

Détection des mines antipersonnel par thermographie infrarouge

Travail présenté par Nadia Abdelmoumni, France Mansiaux et Chenling Xu dans le cadre des olympiades de la physique France 2009.

Introduction



Une mine est une arme conçue pour mutiler et non pas tuer le personnel militaire, afin de ralentir les troupes ennemies. En effet, une armée ne s'attarde pas sur ses morts, mais, bien sûr, se doit de ramasser ses blessés.

De manière générale, les mines antipersonnel sont des engins de petite taille, contenant de 10 à 250 grammes de matière explosive. Une pression associée au poids d'un objet de masse de 0.5 à 50 kilogrammes déclenche leur explosion.

Il y a deux grandes catégories techniques : les mines à effet de souffle et les mines à fragmentation. La première est enfouie à environ 4 cm dans le sol, la deuxième est installée au dessus du sol et camouflée.

Les munitions non explosées deviennent des armes antipersonnel : elles restent actives, instables, hautement explosives et contiennent parfois des produits incendiaires comme le phosphore blanc. Cela a déjà fait d'innombrables victimes parmi les enfants qui jouent avec les objets qu'ils trouvent, les adultes qui, dans un contexte d'extrême pauvreté, cherchant à récupérer les parties métalliques de ces munitions pour les

revendre, et bien sûr les personnes qui marchent sur les mines enfouies dans les champs et sur les routes.

Le traité d'Ottawa a été rédigé interdisant l'utilisation de cette arme. Cependant, tous les pays n'ont pas signé ce traité.

Afin de limiter le nombre de victimes, le déminage est mis en place depuis la fin de la 2nd guerre mondiale. Aujourd'hui les détecteurs de métaux ne sont pratiquement plus utilisés car les mines ne contiennent plus que des produits composites. Par conséquent de nombreuses méthodes alternatives ont été développées telles que la biodétection (utilisation de chien et de rats), les nez artificiels et les techniques de détection physique tel que les géoradars, méthode RQN¹ ou encore la thermographie infrarouge.

Dans ce travail nous nous intéresserons particulièrement à la méthode de détection des mines par **thermographie infrarouge**.

Dans un premier temps nous parlerons des ondes et en particulier les infrarouges, ensuite nous verrons

¹ Résonance quadriple nucléaire

l'utilisation des ondes infrarouges d'un point de vue technique et enfin nous verrons leur application dans la détection des mines.

1- Les ondes électromagnétiques

11- Définition

Les phénomènes ondulatoires, en un mot, les ondes, forment un domaine d'étude extrêmement vaste. On trouve, en effet, des ondes dans des domaines aussi différents que l'électro-magnétisme (la lumière, les ondes radio) et la mécanique des fluides et des solides (le son, les vagues).

On peut citer les deux familles d'ondes suivantes :

- Les ondes mécaniques : vibrations mécaniques, ondes sonores, vagues à la surface de l'eau, ondes sismiques etc. où se propage un état de tension, de vitesse et de pression... Dans ce cas, c'est une déformation du milieu matériel qui se propage : les couches d'air sont comprimées puis détendues dans le cas d'une onde sonore par exemple.
- Les ondes électromagnétiques : lumière, ondes radio, infrarouge, ultraviolet, rayon X, rayon gamma, où se propage un état de champs électrique et magnétique... L'onde ne transporte que de l'énergie et n'a pas besoin de milieu matériel, contrairement aux ondes mécaniques, pour se propager (pour illustrer ceci, on peut considérer les rayons du soleil qui nous parviennent après avoir traversé l'espace constitué essentiellement de vide).

Une onde, c'est une perturbation qui se propage - que ce soit à la surface de l'eau, sur une corde, dans l'air ou une perturbation du champ électro-magnétique qui nous entoure. Cette perturbation se déplace sans se déformer, et sans emporter de matière avec elle. Elle est donc idéale pour transporter de l'information. C'est pour cela que nous sommes dotés de récepteurs d'ondes : les yeux pour recevoir la lumière, les oreilles pour recevoir le son. Ces ondes nous apportent des informations à distance, ce qui est un gros avantage. Elles sont à la base de notre perception du monde.

12- Onde progressive

La perturbation se propageant, on dit que l'onde est progressive.

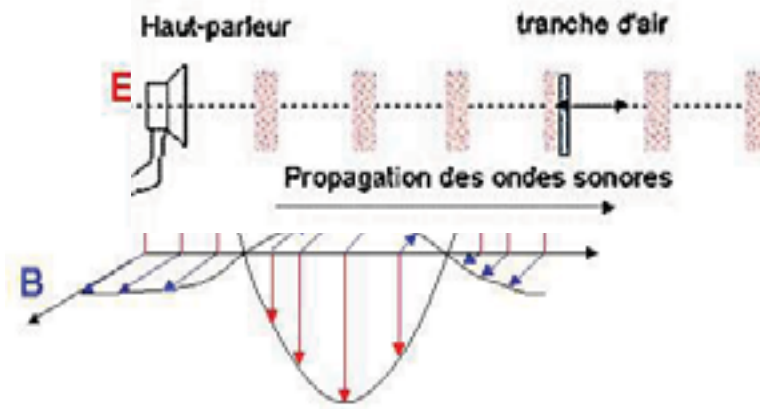
Un point atteint par une onde reproduit l'état de la source avec une amplitude moindre et un retard dû à la durée nécessaire à l'onde pour parcourir la distance qui le sépare de la source. Ainsi, sur le schéma ci-dessous, le point M effectue le même mouvement que la source S qui lui a donné naissance:



On parle d'onde longitudinale, lorsque le phénomène physique se passe dans la même direction que la direction de propagation, comme des ondes de compression dans un ressort, ou la compression de l'air lors du passage d'une onde sonore.

Dans le cas où le phénomène est perpendiculaire à la direction de propagation, l'onde est transversale; c'est le cas du champ électrique et du champ magnétique de l'onde électromagnétique.

Sur le schéma ci-dessous, les champs électrique et magnétique sont orthogonaux à la direction de propagation qui est celle donnée par l'axe (oz).



13- Caractéristiques d'une onde électromagnétique

a) Période temporelle

L'onde se reproduit identique à elle-même au bout d'une certaine durée. La plus petite durée pour laquelle ceci est vrai est appelée période temporelle et est notée T , exprimée en seconde. T est donc la durée d'une vibration entière.

b) Fréquence

La fréquence N mesure le nombre de vibrations par seconde de la source. Elle s'exprime en hertz.

Si une source vibre à la fréquence N , sa période sera $T = 1/N$.

Les ondes sonores audibles sont émises par des sources vibrant mécaniquement entre 50 et 15 000 Hz, les ondes lumineuses (électromagnétiques) sont visibles par l'oeil humain à des fréquences entre $3,7 \cdot 10^{14}$ Hz et $7,5 \cdot 10^{14}$ Hz

c) Célérité de l'onde

La célérité de l'onde est la vitesse c avec laquelle l'onde se propage. Le point M reproduit l'état de la source S avec un retard $dt = SM/c$.

La célérité des ondes dépend du milieu de propagation, de la nature physique du phénomène. Pour un même milieu de propagation, la célérité des ondes dépend souvent de la fréquence de vibration.

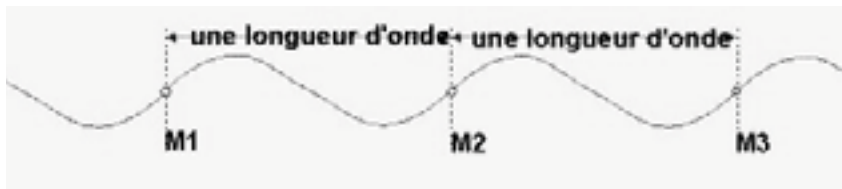
La lumière se propage à 300 000 km/s quelle que soit sa fréquence dans le vide, mais dans un matériaux transparent, la célérité des ondes lumineuses dépend de sa couleur (donc de sa longueur d'onde) et du milieu de propagation.

d) Longueur d'onde

Durant une période T , un front d'onde a parcouru une distance $l = c \cdot T = c/N$. Cette distance est appelée longueur d'onde. Elle correspond en fait à la plus petite longueur pour laquelle l'onde se reproduit identique à elle-même.

Deux point séparés par un nombre entier de longueurs d'onde sont dans le même état de vibration; on dit qu'ils vibrent en phase. Ici les points $M1$, $M2$ et $M3$ vibrent en phase, ils sont séparés par une longueur d'onde.

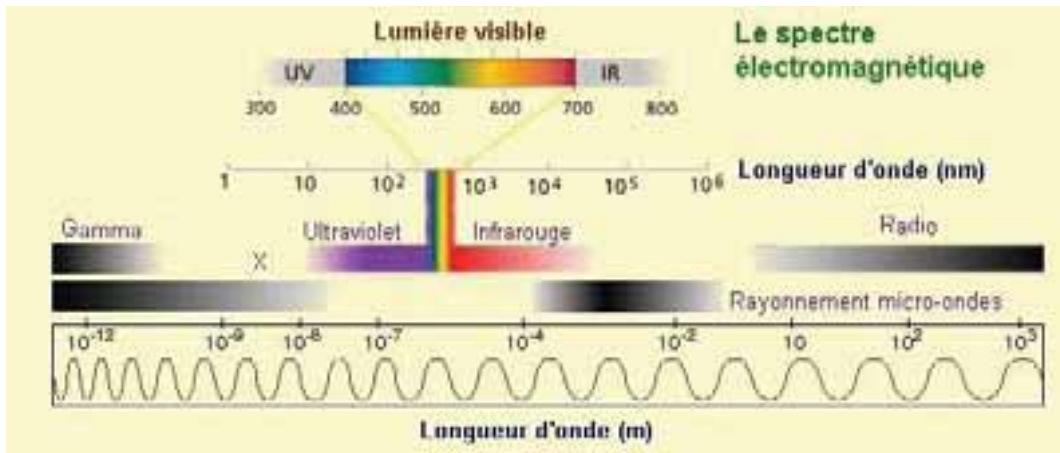
Dans le vide, la célérité des ondes électromagnétique est de 299 792 000 m/s, la lumière visible a une longueur d'onde comprise entre 0,4 μm et 0,8 μm .



2- Les ondes infrarouges

21- Définition

La lumière visible, les ondes hertziennes (radio, TV), les rayons X sont des ondes électromagnétiques qu'on peut classer suivant leur longueur d'onde.



Le domaine visible s'étend des longueurs d'onde allant de 0,4 à 0,8 μm (micromètres).

La bande infrarouge s'étend de 0,8 à 1000 μm et peut-être divisée en plusieurs sous-domaines :

- l'infrarouge proche : 0,8 à 3 μm ;
- l'infrarouge moyen : 3 à 6 μm ;
- l'infrarouge éloigné : 6 à 15 μm ;
- l'infrarouge lointain : 15 à 1000 μm .

22- Rayonnements infrarouges et température d'un corps

Même si tous les rayonnements électromagnétiques donnent lieu à des échanges énergétiques sous forme de chaleur, le rayonnement IR peut être associé de manière plus spécifique à la chaleur. En effet, des matériaux chauffés forment de bonnes sources de radiations infrarouges. C'est pour cette raison que ce type de rayonnement est également désigné par le terme de rayonnement thermique.

La température d'un corps est une grandeur physique qui caractérise le niveau énergétique de ce corps : celle-ci s'exprime en degrés Celsius ($^{\circ}\text{C}$) ou en Kelvin (K). L'origine de cette dernière échelle de température est le zéro absolu qui vaut $-273,15^{\circ}\text{C}$.

La température se mesure à l'aide de thermomètres, par contact ou par rayonnement. La mesure par contact nécessite comme l'indique la définition, un contact entre l'élément dont on veut mesurer la température et l'appareil de mesure. La mesure au moyen de thermomètres à rayonnement ne nécessite aucun contact : ces appareils mesurent des rayonnements émis par tout corps dont la T° est supérieure à $-273,15^{\circ}\text{C}$ ou zéro K, c'est-à-dire les rayonnements IR.

Le fonctionnement de ce type de thermomètre repose donc sur une relation directe entre l'énergie associée à un rayonnement IR et la température du corps qui l'a émis.

3- La thermographie infrarouge

31- Principe

Revenons à notre thermomètre à rayonnement.

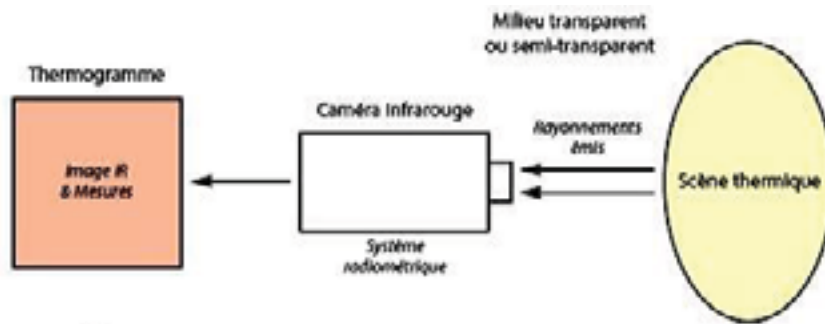
Ce dernier se compose en fait d'un radiomètre et d'un ordinateur.

Le radiomètre mesure la puissance de rayonnement émis par le corps étudié et le calculateur la transcrit en températures.

Pour les hautes températures, on parle de pyromètres.

Si on associe à l'observation d'une même scène thermique un système de transducteur(s) capable(s) de délivrer un (des) signal (aux)électrique(s), successivement ou en parallèle, proportionnel(s) à l'intensité du rayonnement issu de chaque point de la scène (avec une certaine résolution spatiale), adjoint à un calculateur qui à la fois convertit les rayonnements infrarouges en points lumineux et en températures, on obtient une caméra infrarouge.

Cet équipement permet de visualiser et de quantifier les températures d'une scène thermique : cette technique est appelée "Thermographie infrarouge".



La caméra infrarouge capte au travers d'un milieu transmetteur (ex : l'atmosphère) les rayonnements émis par une scène thermique. Le système radiométrique convertit la puissance de rayonnement en signaux numériques ou analogiques : ceux-ci sont transcrits en température par le calculateur et transformés en points lumineux sur un écran. L'image ainsi obtenue s'appelle "Thermogramme".

Voici un exemple de thermogramme :

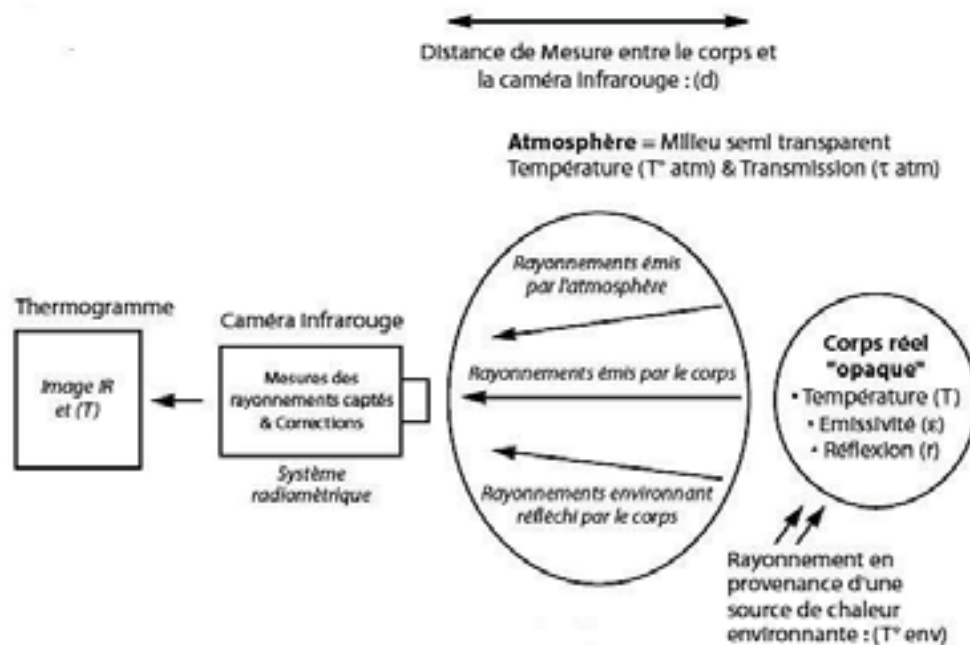
Les différentes températures sont retranscrites dans une gamme de couleurs ou une échelle de gris. Sur le thermogramme ci-dessous, les températures les plus élevées tendent vers le blanc et les moins élevées vers le violet foncé.



32- Complexité du signal délivré par une caméra IR

La caméra capte tout le rayonnement qu'elle "voit" :

- Une partie du rayonnement émis par l'objet.
- Une partie du rayonnement émis par l'environnement et partiellement réfléchi par l'objet. Chacune de ces fractions est transmise au travers de l'atmosphère, donc atténuée de par la transmission atmosphérique non optimale.
- Le rayonnement émis par l'atmosphère.



Le système radiométrique doit corriger le rayonnement capté afin de calculer avec précision la valeur de la température du corps. Cette correction tient compte d'une série de paramètres influant directement la mesure exacte de température. Ces paramètres sont appelés "Grandeurs d'influence".

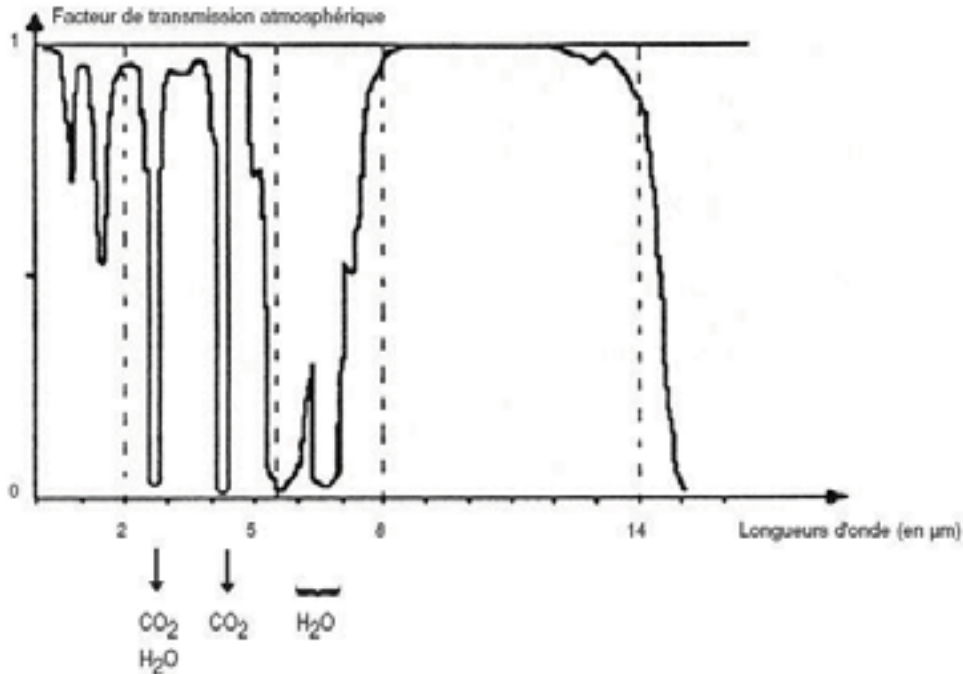
33- Grandeurs d'influence

Les facteurs intervenant dans la mesure des températures sont :

- $\{\epsilon\}$ ou Emissivité de surface du corps. L'émissivité détermine le facteur de réflexion du corps : $\rho = 1 - \epsilon$
- $\{T^{\circ}env\}$ ou Température de l'environnement supposé uniforme pour simplifier. Celle-ci est responsable du rayonnement ambiant qui se réfléchit partiellement sur le corps visé par la caméra. Notons également que l'environnement est supposé être un système isotherme, ce qui n'est pas toujours vérifié.
- $\{T^{\circ}atm\}$ ou Température atmosphérique
- $\{d\}$ ou distance de mesure entre l'objet et la caméra. Celle-ci détermine suivant la bande spectrale utilisée le facteur moyen de transmission atmosphérique dans des conditions d'humidité relative déterminées : soit τatm . Le paramètre de transmission atmosphérique détermine l'émissivité de l'atmosphère et autorise le calcul du rayonnement atmosphérique à déduire : $\epsilon atm = (1 - \tau atm)$ (pour les corps gazeux semi-transparents).

a) La transmission atmosphérique

C'est principalement la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone contenus à l'état gazeux dans l'atmosphère naturelle qui atténuent les rayonnements, comme le montre la courbe ci-dessous :



Il faut savoir que classiquement, les applications de la thermographie infrarouge s'effectuent dans un milieu ambiant naturel ou atmosphère naturelle : celle-ci constitue un milieu semi transparent ou "hublot" entre les rayonnements émis par un corps quelconque dont on veut mesurer la température et la caméra thermique. Ce milieu transmet donc en partie le rayonnement émis par une scène thermique. Pour optimiser la qualité d'imagerie et de mesures thermiques, il faut que la transmission des rayonnements infrarouges soit optimale.

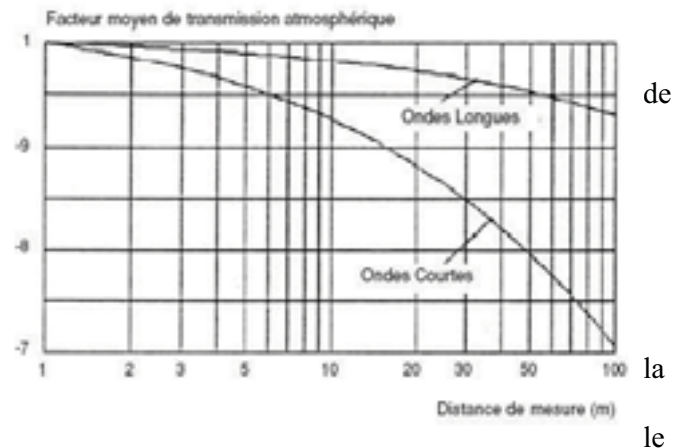
Dans ce contexte, les fabricants de matériel infrarouge ont analysé la transmission atmosphérique des ondes infrarouges et ont relevé 2 bandes spécifiques où la transmission est maximale mais non optimale (transmission inférieure à 100%) :

- La bande 2-5 µm appelée Ondes courtes (SW, Short Waves).
- La bande 7-15 µm appelée Ondes longues (LW, Long Waves).

Remarque : dans le cas de mesures infrarouges réalisées dans des milieux particuliers (gaz spécifiques,...), il faut en étudier la transmission afin d'adapter au mieux le matériel de mesure : celui-ci ne sera plus classique mais bien spécifique.

D'autre part, on tient compte des deux derniers facteurs d'influence ($\{T^{atm}\}$ et $\{d\}$) à l'aide des courbes du facteur moyen de transmission l'atmosphère en fonction de la distance de mesure. On donne ici à titre d'exemple de telles courbes pour une atmosphère à 50% d'humidité relative, ci-contre.

L'atmosphère dans laquelle on réalise la thermographie émet des rayonnements infrarouges qui perturbent également la mesure de température d'un corps. Les rayonnements émis par l'atmosphère doivent être déduits par



calculateur de la caméra thermique : ceux-ci dépendent de la température atmosphérique et de son émission. L'atmosphère est un milieu semi-transparent aux rayonnements infrarouges : celle-ci propage tous les rayonnements en provenance de l'objet réel (émis & réfléchis). Cette propagation n'est pas optimale et est régie par le facteur moyen de transmission atmosphérique. Ce facteur, assimilé aux fenêtres spectrales utilisées par les caméras thermiques, dépend de la distance de mesure entre la caméra et l'objet et du taux d'humidité atmosphérique.

b) Corps de référence : le corps noir

Pour étudier les autres grandeurs d'influence, il faut d'abord s'intéresser au comportement du corps noir, qui est un corps de référence pour l'étalonnage de la caméra.

Le corps noir est un corps capable d'absorber tous les rayonnements reçus sans en réfléchir aucun, quelle que soit la longueur d'onde considérée. Ainsi, s'il reçoit de la lumière et qu'il n'en réfléchit pas, il paraîtra noir, d'où son nom. Tout corps qui absorbe émet également et le corps noir est celui qui émet le maximum d'énergie de rayonnement possible pour une température donnée. Il s'agit donc d'un corps idéal.

Néanmoins, considérons qu'un corps noir absorbe tous les rayonnements qu'il reçoit et en réémet d'autres en accord avec les trois lois suivantes : loi de Stefan-Boltzman, loi de Wien et loi de Planck.

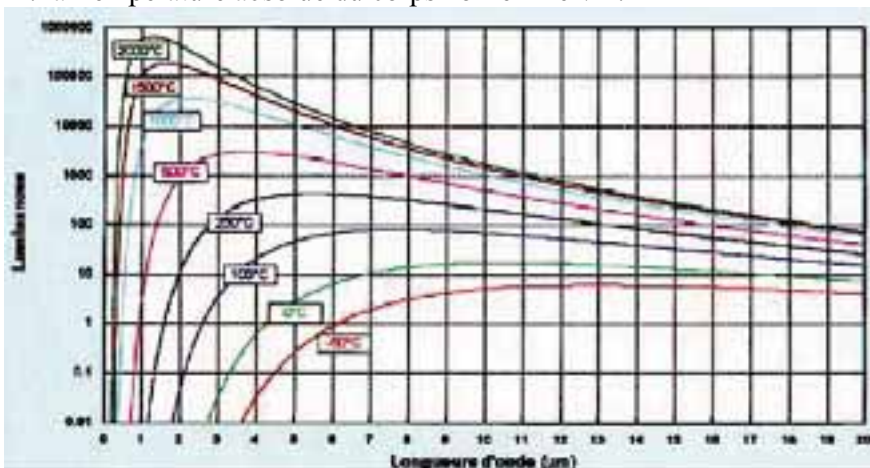
- Loi de Planck : la puissance électromagnétique émise par un corps noir dans un angle solide de 2Π stéradians (exitance énergétique spectrique, anciennement appelée émittance spectrale, qui est l'intégrale sur un angle solide de 2Π stéradians de la luminance énergétique spectrique, anciennement appelée luminance spectrale).

On a :

$$W_{\lambda} = \frac{2 \cdot \Pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot (e^{(h \cdot c / \lambda \cdot k \cdot T)} - 1)} \text{ (Watts/cm}^2\mu\text{)}$$

avec :

- λ : la Longueur d'onde;
- W_{λ} : le Flux de puissance émis par un corps noir à la longueur d'onde λ ;
- c : la Vitesse de la lumière = $3 \cdot 10^{10}$ cm s⁻¹;
- h : Constante de Plank = $6,6 \cdot 10^{-34}$ J s;
- k : Constante de Boltzman = $1,4 \cdot 10^{-23}$ W s² K⁻¹;
- T : la Température absolue du corps noir en Kelvin.



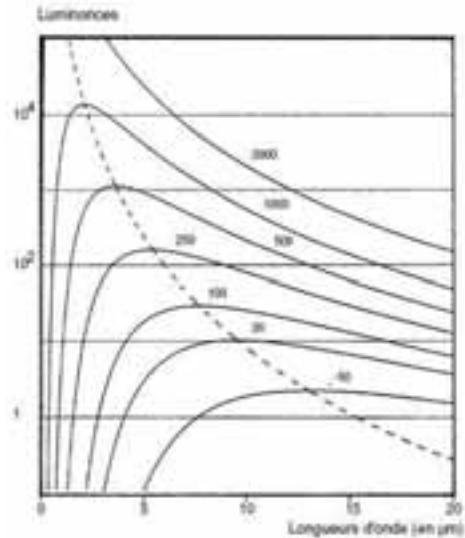
Ces formulations mathématiques complexes sont représentées par les courbes ci-contre. Les longueurs d'onde sont exprimées en micromètre et les exitances spectrales sont exprimées en $Wm^{-2}\mu m^{-1}$. (NB : l'échelle des ordonnées est logarithmique).

- Loi de Wien : elle permet de relier la température d'un corps avec la longueur d'onde de son maximum d'émission. Plus le corps est chaud, et plus le maximum d'émission se déplace vers les courtes longueurs d'onde dans le visible (si le corps est suffisamment chaud, la couleur passe ainsi du rouge au bleu).

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} (\mu m)$$

- Loi de Stefan-Boltzmann :

$$W = \sigma \cdot T^4 (\text{Watts/cm}^2)$$



avec :

- σ : Constante de Stefan-Boltzmann = $5,7 \cdot 10^{-12} (W \text{ cm}^{-2} K^{-4})$;
- T la Température absolue du corps noir en Kelvin.

Le flux de puissance total émis par un corps noir (ou exitance totale, exprimé en $W \text{ cm}^{-2}$) est proportionnel à la quatrième puissance de sa température absolue. Pour information, le flux de puissance émis par le soleil dans le spectre visible n'est que de 25% du flux total.

La connaissance du comportement du corps noir (en matière de puissance de rayonnement) sert d'élément de comparaison, et l'étalonnage de la caméra s'effectue en fonction de ce comportement. En effet, les réglages consistent à effectuer des corrections par rapport à ces lois visualisées par les courbes idéales ci-dessus. Ainsi, il sera nécessaire de corriger les courbes de références de la caméra en tenant compte de l'émissivité d'un corps réel, par exemple de la manière suivante (rappelons que la caméra est sensible à la puissance de rayonnement W de l'objet visé):

$$W = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 (\text{Watts/cm}^2)$$

La loi de Stefan-Boltzmann tient compte cette fois-ci de l'émissivité du corps réel.

Précisons que l'émissivité d'un corps représente l'aptitude de ce corps à émettre du rayonnement infrarouge. C'est le rapport entre le flux de puissance émis à cette longueur d'onde par un corps réel porté à une température T et le flux de puissance qui serait émis à la longueur d'onde par un corps noir porté à la température T.

On a :

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{W_{\lambda}}{W_{\lambda 0}} (\text{sans unité})$$

avec :

- W_{λ} : Flux de puissance émis par un corps réel à la longueur d'onde λ ;

- $W_{\lambda 0}$: Flux de puissance émis par un corps noir à la longueur d'onde λ ;
- Les corps noir et réel sont à la même température.

Le corps gris est un objet dont l'émissivité n'est pas maximale mais "constante à toutes les longueurs d'onde" : ϵ est inférieure à 1 mais reste constante quelle que soit la longueur d'onde considérée. En thermographie infrarouge classique, on considère que les objets réels sur lesquels on réalise de l'image et de la mesure de température sont des corps gris.

Voici quelques exemples d'émissivité de corps réel:

Matériaux	T(°C)	dl (µm)	ϵ_n (dl & T)
Peau	30	2 à 5	0,98
Papier	30	8 à 12	0,95
Bois brut	20	2 à 5	0,83
Argile	30	8 à 12	0,95
Béton	20	2 à 5	0,94
Sol sec	20	2 à 5	0,90
Sol humide	20	2 à 5	0,95
Eau	0 à 100	8 à 12	0,93
Eau	0 à 100	2 à 5	0,95
Glace	< 0	8 à 12	0,95
Peinture mate	20 à 100	2 à 5	0,95
Peinture brillante	20 à 100	2 à 5	0,90
Vêtements (Textile)	30	8 à 12	0,95
Acier oxydé	100	2 à 5	0,74
Acier poli	100	2 à 5	0,07
Acier rouillé	20	2 à 5	0,69
Aluminium en feuille mate	100	2 à 5	0,09
Argent	30	8 à 12	0,02
Carbone graphite	30	8 à 12	0,70/0,80
Cuivre grossier	30	8 à 12	0,05/0,10
Fer galvanisé	30	2 à 5	0,25
Fonte en fusion	1300	2 à 5	0,28
Or	30	8 à 12	0,01/0,10
etc...			

- T est la température en °C à laquelle a été réalisée la mesure;
- "dl" est la longueur d'onde en µm ou la bande spectrale;
- $\epsilon_n(dl \& T)$ est l'émissivité normale pour dl et T.

c) Etalonnage de la caméra IR

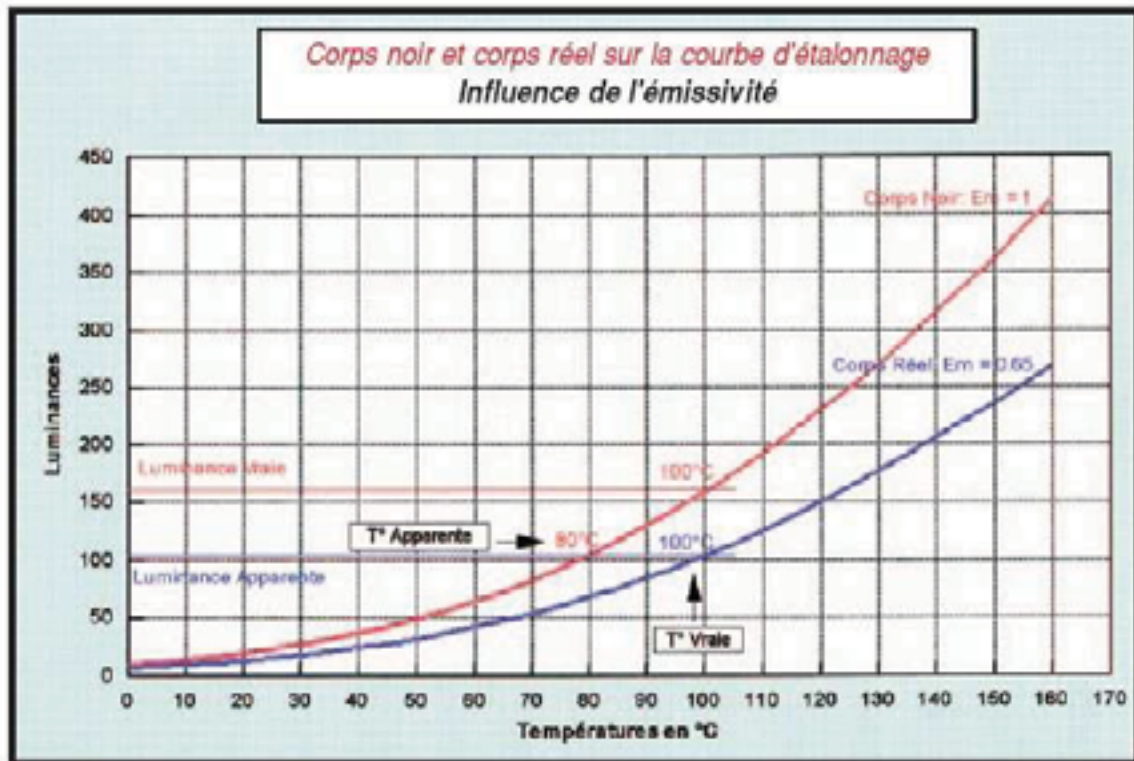
Pratiquement, la scène thermique observée est composée essentiellement de corps gris ou corps réels. Ainsi, la transcription en température nécessitera l'intégration des grandeurs d'influence et principalement la connaissance du coefficient d'émissivité.

L'émissivité, dans le cas d'un corps gris, modifiera la valeur de la luminance émise (luminance apparente) par rapport à la valeur de la luminance qu'aurait émis un corps noir référentiel à la même température (luminance vraie), d'une manière connue : ceci assimile la mesure de température d'un corps gris à la mesure de température d'un corps noir à partir duquel la caméra a été calibrée.

Les autres paramètres d'influence modifient ensuite la valeur de la luminance vraie avant de la transcrire correctement en température sur base de la courbe d'étalonnage (température vraie).

exemple : Considérons uniquement l'émissivité comme unique grandeur d'influence. On veut mesurer

par thermographie la température d'un corps réel chauffé à 100°C et dont l'émissivité est de 0,65.



La caméra a été étalonnée sur base d'un corps noir référentiel d'émissivité égale à 1.

- Le détecteur mesure 105 unités radiométriques (luminance apparente) qui correspondent à une température de corps noir (température de luminance) de 80°C sur la courbe d'étalonnage de la caméra IR.
- En tenant compte du coefficient d'émissivité du corps réel, on obtient une valeur corrigée de la luminance apparente égale à : $105 / 0,65 = 160$, ce qui correspond à la température vraie de 100°C sur la courbe d'étalonnage de la caméra. L'appareil de mesure doit donc intégrer le coefficient d'émissivité du corps réel avant de se référer aux courbes d'étalonnage afin d'obtenir la véritable valeur de la température.

On a effectivement assimilé la mesure de température du corps réel à celle sur un corps noir référentiel afin de se situer dans les conditions d'étalonnage de l'appareil de mesure.

4- Application de la thermographie infrarouge à la détection des mines antipersonnel enfouies dans le sol

41- Principe

Il y a deux méthodes essentiellement pour détecter les rayonnements infrarouges. La détection passive qui repose sur l'enregistrement de radiations naturellement émises par l'objet, et la détection active qui fait appel à une source extérieure permettant de stimuler l'émission de rayonnement infrarouge par l'objet.

La détection est basée sur le fait que le sol ne restitue pas les infrarouges à l'atmosphère de la même manière selon qu'il contienne ou non une mine enterrée, puisque cette dernière ne possède pas les

mêmes propriétés thermiques.

Si la réponse est due à un flux d'énergie variant avec le temps, la mine présentera une courbe de température qui ne coïncidera pas avec celle du sol au cours du temps. On appelle cet effet « l'effet de volume » qui est par conséquent durable dans le temps. Par contre, si la modification de température est juste due à la modification de la couche superficielle du sol, on parle « d'effet de surface ». Cet effet est temporaire et n'est perceptible que durant un temps limité après l'enfouissement de la mine.

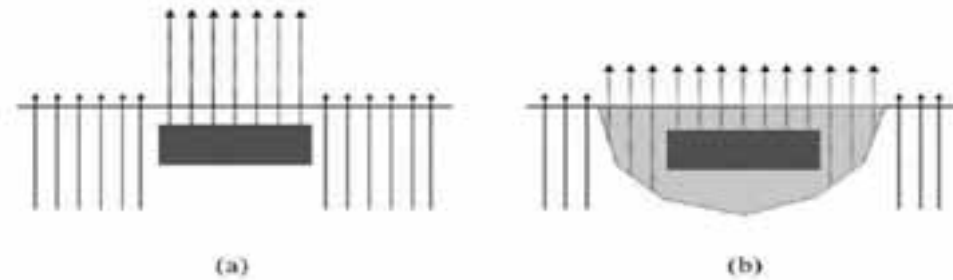
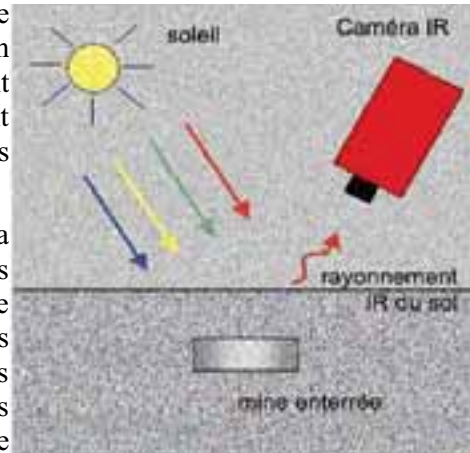


Figure 9. Thermal effects; (a) volume effect and (b) surface effect.

42-La thermographie passive photothermique

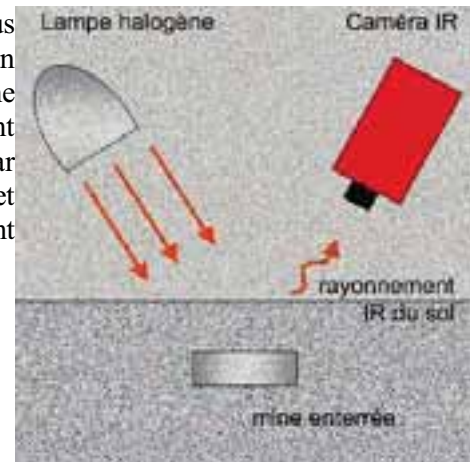
La façon la plus simple d'utiliser une caméra infrarouge pour détecter la présence de mines enterrées consiste en l'observation de l'évolution circadienne du rayonnement thermique infrarouge émis par la surface du sol. Ce rayonnement varie parce que la température du sol elle-même varie sous l'effet du rayonnement solaire et des facteurs atmosphériques.

La présence de mines entraîne un contraste thermique local (la zone est plus ou moins chaude que le sol sans mine). Il y a des heures privilégiées d'observation pour avoir un contraste maximum. Les inconvénients sont, d'une part la durée des essais qui est grande, d'autre part la grande variabilité des conditions atmosphériques (nébulosité, vent, pluie...) et l'hétérogénéité des sols (nature, humidité, végétation...) qui entraînent un faible rapport signal/bruit pour la détection du contraste thermique dû à la présence de la mine. La méthode n'est guère applicable qu'à des terrains homogènes et secs et des conditions climatiques telles que celles rencontrées dans les régions arides chaudes.



43-La thermographie active photothermique

Pour palier ces deux défauts, l'observateur peut intervenir plus directement en réalisant la sollicitation thermique à l'aide d'un flux lumineux issue d'une source commandable telle qu'une lampe halogène. Les durées d'examen sont considérablement réduites et les conditions aux limites sont imposées par l'observateur, mais la profondeur sondée est moins importante et les hétérogénéités du sol sont toujours présentes et rendent l'interprétation des images difficiles.



431- Modélisation

La chaleur consiste en un transfert d'énergie de type microscopique entre deux systèmes. Lorsqu'il n'y a pas de déplacement global de matière, nous l'appelons diffusion thermique ou conduction thermique. Le mathématicien et physicien français Joseph Fourier étudia ce phénomène et apporta une contribution majeure en 1815 en dégagant une loi phénoménologique et l'équation de diffusion associée.

Cette équation est la suivante : $\vec{J}_{th} = -\lambda \cdot \vec{grad}(T)$

est le vecteur courant volumique thermique

λ est un scalaire positif qui désigne la conductivité thermique du matériau constituant le système étudié.

T désigne la température en kelvin.

4311- le vecteur courant thermique (ou vecteur densité de flux de chaleur)

Par observation, nous pouvons constater que les parties chaudes d'un système se refroidissent au contact des parties froides qui, elles, se réchauffent. Comme il n'y a pas de déplacement global de matière, il n'y a pas de variation d'énergie cinétique macroscopique. Comme il n'y a pas de variations d'altitude ou d'autres paramètres pouvant induire une variation de l'énergie potentielle macroscopique, nous pouvons affirmer que l'énergie mécanique macroscopique ne varie pas (précisons qu'il n'y a pas de travail).

Le système est donc le siège d'une variation d'énergie de type microscopique : l'énergie interne.

Cet échange d'énergie interne entre les parties froides et chaudes peut être vu, par analogie avec un déplacement de particules dans le cas de gaz des zones de forte concentration vers des zones de faible concentration, comme un flux thermique orienté des parties chaudes dans les parties froides et tendant à uniformiser la température du système total.

Ce flux thermique traduit l'échange d'énergie interne entre un volume limité par une surface fermée S et l'extérieur. Ce flux est à travers S est égal à la variation d'énergie interne: $\Phi_{th} = \frac{\partial U}{\partial t} = J_{th} \cdot S$. Ici J_{th} est la densité de flux (ou courant thermique) moyenne à travers la surface S.

Le vecteur courant volumique non convectif d'énergie interne à travers une surface ouverte S, dans un sens défini par sa normale orientée, est décrit par : $\Phi_{th} = \int \vec{J}_{th} \cdot \vec{n} \cdot dS$

4312 -- la conductivité thermique λ

L'uniformisation de la température du système a lieu plus ou moins rapidement et dépend principalement de la nature des matériaux mis en jeu. En effet, nous savons par expérience qu'un objet en métal chauffe beaucoup plus vite que le même objet en pierre. Cette différence de comportement en fonction de la nature du matériau est exprimée par le coefficient λ . Plus sa valeur est faible et meilleur isolant il sera.

Tableaux de valeurs de λ de divers matériaux

<i>matériau</i>	<i>conductivité ($W.m^{-1}.K^{-1}$)</i>
acier doux	46
air	0,026
bois	0,16
aluminium	237
béton	0,92

4313-- la fonction gradient

Le gradient d'une fonction scalaire $f(x,y,z)$ est un vecteur ayant pour coordonnées :

$$\vec{grad}(f) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \\ \frac{\partial f}{\partial z} \end{pmatrix}$$

T la température est fonction de la position $M(x, y, z)$ du point étudié et du temps.

4314 -- l'équation différentielle de diffusion thermique

A une dimension, en régime quelconque, on obtient une équation de type : $\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$, en

combinant la loi de Fourier avec l'équation de continuité relative à l'énergie (traduisant la conservation de l'énergie interne du système : {système plus milieu extérieur}).

Le coefficient a est la diffusivité thermique : il s'exprime en $m^2.s^{-1}$ et est relié à la conductivité thermique de la manière suivante : $a = \lambda / (\rho \cdot c)$, où ρ et c sont respectivement la masse volumique en $kg.m^{-3}$ du corps étudié et c sa chaleur massique en $J.kg^{-1}.K^{-1}$.

Plus le coefficient est élevé et plus l'uniformisation de la température s'effectue rapidement.

4315- Modélisation de la mine enterrée

a) Modélisation / simulation

Considérons la mine comme un objet cylindrique d'épaisseur enterrée à une profondeur et située sur une couche de sable d'épaisseur . On considère que le diamètre D de la mine ainsi que l'épaisseur de sable ont des valeurs telles que l'on puisse supposer l'écoulement de ce la chaleur comme monodimensionnel dans la partie proche de l'axe de symétrie du système, c'est-à-dire D supérieur à la fois à et .

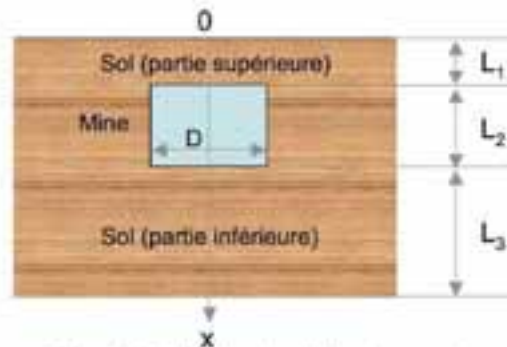


Figure 1. Modèle physique de la mine enterrée.

Dans ces conditions, le modèle étudié pour la simulation numérique du système ainsi constitué es celui du mur tricouche présenté ci-dessous.

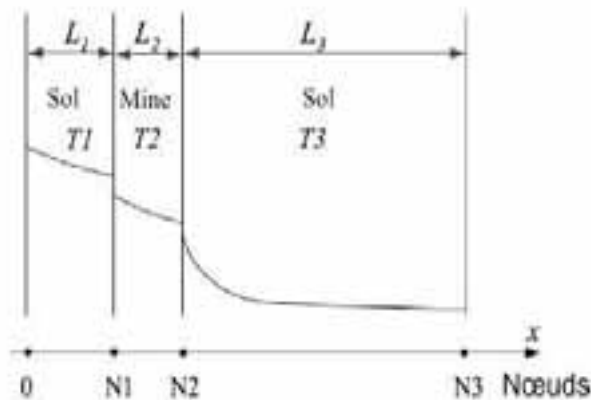


Figure 2. Modèle tricouche monodimensionnel applicable au cas d'une mine enterrée à une profondeur modérée.

En ce qui concerne les conditions aux limites, les hypothèses sont les suivantes:

- Surface du sol (face avant du système, nœud 0)

Les pertes radiato-convectives à la surface du sol sont linéarisées et écrites de la manière suivante :

$$-h(T(x=0,t) - T_{amb})$$

Un flux d'énergie absorbé à la surface du sol est imposé. Ce flux peut avoir une composante continue et une composante périodique (chauffage sur 24H par exemple). Dans notre étude, il n'y a pas de composante périodique puisqu'il s'agira d'une fonction en échelon : on chauffe le sol avec une valeur de flux constant pendant une certaine durée et puis on arrête .

On obtient ainsi alors à la surface du sol :

$$\phi_{th} = -\lambda \cdot (\partial^2 T / \partial x^2) = A_{CW} + A_M \cdot \cos(2\pi ft) - h(T(x=0, t) - T_{amb})$$

- Face arrière du système (nœud N3).

Le flux est supposé nul à la profondeur du nœud N3, pour se rapprocher des conditions du milieu semi-infini.

- Interfaces (nœuds N1 et N2)

Aux interfaces entre les milieux (sol/mine puis mine/sol), on suppose l'existence d'une résistance thermique R pouvant expliquer une rupture dans la valeur de la température des milieux en contact. Deux équations seront alors rattachées à ce phénomène, qui sont l'équation reliant le saut de température à la résistance thermique et l'équation traduisant la continuité des flux dans les deux milieux:

$$\phi_{th-1/2} = (T_1 - T_2)_{1/2} / R_{1/2} \text{ et } \phi_{th-1/2} = -\lambda_1 \cdot (\partial T1 / \partial x)_{1/2} = -\lambda_2 \cdot (\partial T2 / \partial x)_{1/2}$$

A partir de ces équations, nous effectuons une simulation numérique en utilisant une méthode numérique simple qui est la méthode aux différences finies explicite (appelée méthode d'Euler).

Cette méthode consiste à discrétiser les équations comportant des dérivées partielles première ou seconde par rapport au temps et à la coordonnée x de la manière suivante :

$$(\partial T / \partial t) = (\Delta T / \Delta t) = (T^{t+\Delta t} - T^t) / \Delta t$$

et

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = (T_{x-\delta x} - 2 \cdot T_x + T_{x+\delta x}) / \Delta x^2$$

d'où :

$$(T^{t+\Delta t} - T^t) / \Delta t = (T_{x-\delta x} - 2 \cdot T_x + T_{x+\delta x}) / \Delta x^2$$

Il faut par contre faire attention à ce que le critère de stabilité soit respecté, sous peine de voir les calculs diverger et n'avoir plus de signification : $F_0 = a \cdot \Delta t / \Delta x^2 < 0,5$, étant appelé nombre de Fourier de la troncature.

On ne peut donc pas prendre des pas Δx trop petits car la valeur de F_0 est inversement proportionnelle à celle du carré de Δx et dépasserait très vite la valeur limite.

Les conditions aux limites extérieures et aux interfaces sont déstabilisantes et conduisent à des nombres de Fourier de la troncature encore plus petits pour ne pas diverger.

Ce schéma numérique a été écrit sous forme d'une feuille de calcul du tableur Excel. A chaque nœud correspond une colonne et à chaque temps une ligne. Le nombre de ligne maximum possible du tableur est de 32000.

Les conditions du calcul sont les suivantes :

- le système est supposé initialement isotherme et sa température nulle.
- Δx^2 est de l'ordre du millimètre et est fixé par la géométrie du système.

- Δt est limité par les conditions de stabilité. Celles-ci sont complexes et n'ont pas été explicitées mais trouvées empiriquement. Elles dépendent des propriétés thermiques des milieux et de la taille des mailles d'espaces.

- Le durée maximale de l'échauffement ainsi simulé est égal à 32000 Δt . Si l'on veut aller plus loin il faut faire un second calcul en prenant pour conditions initiales (première ligne du calcul) les températures finales du premier calcul (dernière ligne).

- le coefficient de transfert radiato-convectif h au niveau du sol est de l'ordre de $10 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$.

- la valeur du flux imposé n'a pas de composante périodique. Il est supposé égal 100 W m^{-2} pendant une heure, puis nul. Les calculs sont arrêtés après une heure de chauffage.

Les propriétés thermiques et les épaisseurs des trois couches (sol au dessus et au desous de la mine, mine) sont données ci-dessous.

On arrive aux résultats présentés ci-dessous (toutes les lignes de calcul n'ont pas été présentées dans ce tableau).

Simulation avec une mine enterrée :

Extraction de profils de température dans le sol

Cas Mine de 5 cm enterrée à 2 cm - Propriétés standards - entre 8:00 et 8:54
augmentation de température à la surface du sol

	Fo1	t(s)	x	t(heure)	x	0,00000E+00	0,00200	0,00400	0,00600	0,00800
67	17,1079	28800		8.00		0,00000E+00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
1867	17,2149	28980		8.05		1,72297E+00	1,27764	0,88788	0,54842	0,24938
3667	17,3218	29160		8.10		2,10987E+00	1,67127	1,25796	0,86943	0,50406
5467	17,4287	29340		8.15		2,32234E+00	1,89200	1,47921	1,08435	0,70748
7267	17,5356	29520		8.20		2,48625E+00	2,06404	1,65688	1,26538	0,89001
9067	17,6425	29700		8.25		2,63297E+00	2,21863	1,81827	1,43254	1,06203
10867	17,7495	29880		8.30		2,77125E+00	2,36449	1,97108	1,59165	1,22680
12667	17,8564	30059,9		8.35		2,90376E+00	2,50434	2,11775	1,74463	1,38556
14467	17,9633	30239,9		8.40		3,03147E+00	2,63914	2,25920	1,89225	1,53888
16267	18,0702	30419,9		8.45		3,15487E+00	2,76939	2,39590	2,03497	1,68718
18067	18,1771	30599,9		8.50		3,27425E+00	2,89542	2,52818	2,17312	1,83077
19867	18,2837	30779,3		8.55		3,38950E+00	3,01708	2,65590	2,30651	1,96946
21667	18,3906	30959,3		8.60		3,50158E+00	3,13541	2,78013	2,43629	2,10441
23467	18,4975	31139,3		8.65		3,61031E+00	3,25019	2,90065	2,56222	2,23538
25267	18,6045	31319,3		8.70		3,71585E+00	3,36162	3,01765	2,68448	2,36256
27067	18,7114	31499,3		8.75		3,81835E+00	3,46984	3,13130	2,80324	2,48613
28867	18,8183	31679,3		8.80		3,91796E+00	3,57501	3,24175	2,91868	2,60626
30667	18,9252	31859,3		8.85		4,01481E+00	3,67726	3,34915	3,03094	2,72309
32467	19,0321	32039,3		8.90		4,10901E+00	3,77673	3,45362	3,14015	2,83676

Explicite Finite Differences

Dimensional parameters

Case: Mine enterrée - marche de flux absorbée en volume - 3 couches

in red: parameters to enter

All units in MKS

Propriétés thermiques des couches	1e couche : sol sable sec	2e couche : mine	3e couche : sol sable sec
conductivité thermique	0,350 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	2,200 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	0,350 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Chaleur volumique	1,473E+06 $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$	2,210E+06 $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$	1,473E+06 $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$
Diffusivité, k	2,376E-07 m^2s^{-1}	9,955E-07 m^2s^{-1}	2,376E-07 m^2s^{-1}
Efficacité	7,180E-02 $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$	2,206E-02 $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$	7,180E-02 $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$

Paramètres géométriques		Epaisseur totale de sol considéré: 2,700E-01 m		Nb total de tra 40,00	
Première couche		Deuxième couche		3e couche	
L_1 (m)	2,000E-02	L_2 (m)	5,000E-02	L_3 (m)	2,000E-01
Nb de tranches (N1)	10	Nb de tranches (N2)	10	Nb de tranches (N3)	20
Pas d'espace Δx_1 (m)	2,000E-03	Δx_2 (m)	5,000E-03	Δx_3 (m)	1,000E-02

Propriétés des interfaces					
Résistance therm. de conta	2,000E-04 $\text{V}^{-1}\text{m}^2\text{K}$		1,000E-04 $\text{V}^{-1}\text{m}^2\text{K}$		
$Dx1 / (k R)$	28,571	$Dx2 / (k R)$	11,364	$Dx3 / (k R)$	****
$Ri_1 = x_1 / (k1 R)$	285,714				
MBi_1	0,004				

Paramètres de discrétisation					
$DFul = k \cdot Du(Dx_1)^2$	0,005940	$\Delta Fu2$	0,003362	$\Delta Fu3$	0,000238
Pas de temps, Δt (s)	1,000E-01	Δt (s)	1,000E-01	Δt (s)	1,000E-01

Conditions à la surface du sol = Flux constant (marche) + flux modulé : $q = A_{cc} + A_c \cos(2\pi ft)$					
Amplitude partie modulée / 0,000	W.m^{-2}	Fréquence de modulatio	1,1570E-05	Composante non modulé	100,000 W.m^{-2}
$t > 0$: linear heat losses (factor h)					
Coeff. échange convectif . l	1,000E-01 $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$	Coeff. échange convecti	0,000E+00 $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$		
Nombre de Biot: Bi_0	0,571	Nombre de Biot: Bi_0	0,000		
DBi_0	0,057	DBi_0	0,000		



Car de cloffage solins, pério
niveau (vitesse de la fonction

Conditions initiales	$T(x,0) = 0$
----------------------	--------------

simulation sans mine :

Explicite Finite Differences

Dimensional parameters

Case: **Mine enterrée - marche de flux absorbée en volume - 3 couches**

in red: parameters to enter

All units in MKS

Propriétés thermiques des couches	1e couche : sol sable sec	2e couche : mine	3e couche : sol sable sec
conductivité thermique	0,350 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	0,350 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	0,350 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Chaleur volumique	1,473E+06 $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$	1,473E+06 $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$	1,473E+06 $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$
Diffusivité, k	2,376E-07 m^2s^{-1}	2,376E-07 m^2s^{-1}	2,376E-07 m^2s^{-1}
Effusivité	7,180E+02 $\text{Jm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$	7,180E+02 $\text{Jm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$	7,180E+02 $\text{Jm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$

Paramètres géométriques	Epaisseur totale de sol considéré: 2,700E-01 m		Nb total de tra 40,00			
	Première couche		Deuxième couche		3e couche	
L_1 (m)	2,000E-02	L_2 (m)	5,000E-02	L_3 (m)	2,000E-01	
Nb de tranches (N1)	10	Nb de tranches (N2)	10	Nb de tranches (N3)	20	
Pas d'espace Δx_1 (m)	2,000E-03	Δx_2 (m)	5,000E-03	Δx_3 (m)	1,000E-02	

Propriétés des interfaces					
Résistance therm. de conta	5,000E-05 $\text{W}^{-1}\text{m}^2\text{K}$		5,000E-05 $\text{W}^{-1}\text{m}^2\text{K}$		
$Dx1 / (k R)$	114,286	$Dx2 / (k R)$	285,714	$Dx3 / (k R)$	****
$Bi_1 = \alpha_1 l / (k_1 R)$	1142,857				
$1/Bi_1$	0,001				

Paramètres de discrétisation					
$DFo1 = k \cdot Dt / (Dx_1)^2$	0,005940	$\Delta Fo2$	0,000950	$\Delta Fo2$	0,000238
Pas de temps, Δt (s)	1,000E-01	Δt (s)	1,000E-01	Δt (s)	1,000E-01

Conditions à la surface du sol - Flux constant (marche) + flux modulé : $q = A_{\infty} + A_1 \cos(2\pi ft)$					
Amplitude partie modulée f	0,000 Wm^{-2}	Fréquence de modulation	1,1570E-05	Composante non modulé	100,000 Wm^{-2}
$t > 0$: linear heat losses (factor h)					
Coeff. échange convectif : h	1,000E+01 $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$	Coeff. échange convecti	0,000E+00 $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$		
Nombre de Biot: Bi_0	0,571	Nombre de Biot : Bi_N	0,000		
DBi_0	0,057	DBi_N	0,000		

Cas du chauffage solaire, périodique (utilisation de la fonction cos)

Conditions initiales	$T(x,0) = 0$
----------------------	--------------

Extraction de profils de température dans le sol

Cas Mine de 5 cm enterrée à 2 cm - Propriétés standards - entre 8:00 et 8:54
augmentation de température à la surface du sol

	Fo1	t(s)	x t(heure)	x	0,00000E+00	0,00200	0,00400	0,00600	0,00800
67	17,1079	20000	0,00	0,00000E+00	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
1067	17,2149	20900	0,05	1,70663E+00	1,35297	0,99261	0,70331	0,47928	
3667	17,3218	29160	0,10	2,30456E+00	1,97195	1,60627	1,28789	1,01572	
5467	17,4287	29340	0,15	2,79949E+00	2,40488	2,04550	1,72209	1,43456	
7267	17,5356	29520	0,20	3,12153E+00	2,74200	2,39080	2,06872	1,77601	
9067	17,6425	29700	0,25	3,38546E+00	3,01870	2,67581	2,35730	2,06364	
10867	17,7495	29880	0,30	3,60900E+00	3,25349	2,91834	2,60425	2,31167	
12667	17,8564	30059,9	0,35	3,80270E+00	3,45704	3,12921	2,81987	2,52947	
14467	17,9633	30239,9	0,40	3,97349E+00	3,63665	3,31565	3,01113	2,72351	
16267	18,0702	30419,9	0,45	4,12619E+00	3,79732	3,48272	3,18295	2,89847	
18067	18,1771	30599,9	0,50	4,26430E+00	3,94270	3,63408	3,33897	3,05781	
19867	18,2837	30779,3	0,55	4,38999E+00	4,07507	3,77205	3,48144	3,20366	
21667	18,3906	30959,3	0,60	4,50606E+00	4,19734	3,89962	3,61336	3,33899	
23467	18,4975	31139,3	0,65	4,61359E+00	4,31065	4,01792	3,73586	3,46486	
25267	18,6045	31319,3	0,70	4,71376E+00	4,41622	4,12822	3,85020	3,58252	
27067	18,7114	31499,3	0,75	4,80752E+00	4,51505	4,23154	3,95739	3,69296	
28867	18,8183	31679,3	0,80	4,89562E+00	4,60794	4,32870	4,05827	3,79700	
30667	18,9252	31859,3	0,85	4,97871E+00	4,69556	4,42037	4,15352	3,89533	
32467	19,0321	32039,3	0,90	5,05731E+00	4,77844	4,50713	4,24371	3,98851	

Après avoir chauffé la mine pendant environ une heure (soit entre 8h00 et 8h54), on constate que la surface du sol au-dessus de la mine a augmenté de 4,11°C et sans mine de 5,06°C selon la simulation.

On constate qu'il y a une différence de 0,95 °C entre les deux configurations, ce qui se traduit par une zone moins chaude au-dessus de la mine.

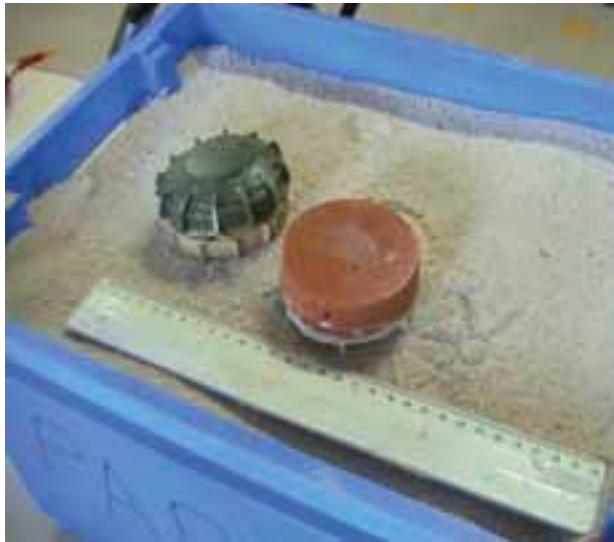
b) Expériences

D'après le modèle mis en place dans le paragraphe précédent et en tenant compte des dimensions des spécimens de mines dont nous disposons, nous avons effectué le montage composé avec le matériel suivant:

- bac à sable de dimensions : 20 cm (Hauteur) * 31 cm (largeur) * 42 cm (Longueur)
- projecteur de chantier à ampoule halogène
- un luxmètre pour mesurer l'éclairement reçu par le sol : E=1250 Lux (relative cependant à la lumière visible)
- un chronomètre pour mesurer la durée d'insolation
- un double-décimètre
- une caméra IR bande II, mesurant les ondes IR dont la longueur d'onde est comprise entre 3 et 5 μm .

Les photographies données à la suite décrivent le montage réalisé et les conditions de mesure.

Cet ensemble expérimental ne permet pas de faire des mesures quantitatives, que ce soit au niveau du flux radiatif imposé par la lampe et à celui des températures du sol relevées par la caméra. Ceci ne permet donc pas de comparer précisément avec le calcul numérique.



Nous avons utilisé deux véritables mines à effet de souffle, mesurant chacune environ 8 cm de diamètre et d'une épaisseur d'environ 7cm.



Le montage utilisé pour effectuer les expériences est le suivant : un bac à sable dans lequel les deux mines décrites précédemment sont enterrées, chauffé par un projecteur halogène de chantier.



La caméra infrarouge utilisée pour visualiser la scène thermique est montée sur un trépied photo et pointée sur le bac à sable. L'image est visible sur le moniteur (en noir et blanc) en bas à gauche. Les zones très chaudes sont claires et les moins chaudes sont sombres.

La caméra a été prêtée par l'ONERA.

Le contraste thermique négatif dû à la mine, prévu par la modélisation mathématique précédemment présentée, est effectivement perceptible à l'aide de la caméra IR mais dans la configuration positive, c'est-à-dire que la zone qui se trouve au-dessus de la mine est observée en surbrillance, donc plus chaude.

Cette incompatibilité peut être due à de nombreux facteurs : le sable était peut-être un peu humide, les paramètres caractéristiques des milieux étudiés ne correspondent pas aux valeurs données dans les tables (granularité différente, présence d'impuretés dans le sable, valeurs différentes de celles des matériaux utilisés, notamment du plastique constituant la mine, etc.). Nous nous attacherons donc à trouver des valeurs plus proches de la réalité.

D'autre part, nous ne disposons d'une caméra ayant un système d'acquisition de mesures que depuis aujourd'hui, ce qui ne nous a pas laissé le temps d'effectuer des mesures quantitatives. Néanmoins, nous poursuivrons nos efforts dans les jours qui viennent.

Malgré ces obstacles, nous pouvons affirmer que cette méthode de détection, bien qu'actuellement limitée à des zones de désert, permet de détecter des mines enfouies puisque le contraste thermique est effectivement observé. Nous espérons par la suite, en affinant la méthode de balayage des zones contaminées afin de contourner le problème de la végétation, améliorer ce projet.

5) Conclusions et perspectives d'avenir

Après avoir mis en place progressivement le cadre de notre étude (ce qui n'a pas été facile du fait de la modification de la composition de notre groupe et de l'éloignement géographique de l'un de nos membres), nous avons pu vérifier expérimentalement que la détection des mines par thermographie infrarouge est valable mais dans des conditions particulières, c'est-à-dire pour un terrain constitué de sable fin.

Cette étude, effectuée avec peu de matériel, montre que le principe de détection des mines par thermographie infrarouge est faisable dans des conditions de luminosité faible (la lampe halogène de chantier délivre une faible quantité de rayonnement infrarouge). Elle peut donc être poursuivie par une étude plus approfondie, incluant un véritable système de mesure des intensités de rayonnement infrarouge et comparaison quantitative avec les résultats de la simulation numérique.

L'étape suivante, après validation du modèle théorique, sera de simuler des conditions réelles, en tenant compte des paramètres difficiles à gérer tels que le taux d'humidité du sol, la nature de ce même sol, ainsi que la végétation.

Bibliographie:

- site de l'association « dessine-moi un sourire » ; article de Daniel Balageas http://www.dessine-moi-un-sourire.org/index.php?option=com_content&task=view&id=66&Itemid=64
- Thermodynamique de Pérez- édition Masson
- Portail de l'Énergie en Région wallonne : thermographie infrarouge en maintenance predictive <http://energie.wallonie.be/servlet/Repository/thermo.PDF?IDR=456>
- Antoine Moreau <http://www.e-scio.net/ondes/ondes.php3>
- IUFM Paris <http://physique.paris.iufm.fr/lumiere/ondes.html>
- Paik J, Lee C P and Abidi M A: Image Processing-Based Mine Detection Techniques: A. Review. <http://www.springerlink.com/content/fel8em62vc7152c8/>

Partenaires de ce projet :

- Monsieur Daniel Balageas, conseiller émérite à l'ONERA et ex-enseignant associé à l'ENS de Cachan, conseiller scientifique sur la détection des mines
- Monsieur Yves-Michel Frédéric, ingénieur de l'ONERA de Salon de Provence conseiller technique pour la mise au point des mesures et prêt de matériel.

Sommaire

Introduction

1- Les ondes électromagnétiques

- 11- Définition
- 12- Onde progressive
- 13- Caractéristiques d'une onde électromagnétique

2- Les ondes infrarouges

- 21- Définition
- 22- Rayonnements infrarouges et température d'un corps

3- La thermographie infrarouge

- 31- Principe
- 32- Complexité du signal délivré par une caméra IR
- 33- Grandeurs d'influence
 - a) La transmission atmosphérique
 - b) Corps de référence : le corps noir

4- Application de la thermographie infrarouge à la détection des mines antipersonnel enfouies dans le sol

- 41- Principe
- 42-La thermographie passive photothermique
- 43-La thermographie active photothermique
 - a) modélisation et simulation
 - b) Expériences

5) Conclusions et perspectives d'avenir