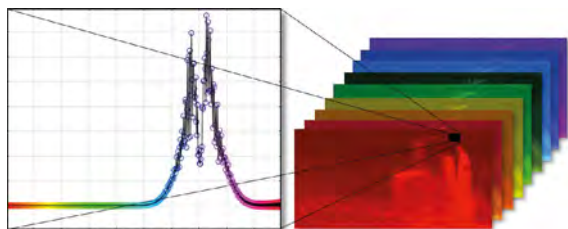


ACHETER UNE CAMÉRA HYPERSPECTRALE FTIR POUR DES MESURES ENVIRONNEMENTALES ET SIGNATURES INFRAROUGES

Antoine DUMONT*

Telops, 100-2600 Ave Saint-Jean-Baptiste, Québec City, Quebec, Canada
antoine.dumont@telops.com



Les caméras hyperspectrales infrarouges par transformée de Fourier (FTIR) permettent de combiner l'information spatiale et spectrale de façon inégalée. Ces instruments ont leur place autant dans un laboratoire que sur le terrain et offrent une solution élégante à grande précision pour une grande gamme d'applications

<https://doi.org/10.1051/photon/202312459>

L'imagerie hyperspectrale FTIR est une technologie en pleine effervescence, avec des applications dans de multiples secteurs tels que le pétrole et le gaz, le minier, la défense, le textile et plus encore. Au tournant du 21^e siècle, cette technique expérimentale prit de la maturité et quelques compagnies pionnières commencèrent à concevoir et fabriquer des imageurs hyperspectraux haute performance pour la recherche universitaire, industrielle ou en défense. Ces instruments sont créés pour des mesures scientifiques

rigoureuses dans le secteur académique tout autant que pour offrir des réponses et solutions claires dans le secteur industriel. Ces imageurs hyperspectraux FTIR sont maintenant développés pour offrir une énorme flexibilité de mesures, autant pour la plage spectrale, partant de l'infrarouge proche (700nm) jusqu'à 13 μm , la résolution spectrale et l'utilisation sur le terrain. Des imageurs FTIR ont récemment été développés pour des mesures aéroportées, certains offrant des services de détection aéroportée de méthane avec laquelle les données infrarouges sont collectées, traitées et analysées par des spécialistes. La

détection, identification et quantification de gaz à effet de serre (méthane) et de composés organiques volatiles (COV) sont critiques pour mitiger leur impact environnemental et assurer la conformité aux réglementations gouvernementale. L'imagerie hyperspectrale FTIR permet non seulement d'identifier et quantifier le méthane, mais tous les gaz à effet de serre, les COV, ou gaz toxiques et cela de façon simultanée dans la même image. Il est aussi possible de détecter des minéraux ou autres matériaux avec une signature spectrale distincte à grande distance... Une technologie très versatile !

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

L'imagerie hyperspectrale est entièrement passive et non destructive. Au cœur des imageurs hyperspectraux FTIR se trouve un interféromètre de Michelson, visible en schéma dans la Figure 1. La lumière (infrarouge) de la scène entre par la fenêtre d'acquisition, atteint l'interféromètre qui module le signal de la radiation incidente en bougeant le miroir mobile qui balaie à vitesse constante la plage complète de longueur d'onde, selon un point zéro de déplacement. Pour chaque pixel dans la matrice du détecteur, un signal est enregistré en fonction de la distance parcourue par le miroir ce qui crée un tracé appelé un interférogramme. Ce signal est traité par transformée de Fourier pour obtenir une signature spectrale brute, non calibrée. Des corps noirs sont intégrés dans l'appareil et sont utilisés pour construire un étalonnage à tout moment souhaité avant une série de mesures pendant que l'appareil est en marche. Cet étalonnage est appliqué à la signature brute pour produire une signature de radiance calibrée qui peut être utilisée après pour une analyse chimique. À ce jour, les imageurs hyperspectraux FTIR sur le marché ont une résolution spatiale maximale de 320x256 pixels.

Les données sont donc en trois dimensions (x,y,z); x et y sont l'information spatiale standard, mais z contient l'information spectrale pour chaque pixel dans l'image. L'image reçue à la fin de la mesure peut être visualisée comme un total d'intensité pour toutes les longueurs d'onde ou sinon chaque "tranche" spectrale peut aussi être retirée. L'intensité d'un pixel correspond à l'intensité de cette longueur d'onde, spécifique entrant dans la ligne de vision de la mesure. Malheureusement, pour la quantification d'un gaz, le signal de radiation considéré ne provient pas seulement du gaz inspecté dans la scène et une analyse plus complexe doit être accomplie.

Un modèle de transfert radiatif doit être créé selon les conditions de la

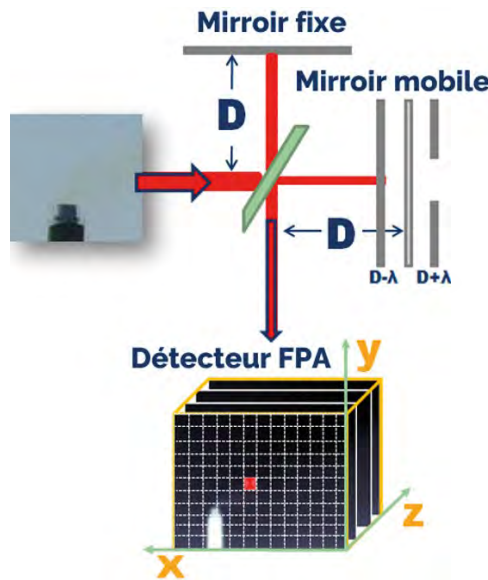
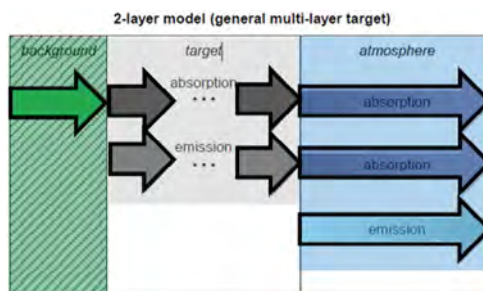


Figure 1. Diagramme d'un interféromètre de Michelson au cœur d'un imageur hyperspectral FTIR. Chaque pixel contient l'information spectrale complète selon la plage de longueur d'onde de l'instrument.

scène. L'arrière-plan émet une certaine quantité d'infrarouge qui sera partiellement absorbée par le gaz qui lui-même émet de l'infrarouge. Le tout se passe dans une atmosphère qui cause de l'absorption et de l'émission, avant et après le gaz ciblé. Les températures, les espèces chimiques, la distance entre l'imageur hyperspectral et la cible, tous ces paramètres ont un impact sur le calcul final.

Modéliser cela n'est pas simple, mais les instruments sont typiquement complétés d'une suite de logiciels

Figure 2. Principe de base du modèle de transfert radiatif. Plusieurs couches peuvent être rajoutées pour améliorer le modèle.



qui contiennent un algorithme qui peut faire ce type d'analyse et fournir un rapport complet de quantification de gaz. Il suffit seulement d'entrer les paramètres expérimentaux et les conditions atmosphériques et le logiciel optimise le modèle simulé produisant un résultat quantitatif.

QUOI CONSIDÉRER SUR LE TERRAIN

Des mesures avec un imageur hyperspectral peuvent être accomplies autant dans un laboratoire avec les paramètres expérimentaux pleinement contrôlés qu'à l'extérieur à la merci des conditions météorologiques. Peu importe l'environnement dans lequel les mesures sont faites, il y a toujours une liste de questions importantes à considérer avant même de tenter de prendre une mesure :

Est-ce que les gaz/matériaux ont une signature définie dans la plage spectrale de l'instrument ?

La plupart des gaz et matériaux vont avoir une réponse spectrale unique (absorption, transmission, réflexion) dans l'infrarouge. Il est important de déterminer quelle plage spectrale dans l'infrarouge est optimale pour la détection ciblée (proche-IR, moyen-IR, lointain-IR, etc...). L'emplacement de la signature peut rendre une mesure difficile si l'absorption atmosphérique est très forte dans ces longueurs d'ondes. Par exemple, la détection de CO₂ est techniquement possible avec l'imagerie hyperspectrale, mais reste un défi particulièrement difficile. La détection de CO₂ a déjà été accomplie dans l'atmosphère à une bonne distance, mais seulement grâce à l'élargissement spectral de l'émission et un signal plus prononcé provenant d'un gaz très chaud, ce qui nous amène à la prochaine question...

Y a-t-il un contraste thermique raisonnable pour la mesure ?

Pour pouvoir détecter la signature d'un gaz souhaité, il est nécessaire que la scène offre une différence de température entre le gaz et



SPECTROSCOPIE FTIR

Analyse non invasive, rapide et à moindre coût de gaz, liquides et solides

SPECTROMÈTRES À TRANSFORMÉE DE FOURIER FTIR



- ▲ Système compact & robuste
- ▲ Gamme 2-12µm (selon modèle)
- ▲ Détecteur MCT refroidi à Peltier
- ▲ Résolution 2/4/8 cm⁻¹ (jusqu'à 0.5 cm⁻¹ personnalisé)
- ▲ Existe en version NIR et version combinée

SPECTROMÈTRES À MELANGE DE FRÉQUENCE



- ▲ Vitesse d'acquisition d'un spectre complet jusqu'à 130 kHz
- ▲ Gamme spectrale 2-5µm ou 7.6-12µm
- ▲ Détection à température ambiante sans refroidissement
- ▲ Sensibilité -80 dBm/nm
- ▲ Résolution 2.5cm⁻¹



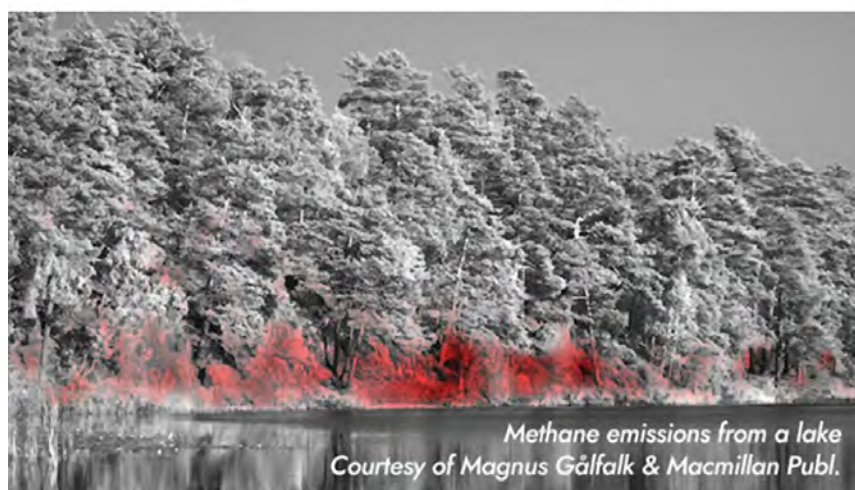
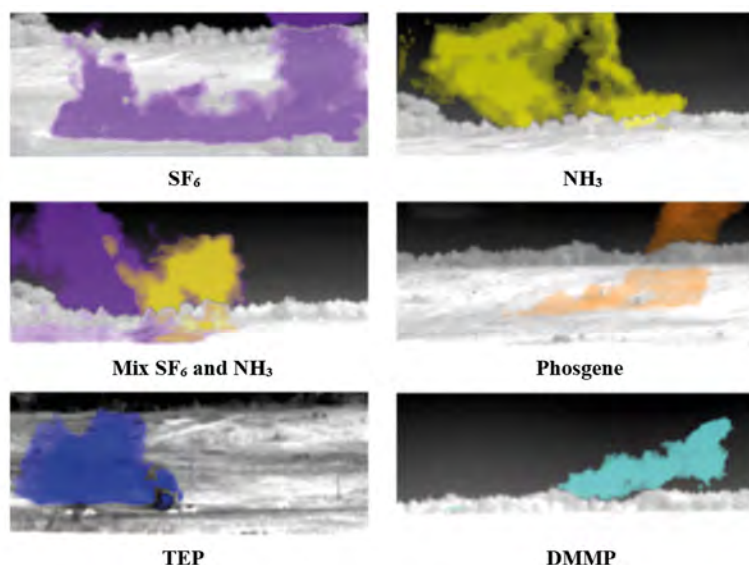
l'arrière-plan ainsi que l'air ambiant si possible. Si un gaz ciblé est plus chaud, le spectre contient des pics d'émission plus élevé que le signal de base. Si le gaz est plus froid, des vallées d'absorption seront visibles dans le spectre, aux mêmes positions (ou très proches) que les pics d'émission pour un gaz chaud. Si le contraste thermique n'est pas assez large, il sera très difficile de détecter le gaz, surtout à basse concentration. Le ciel sans nuage est habituellement un bon arrière-plan, avec une radiation thermique minimale, pour la mesure au sol de panaches de gaz. Les mesures aériennes sont forcées d'utiliser le sol comme arrière-plan, ce qui fixe

la référence de température aux conditions météorologiques du moment. Les mesures sur des objets solides, comme des minéraux, se font typiquement en capturant la réflexion infrarouge provenant de la surface de l'objet. Il n'y a pas de contraste avec un arrière-plan dans ce cas-ci, la radiation ne vient aucunement de la transmission au travers de l'objet. Il est donc nécessaire d'avoir un bon éclairage provenant du Soleil ou une autre source pour obtenir une signature claire.

À quel point la scène est-elle dynamique ?

Les caméras hyperspectrales sont des instruments très puissants, mais ●●●

Figure 3. Détection et quantification de multiples gaz dans une même scène. En bas, détection de méthane à basse concentration, Linköping University.



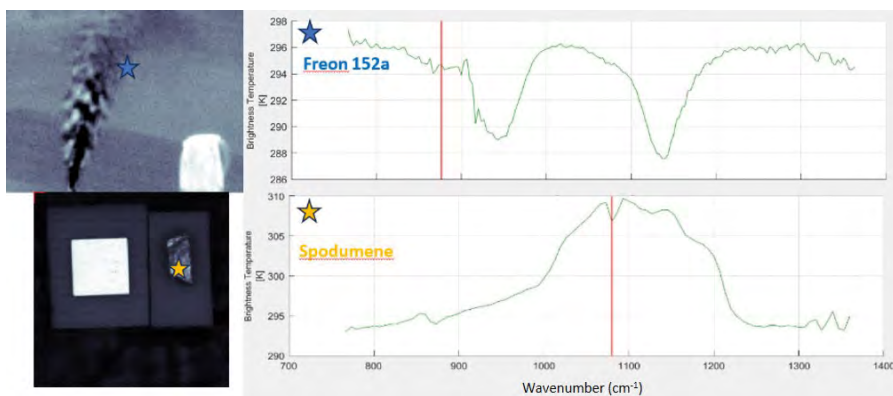


Figure 4. Haut, spectre d'absorption de fréon 152a relevé d'une mesure d'un jet d'une canne pressurisée. Bas, spectre en réflectance d'un échantillon de spodumène avec une référence infra-gold à ses côtés.

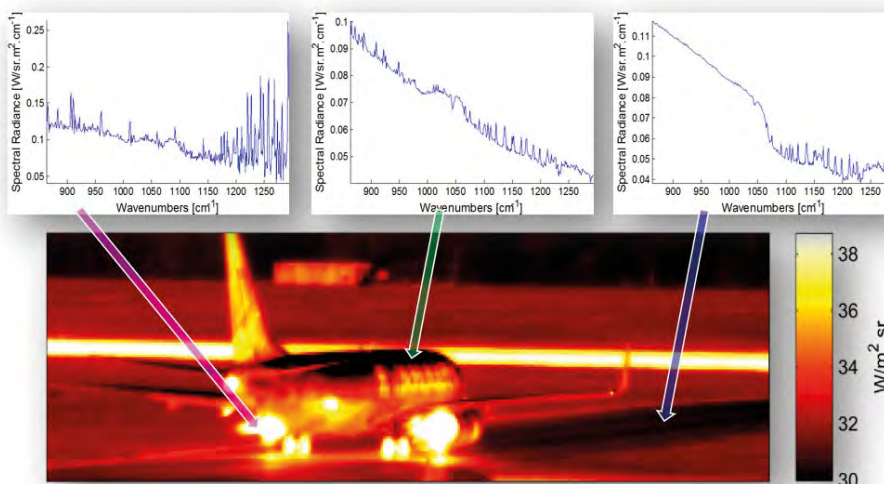
par la nature même de la mesure, il est impossible d'atteindre des vitesses d'acquisition aussi rapides qu'avec les caméras infrarouges sans résolution spectrale. Selon les paramètres de mesure, la fréquence d'acquisition de cubes de données hyperspectraux sera entre 0.1 Hz et 25 Hz. La caractérisation chimique de phénomènes plus rapides risque d'être plus efficace avec une caméra multispectrale avec une gamme de filtres rotatifs, un bon compromis entre l'hyperspectral et les caméras rapides purement thermique. La taille de la fenêtre d'acquisition (nombre de pixels), la résolution spectrale et la taille des incréments de déplacement de l'interféromètre sont des paramètres qui vont tous affecter la vitesse d'acquisition.

De quelle résolution spectrale avons-nous besoin ?

L'instinct de plusieurs premiers utilisateurs est d'utiliser la résolution spectrale la plus fine possible. Plus d'information spectrale est certainement intéressant pour l'analyse chimique, mais la résolution a un grand impact sur la vitesse d'acquisition mentionné dans le dernier point. Pour une analyse sur le terrain, avec une scène en mouvement et des conditions atmosphériques non constantes, il est souvent plus raisonnable d'utiliser une résolution un peu moins fine (p. ex. 4-8 cm⁻¹ pour IR-lointain) pour permettre aux tranches spectrales dans un même

cube de données d'être similaires. Dans la plupart des cas, l'identification chimique se réalise sans problème, même avec plusieurs gaz à identifier dans la scène. Dans les cas extrêmes où une résolution spectrale plus basse que 1 cm⁻¹ est nécessaire, il est critique d'avoir une scène stable. Le moyennage d'une série de cubes

Figure 5. La richesse d'information d'un cube hyperspectral. Signatures infrarouges pour (rouge) la combustion pour propulsion d'avion commerciale, (vert) réflexion de l'atmosphère sur le fuselage métallique, (bleu) piste de décollage contenant du quartz



hyperspectraux est une bonne manière d'améliorer le ratio signal/bruit pour les mesures difficiles sans avoir besoin d'un très long temps d'acquisition ou d'une résolution spectrale très fine.

MESURES AU SOL

Les quelques instruments hyperspectraux FTIR disponibles sur le marché sont utilisés pour une grande variété d'applications. Il y a beaucoup d'intérêt dans le secteur de la Défense pour l'utilisation de ce type d'instrument pour la caractérisation de la signature IR de cibles militaire. Les instituts de Défense sont toutefois aussi intéressés par la capacité d'identifier rapidement des produits nocifs, solides ou gaz. La surveillance de pollution et de fuite de méthane par des agences gouvernementales et laboratoires nationaux prend beaucoup d'ampleur et plusieurs campagnes de mesures ont démontré l'efficacité de ces instruments dans ce contexte. Autrement, la cartographie minérale de façade de mine, la recherche universitaire ou industrielle sur l'efficacité de combustion, et même la volcanologie sont tous des champs dans lesquels les imageurs hyperspectraux FTIR au sol sont reconnus comme outils de choix. La terminologie pour la télédétection avec ces instruments est légèrement différente du standard en spectroscopie, la plage

spectrale étant plus restreinte. On retrouve le proche (ou très proche) IR (0.8-1.5 μm), le moyen IR (1.5-5.5 μm) et le lointain IR (7-15 μm). Le choix de la plage spectrale dépend de la scène choisie, les plages standards variant selon l'application. Il est possible d'obtenir une résolution spectrale (ajustable par l'utilisateur) de 64 cm^{-1} jusqu'à 0.25 cm^{-1} .

Les premiers instruments sur le marché étaient souvent larges et encombrants, mais des modèles compacts conçus plus récemment offrent une meilleure flexibilité d'opération et facilitent l'intégration sur le terrain ou dans un laboratoire pour tout utilisateur. Ces récentes additions peuvent être utilisées avec un trépied standard grâce à une grande réduction de poids. Les caméras hyperspectrales sont typiquement accompagnées d'une suite de logiciel avec une série d'outils pour l'acquisition de cubes de données, l'identification en temps réel, la visualisation et l'analyse de données, et la préparation de paramètres de mesures. Certains accessoires sont aussi disponibles tels que des télescopes pour modifier le champ de vue ainsi que des polariseurs motorisés pour moduler le signal perçu par le détecteur.

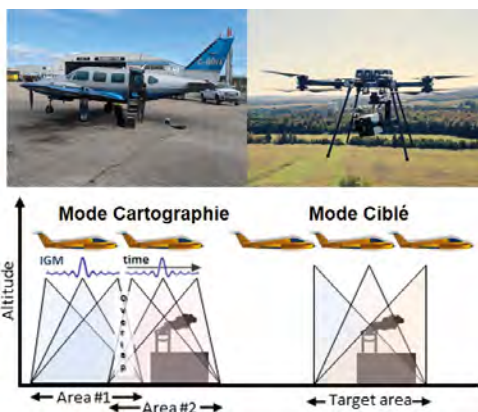


Figure 6. Exemples de support aéroporté pour caméras hyperspectrales FTIR. Les modes du survol : 1) cartographier la région, 2) mesures séquentielles sur une même cible.

Identification et Quantification de Gaz

Un bon exemple indicatif de la détection de multiples gaz par un même appareil est démontré dans la Figure 3, pouvant même séparer spatialement deux gaz mélangés (SF_6 et NH_3). Ces différents gaz pouvaient donc être non seulement identifiés par une mesure complètement passive, mais les hypercubes de données

permettent la quantification de la masse de gaz dans chaque scène grâce au modèle de transfert radiatif. Le travail impressionnant de Magnus Gålfak de l'Université de Linköping fournit un merveilleux exemple de la sensibilité de ces appareils avec sa recherche sur le méthane à basse concentration. Publiées dans Nature Climate Change, ces mesures particulièrement difficiles furent accomplies avec une caméra hyperspectrale (Hyper-Cam, Telops) munie d'un détecteur à filtre froid, réduisant la plage spectrale mesurée pour optimiser la détection de méthane à concentration et température proche de l'atmosphère. Les images résultantes offrent une façon inédite de surveiller les émissions de ce gaz qui a un immense impact potentiel sur l'environnement. Ces données sont un bon exemple de mesures nécessitant des résolutions très fines avec des temps de mesures prolongés pour permettre l'identification de méthane à de telles concentrations.

Nous pouvons voir sur les figures 4 et 5 des exemples de spectres obtenus (lointain-IR), dans un logiciel de visualisation, provenant d'un moyennage de quelques pixels dans la



ARDOP

INDUSTRIE



Nouveaux spectromètres à réseau compact.

Résolution élevée, et sensibilité exceptionnelle

<p>A PARTIR DE 1350€</p> <p>ARIS Wide 220 nm - 1050 nm</p> 	<p>3200€</p> <p>SIENA 1.7 940 nm - 1700 nm</p> 	<p>4400€</p> <p>SIENA 1.9 800 nm - 1900 nm</p> 	<p>4400€</p> <p>SIENA 2.0 900 nm - 2100 nm</p> 
--	--	---	--

sales@ardop.com

Fournisseurs en spectromètre





région étoilée. En haut, un panache de fréon avec une décompression causant une baisse de température et donc un spectre d'absorption. Le spectre obtenu est comparé à une librairie de signatures connues ce qui permet l'identification et la quantification du gaz dans la scène. Une bouilloire chaude en blanc permet de démontrer le contraste d'intensité possible dans la même image.

Surfaces solides

L'exemple dans le bas de Figure 4 démontre l'analyse d'un échantillon solide, demandant une différente approche que pour des gaz, malgré l'utilisation du même instrument. L'échantillon de spodumène, minéral duquel le lithium est extrait, fournit un spectre par réflexion d'une source d'illumination infrarouge. Le carré blanc est une référence de réflexion unitaire, infra-gold, pour pouvoir obtenir l'information de réflectance propre de l'échantillon. Contrairement à la radiance obtenue par transmittance pour les gaz, le signal d'un échantillon solide provient uniquement de la surface du matériel. Il est donc impossible de déterminer la quantité de matériel sous la surface. Le signal réflectif peut aussi contenir de l'information spectrale provenant d'autres sources que l'objet ciblé, de là l'utilité de la référence infra-gold si possible. Tous les matériaux ont différents niveaux d'émissivité ϵ , démontrant des propriétés d'absorption et réflexion entre un corps noir ($\epsilon = 1$) et un miroir ($\epsilon=0$), qui varie selon les longueurs d'onde. La caractérisation de signature infrarouge, que ce soit pour la Défense (signature d'avion Figure 5), la géologie, ou l'analyse de nourriture, doit toujours considérer l'impact de l'émissivité sur le signal obtenu. L'imagerie hyperspectrale FTIR, accompagnée d'algorithmes supplémentaires, permet de séparer la température perçue de l'émissivité pour obtenir une caractérisation nette des objets dans le champ de vue de la caméra.

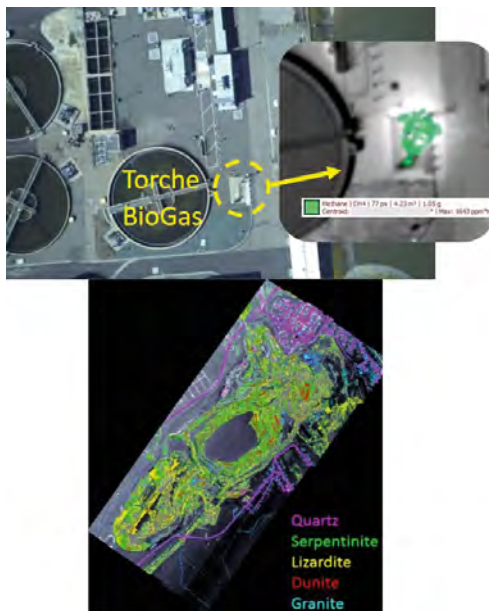


Figure 7. Haut : Détection de méthane relâché par une torche à combustion basse efficacité. Bas : Cartographie minérale complète d'une mine à ciel ouvert.

MESURES AÉROPORTÉES

L'intérêt pour l'exploration minière, la gestion environnementale ainsi que la maintenance d'installations pour le gaz et le pétrole poussent les mesures hyperspectrales à analyser d'immenses régions. Avec des senseurs plus compacts et légers, les imageurs hyperspectraux FTIR sont désormais aussi disponibles pour des mesures aéroportées. En raison de la nature infrarouge des données, ces systèmes peuvent opérer autant le jour que la nuit et en toute saison, même lorsque la neige couvre le sol. Plusieurs exemples d'intégration ont démontré un grand succès dans les dernières années, dans un avion ou un hélicoptère, et l'intégration dans des drones est même attendue dans un futur

proche. Les systèmes aéroportés peuvent s'adapter automatiquement aux conditions de vols (altitude, vitesse) pour pouvoir maximiser la sensibilité à tout moment et garantir du temps de vol efficace pour l'acquisition de données.

L'analyse de fuites de méthane sur de grands territoire est un parfait exemple de succès pour ce type d'instrument. La détection hyperspectrale FTIR aéroportée offre une incroyable amélioration pour la rapidité et efficacité de ce procédé laborieux. Cela amène un potentiel considérable pour les institutions gouvernementales qui souhaitent assurer la conformité aux réglementations environnementales tout en aidant les compagnies à rapidement améliorer l'entretien de leurs installations. Avec un type de survol similaire, la cartographie minérale hyperspectrale permet un travail d'exploration moins destructif que les tests traditionnels, sans aucune interférence avec la région. Il est possible de déconstruire le spectre obtenu par pixel et avoir une idée claire de tous les minerais sur le terrain.

CONCLUSION

L'imagerie hyperspectrale FTIR est une technologie qui permet l'obtention de signatures infrarouges avec une excellente résolution spatiale, spectrale et temporelle. Cet article présente une base d'information technique et opérationnelle à prendre en considération pour faciliter votre prise de décision si vous êtes intéressés par ces instruments. Il est recommandé de discuter avec les fournisseurs pour déterminer vos besoins et ainsi identifier la solution qui répond le mieux à vos attentes et exigences. ●

FOURNISSEUR	SITE INTERNET
Bruker	www.bruker.com
Nireos	www.nireos.com
Telops	www.telops.com