roues du véhicule y passent à leur tour.

On peut pallier la difficulté en plaçant les détecteurs non pas à l'avant mais sur le côté du véhicule, d'où ils balayent une zone encore suspecte tandis que le véhicule se déplace, lui, sur une bande de terrain déjà sûre. Mais cette zone suspecte devra être parfaitement déminée à son tour avant que le véhicule ne puisse s'y aventurer au passage suivant pour balayer la bande adjacente. On comprend donc que les prototypes actuels ne dépassent guère 5 km/heure... sur des terrains d'exercice avec des mines factices. Si l'on veut les utiliser à des vitesses plus élevées, on aboutit à la même conclusion que pour la détection aérienne : il faut complètement éliminer le cerveau humain de la boucle de décision en recourant à une interprétation automatique du signal après traitement.

Or on en est encore loin. Certes, à l'occasion de chaque réunion scientifique internationale sur la détection des mines, de nombreux algorithmes-miracles sont présentés à cet effet, dont la caractéristique commune est d'avoir été optimisés cas par cas afin de bien détecter les mines dont le développeur de l'algorithme connaissait par avance la position dans la caisse à sable ou sur le terrain expérimental utilisé, terrain parfaitement plat et homogène en général. Mais dans la vie réelle, on ne démine pas des terrains de golf et on ne connaît pas la position des mines ni même leur nature. Et bien sûr, en cas d'erreur, on risque plus qu'une petite honte scientifique passagère.

Quelle place pour l'intelligence artificielle ?

Que la vie serait belle pour les scientifiques si l'on ne déminait que des terrains parfaitement plats et homogènes où les seuls intrus seraient des mines d'un modèle unique et bien connu, toutes identiques et toutes placées bien à plat à la même profondeur ! Mais dans la réalité, les mines et les munitions non-explosées sont de tous types, enfouies à des profondeurs et sous des angles divers, voire cassées si on a préalablement recouru à un moyen de destruction mécanique. Et plus généralement, les zones parfaitement homogènes et sans intrus ne se rencontrent pas sur terre mais plutôt dans l'atmosphère ou dans l'espace, milieux continus faciles à modéliser. Ainsi,

si un système infrarouge détecte une flamme chaude dans un ciel froid ou si un radar y découvre un objet métallique qui se déplace à Mach 2, il n'est pas besoin d'algorithmes très compliqués pour décider que ce n'est pas un vol de cigognes. Le milieu terrestre, en revanche, est hétérogène, chaotique et truffé d'intrus, ce qui en rend illusoire une modélisation fine au profit d'une intelligence artificielle : c'est pour cela que l'on n'est pas encore capable d'y « robotiser » les combattants humains comme on « robotise » les pilotes de bombardement ou d'observation sur les missiles de croisière ou les drones [2].

Enfin il est une ultime raison pour laquelle on ne sait pas robotiser le démineur : c'est qu'outre la complexité du milieu, il doit aussi y affronter les méandres d'une autre intelligence humaine, en l'occurrence celle du poseur de mines ou de pièges. En effet, les mines et les piégeages sont des productions perverses d'une intelligence humaine capable de déployer des trésors d'imagination pour créer des prototypes inédits destinés à déjouer les efforts des démineurs. Cela se produit même dans les guerres « sans haine » où règne encore une certaine déontologie, car provoquer un accident de déminage chez l'ennemi, c'est le contraindre à s'interrompre afin de comprendre le danger ainsi découvert, puis à y trouver une parade avant de reprendre le déminage, parfois à une cadence réduite par la mise en œuvre de cette parade. Or la situation est bien pire encore dans les conflits dits « de basse intensité », où la pose de mines est le plus souvent motivée par le pur désir de tuer ou de mutiler. Ainsi, dans la tradition des conflits balkaniques, toute personne obligée de quitter un lieu quelconque commence par le détruire avant d'en piéger les ruines : et en Angola, on a vu apparaître des mines spécialement piégées à l'usage des démineurs humanitaires.

Alors, si l'on peut sans doute espérer que l'intelligence artificielle parviendra un jour à isoler et à identifier valablement la signature d'une mine au milieu d'un bruit chaotique, elle aura toujours beaucoup de mal à faire le poids devant les perversions raffinées de l'intelligence humaine. ★

RÉFÉRENCES

[1] M. DÉFOURNEAUX. « Les défis technologiques du déminage humanitaire », *L'Armement*, n° 65, mars 1999.

[2] M. DÉFOURNEAUX. « Guerre des armes, guerre des hommes », ADDIM, 1994.

[3] Voir un état d'avancement de ce programme dans *Demining Technologies Workshop*, organisé par le Centre commun de recherches (CCR/JRC) d'Ispra en sept-oct. 1998.