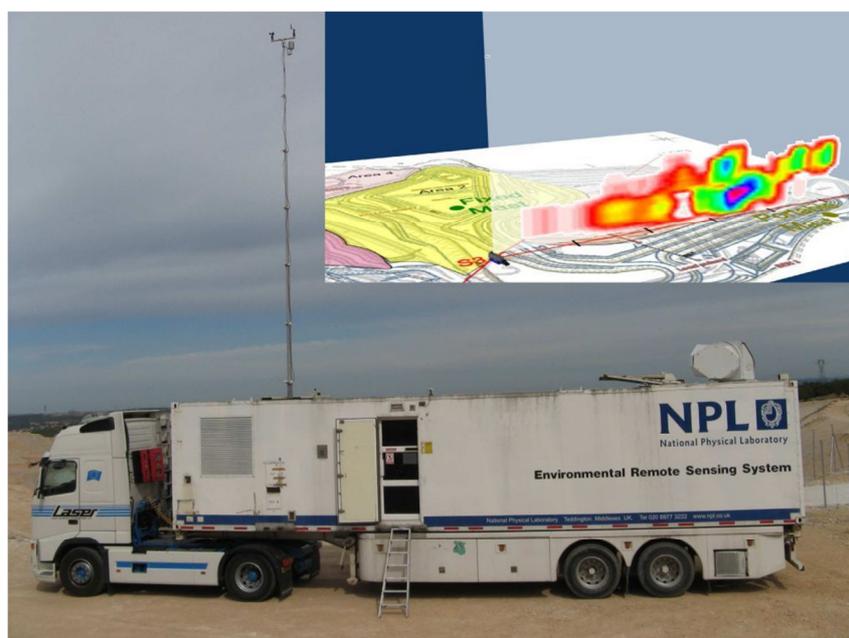




GUIDE POUR LA MESURE DES ÉMISSIONS DIFFUSES DE METHANE DES ISDND PAR LA METHODE LIDAR A ABSORPTION DIFFERENTIELLE (DIAL)



30 septembre 2010

Etude (N° de contrat : 0906C0021) réalisée pour le compte de l'ADEME par le Centre de Recherche sur la Propreté et l'Énergie (CRPE) de Veolia Environnement



COORDINATION TECHNIQUE :
Isabelle HEBE, ADEME (Angers)
Direction Consommation Durable et Déchets
Service Prévention et Gestion des Déchets

Remerciements :

Comité de relecture :

OLIVIER Franck – ECOGEOS

L'ADEME en bref

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables, et du ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Elle participe à la mise en œuvre de politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. L'agence met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public et les aide à financer des projets dans cinq domaines (la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit) et à progresser dans leurs démarches de développement durable.

www.ademe.fr

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Sommaire

I.	Contexte et objectifs.....	6
I.1.	La mesure des émissions diffuses sur les ISDND	6
I.1.1.	Enjeux et cadre réglementaire de la mesure des émissions diffuses.....	6
I.1.2.	Particularités de la mesure des émissions de biogaz sur les ISDND	7
I.2.	Objectifs du guide.....	7
II.	La technologie DiAL	8
II.1.	Principe de fonctionnement.....	8
II.2.	Retour d'expérience	9
III.	Application de la technologie DiAL sur les ISDND	10
III.1.	Champ d'application	10
III.2.	Conditions opérationnelles.....	11
III.2.1.	Collecte de données préalable	11
III.2.2.	Prestataire de service.....	11
III.2.3.	Equipements de mesure	11
III.2.4.	Conditions opérationnelles (accessibilité, topographie, météorologie).....	12
III.3.	Phase de mesure.....	13
III.3.1.	Stratégie de mesure	13
III.3.2.	Echelle spatio-temporelle	14
III.3.3.	Efficacité opérationnelle	15
III.3.4.	Durées des campagnes de mesure.....	15
III.3.5.	Délais et coûts d'intervention.....	16
III.4.	Interprétation des résultats	16
III.4.1.	Sensibilité de la mesure	16
III.4.2.	Traitement des données.....	16
III.4.3.	Type de résultats.....	16
IV.	Conclusion et perspectives.....	18
IV.1.	Analyse multicritères.....	18
IV.2.	Perspectives de développement de la technologie DiAL en ISDND.....	19

Résumé

L'enfouissement des déchets en Installations de Stockage de Déchets Non Dangereux (ISDND) est un mode de gestion de déchets actuellement très utilisé en France : 42 % des ordures ménagères produites sur notre territoire ont été enfouies en 2009 dans quelque 300 installations. Chaque tonne de déchets produisant de l'ordre de 150 à 200 m³ de biogaz, cela représente d'importantes quantités de méthane qu'il convient de collecter et de traiter. Pour répondre à cette nécessité, un cadre réglementaire a été mis en place progressivement depuis 1997 à l'échelle nationale et européenne qui a favorisé le développement de technologies et procédés permettant de diminuer les émissions : captage à l'avancement, optimisation du dimensionnement et du contrôle des réseaux, amélioration de l'étanchéité des couvertures, etc. Toutefois, en dépit d'avancées bien réelles, il subsiste une part de méthane non captée, émise directement à l'atmosphère.

En réponse à ce constat, il importe donc de mesurer les émissions diffuses issues des ISDND pour répondre à deux objectifs principaux : cartographier les concentrations de méthane (i.e. localiser les zones émettrices afin d'agir pour limiter les fuites) et quantifier les flux émissifs globaux (pour le reporting E-PRTR notamment). Certaines caractéristiques des émissions de biogaz issues des ISDND rendent toutefois leur mesure délicate : une forte hétérogénéité spatiale (émissions localisées), une grande variabilité temporelle (selon facteurs météorologiques), une répartition aléatoire et enfin une très large gamme de flux émissifs (échelle de variation de 1 à 10 000).

Dans ce contexte, l'utilisation de nouveaux outils de mesure directe représente une perspective intéressante. Ce guide présente une technologie en particulier, la méthode LiDAR à absorption différentielle (DiAL : Differential Absorption LiDAR). Cette méthode consiste en une mesure spectroscopique, basée sur le principe de la télédétection résolue LiDAR (Light Detection And Ranging). Le LiDAR utilise un pulse de radiation laser, émis dans une direction donnée et analyse sa réflexion dans l'atmosphère.

Développée initialement dans les années 1980 pour la mesure de polluants issus de l'industrie pétrochimique, la technologie DiAL a fait l'objet en 2008 de plusieurs campagnes d'inter-comparaison avec d'autres méthodes de mesure sur ISDND (traçage gazeux, spectroscopie hélicoptée, modélisation inverse, cartographie radiale des panaches, etc.). Son évaluation a en outre été complétée en 2009 par cinq campagnes de caractérisation de ses performances opérationnelles conduites sur quatre ISDND françaises, laissant augurer d'une possible utilisation pour la mesure des émissions diffuses de méthane en ISDND.

Dans le cadre de cette dernière étude, les contraintes d'application de la méthode ainsi que ses conditions de mise en œuvre opérationnelle sur site ont été analysées à la fois en regard de l'accessibilité des ISDND, de leur topographie et des conditions météorologiques. En dépit de sa taille, l'appareillage LiDAR s'avère être fonctionnel dans diverses configurations grâce à sa portée de mesure amont systématiquement supérieure à 350 m. En revanche, la topographie, en particulier une forte déclivité du terrain, peut perturber la mesure en cas de déviation verticale du champ de vent. En outre, bien que moins sensible aux caractéristiques du vent en comparaison d'autres méthodes, le LiDAR requiert idéalement un vent de vitesse comprise entre 2 et 7 m/s, stable en direction (écart-type de la direction du vent < 10°) et en intensité (coefficient de variation de la vitesse du vent < 20 %) au cours de la mesure.

Sous réserve de conditions de mesure stables telles que définies précédemment, un minimum de 4 scans est nécessaire pour garantir une mesure fiable sur une zone donnée. A raison de 10 à 20 minutes par scan, 60 à 80 minutes sont par conséquent nécessaires pour analyser une zone donnée, pour une portée moyenne de l'ordre de 430 m. Dans la pratique, cette portée est parfois ajustée manuellement (et de fait donc réduite) pour se conformer à la forme et aux dimensions des casiers analysés ou encore pour faire face à des conditions atmosphériques médiocres. En définitive, le LiDAR permet en moyenne de mesurer les émissions diffuses d'une zone de 5 à 10 hectares en une journée.

L'analyse a posteriori des données opérationnelles indique que la méthode de mesure se comporte de manière assez similaire quelles que soient les conditions d'exécution : 60 % du temps environ est consacré à la mesure, 20 % au déplacement du camion entre les stations de mesure, les 20 % restants représentant les périodes non-opérationnelles de démarrage et d'entretien du système ainsi que les phases d'attente lorsque les conditions de vent sont trop variables.

D'un point de vue pratique et logistique, cette technologie requiert un équipement complexe piloté par une équipe d'experts. A ce jour, le National Physical Laboratory (NPL) basé en Grande-Bretagne, constitue l'unique prestataire commercial européen. En fonction de la superficie des casiers à couvrir, des conditions météorologiques (pluie, vent) et enfin de la précision souhaitée pour la mesure (mesure individualisée par casier ou mesure globale), une campagne de mesure DiAL sur une ISDND peut nécessiter entre 1 et 8 jours pour un coût d'intervention compris entre 15 et 45 000 euros (pour une moyenne de 25 à 30 000 euros).

A l'issue d'une campagne de mesure, on dispose de valeurs d'émissions globales par zone cible (un casier par exemple) ou pour l'ensemble du site étudié ainsi que des coefficients d'émission par unité de surface. En outre, il est possible en recoupant plusieurs plans d'analyse verticaux d'identifier les principales zones émissives. Enfin, quand pour un même casier des mesures ont été réalisées avec et sans dégazage, il est également possible d'estimer le coefficient d'oxydation moyen du méthane de la couverture du casier étudié.

En conclusion, les principaux avantages de cette méthode tiennent à sa forte maturité technique (bien que le retour d'expérience soit encore limité dans le cadre d'une utilisation en ISDND), à son faible volume d'hypothèses (utilisation d'hypothèses globales pour la dispersion atmosphérique permettant de s'affranchir d'un modèle de dispersion atmosphérique), à ses contraintes somme toute limitées en termes de vitesse et direction du vent et enfin à sa capacité d'analyse qui permet à la fois de cartographier et de quantifier les émissions diffuses à l'échelle de chaque casier. A l'inverse, certaines limites ont été mises en évidence, essentiellement des contraintes logistiques : acheminement et déplacement d'un semi-remorque sur site, existence d'un unique prestataire à ce jour en Europe et enfin complexité technique de l'équipement. Il convient aussi d'ajouter que la technique DiAL n'a été testée qu'à une seule occasion sur un site à fort relief : par conséquent, la qualité des résultats dans des telles conditions mériterait d'être confirmée ultérieurement.

Compte tenu de la nécessité chaque jour plus grande d'évaluer les émissions de méthane des ISDND dans une démarche générale de qualité, la méthodologie DiAL est donc probablement appelée à se développer dans les années à venir. Cependant, en vue d'une application en routine sur les ISDND et d'une réduction des coûts, une simplification du système de mesure et d'analyse serait souhaitable (visant à le rendre à la fois plus mobile, rapide et simple d'emploi) tout comme l'utilisation de capteurs de vent 3D en vue de l'application de la méthode sur des sites à forte déclivité.

I. CONTEXTE ET OBJECTIFS

I.1. LA MESURE DES EMISSIONS DIFFUSES SUR LES ISDND

I.1.1. Enjeux et cadre réglementaire de la mesure des émissions diffuses

L'enfouissement des déchets en Installations de Stockage de Déchets Non Dangereux (ISDND) est un mode de gestion de déchets actuellement très utilisé en France : selon les données EUROSTAT, 42 % des ordures ménagères ont été enfouies en 2009 et le nombre de sites français s'élève à un peu moins de 300 aujourd'hui. Le biogaz, issu de la dégradation anaérobie de la matière organique contenue dans les déchets est composé à 60 % de CH₄ et à 40 % de CO₂. Sur une période de plusieurs décennies (classiquement, une valeur de 30 ans est considérée), les déchets enfouis en ISDND conventionnelles produisent de l'ordre de 150 à 200 m³ de biogaz par tonne de déchets bruts.

Face à la nécessité de capter ces biogaz, un cadre réglementaire a été mis en place à l'échelle nationale et européenne. Tout d'abord, l'arrêté ministériel du 09/09/1997, modifié par la circulaire du 04/07/2002, a fixé des obligations en matière de captage et de qualité des rejets après passage en torchère du biogaz issu des ISDND. A l'échelon européen, la directive européenne sur la mise en décharge du 26/04/1999 est fondée sur la limitation des impacts environnementaux des ISDND et donc des émissions de méthane. A travers le registre européen des émissions diffuses (E-PRTR), obligation est faite aux exploitants d'ISDND de déclarer les émissions de CH₄ émis sur leurs sites. Toutefois, l'évaluation des flux de méthane étant fondée sur des modèles de production de biogaz et des ratios génériques de captage, les déclarations restent entachées d'erreurs importantes, non quantifiables. Ainsi, le guide français de déclaration E-PRTR pour les ISDND (version janvier 2007) préconise une méthode d'évaluation de type « E » (« estimation à partir d'un facteur d'émission de la littérature »), avec une précision de type « P3 » (incertitude supérieure à 50 %).

Récemment, un pas supplémentaire a été franchi dans les exigences de captage et valorisation du biogaz, en ce qui concerne les déchets traités en ISDND gérées en mode « Bioréacteur ». En effet, un nouveau décret (décret n°2009-1441 du 24/11/1009 complété par la circulaire du MEEDDM du 14/04/2010) permet une exonération de TGAP, sous condition de performances des installations, notamment en termes d'efficacité de captage du biogaz : le dispositif de captage de biogaz doit en effet permettre de capter la totalité du biogaz généré et le contrôle de l'absence d'émission résiduelle de biogaz est obligatoire. Les modalités de mesure doivent faire appel à des méthodes de reconnaissance permettant de détecter le cas échéant la présence de fuites sur les couvertures et en périphérie des casiers.

Ces différentes contraintes réglementaires ont favorisé le développement de technologies et procédés permettant de diminuer les émissions, notamment :

- le captage du biogaz à l'avancement ;
- l'optimisation des durées d'exploitation des casiers ;
- l'optimisation du dimensionnement et du contrôle des réseaux ;
- l'amélioration de l'étanchéité des couvertures.

Malgré ces avancées, il subsiste une part de méthane non captée, qui traverse le massif de déchets et la couverture et est émise directement à l'atmosphère. Ainsi, en 2005, le CITEPA et SOLAGRO ont estimé que les ISDND représentaient 17 % des émissions nationales de CH₄ et 2 % des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES).

La mesure des émissions diffuses de méthane permettrait en particulier :

- de mieux connaître les émissions évitées grâce aux nouvelles technologies et modes d'exploitation et ainsi de distinguer les plus performants ;
- d'identifier les zones émettrices et donc d'agir pour limiter les fuites.

I.1.2. Particularités de la mesure des émissions de biogaz sur les ISDND

La mesure des émissions diffuses issues des ISDND répond à deux objectifs principaux :

- **cartographier les concentrations de méthane** (i.e. localiser les zones émettrices afin d'agir pour limiter les fuites) ;
- **quantifier les flux émissifs globaux** (e.g. pour le reporting E-PRTR ou pour l'exonération de TGAP dans le cadre d'un fonctionnement en mode Bioréacteur).

Certaines caractéristiques des émissions de biogaz d'ISDND rendent toutefois leur mesure particulièrement délicate du fait de :

- Leur importante hétérogénéité spatiale : la cohérence spatiale des mesures peut être extrêmement faible compte tenu des modes d'émissions souvent localisés (via des chemins préférentiels).
- Leur grande variabilité temporelle : les émissions de gaz sont dépendantes des facteurs météorologiques. Une quantification des émissions diffuses, même très précise, ne permet donc pas d'apprécier durablement un niveau d'émission, mais seulement de l'estimer à un instant donné.
- L'étendue de la surface d'étude : un site de stockage représente des surfaces importantes (typiquement supérieures à 5 ha). Or, seuls quelques pourcents de la surface sont émissifs et ces zones émissives sont réparties de manière aléatoire.
- La forte amplitude des flux émissifs : les flux d'émissions diffuses de méthane se situent sur une échelle équivalente à 4 ordres de grandeurs ($1,7 * 10^{-6}$ à $1,7 * 10^{-2}$ l/m²/s¹, soit en termes massiques : $1,2 * 10^{-3}$ à 12 g/m²/s).

I.2. OBJECTIFS DU GUIDE

Dans ce contexte, l'utilisation de nouveaux outils de mesure directe représente une perspective intéressante. Des techniques de mesure des émissions diffuses existent déjà et sont déjà opérationnelles et/ou nécessitent des adaptations en vue de leur application en ISDND.

Ce guide expose de manière synthétique une technologie en particulier, la méthode DiAL ("Differential Absorption LiDAR"), qui possède un fort potentiel de développement et d'adaptation pour la mesure des émissions diffuses de méthane en ISDND. Il vise à présenter sa mise en œuvre opérationnelle sur site (champ et contraintes d'application) ainsi que le déroulement d'une campagne de mesure. Les limites d'application identifiées à ce jour sont présentées et des perspectives d'amélioration également proposées.

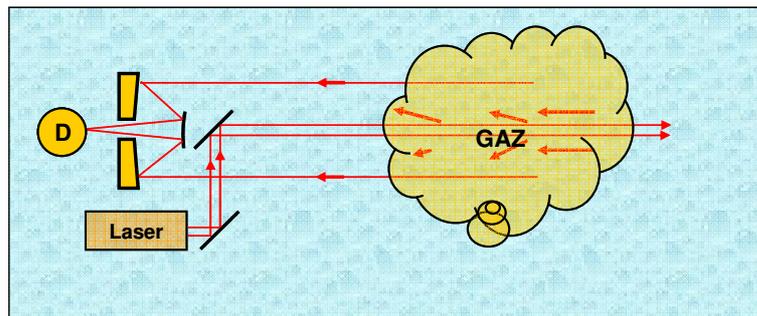
¹ Bogner J., Meadows M. and Czepiel P. (1997) Fluxes of methane between landfills and the atmosphere: natural and engineered control. *Soil Use and management*, Vol. 13, pp. 268–277.

II. LA TECHNOLOGIE DiAL

II.1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La méthode DiAL est une mesure spectroscopique, basée sur le principe de la **téledétection résolue LiDAR** ("Light Detection And Ranging"). Le LiDAR utilise un pulse de radiation laser, émis dans une direction donnée et analyse sa réflexion dans l'atmosphère.

Le DiAL, qui constitue une extension de cette technique, utilise deux pulses lasers à des longueurs d'ondes différentes. Une des longueurs d'onde est choisie pour être absorbée par la cible considérée (dans notre cas, le méthane) tandis que l'autre n'est pas absorbable, mais avec une longueur d'onde proche, de manière à ce que les propriétés de diffusion dans l'atmosphère soient similaires.



Range-Resolved Measurement

Figure 1. Schéma de principe de la technique DiAL.

Des mesures de concentrations en méthane en fonction de la distance à la source laser sont alors obtenues. Grâce à cette détermination de concentrations, deux types de mesures peuvent être réalisées :

- une **cartographie des émissions**, si le plan d'analyse est horizontal (Figure 2a) ;
- et une **mesure du flux émissif** si le plan d'analyse est vertical (Figure 2b) : elle repose sur une méthode de bilan massique 2D, mesurant les flux de méthane entre deux plans verticaux, correspondant à un positionnement en amont et un positionnement en aval de la zone cible (Figure 3).

Le flux de CH₄ est obtenu en multipliant la concentration de CH₄ mesurée par la vitesse du vent mesurée à l'aide d'un ou plusieurs anémomètres, soit :

$$\text{Flux [kg/m}^2\text{/s]} = \text{Concentration [kg/m}^3\text{]} * \text{Vitesse [m/s]}$$

Equivalent à :
$$\text{Flux [g/m}^2\text{/s]} = 1000 * \text{Concentration [kg/m}^3\text{]} * \text{Vitesse [m/s]}$$

Soit encore :
$$\text{Flux [kg/ha/h]} = 3,6 * 10^7 * \text{Concentration [kg/m}^3\text{]} * \text{Vitesse [m/s]}$$

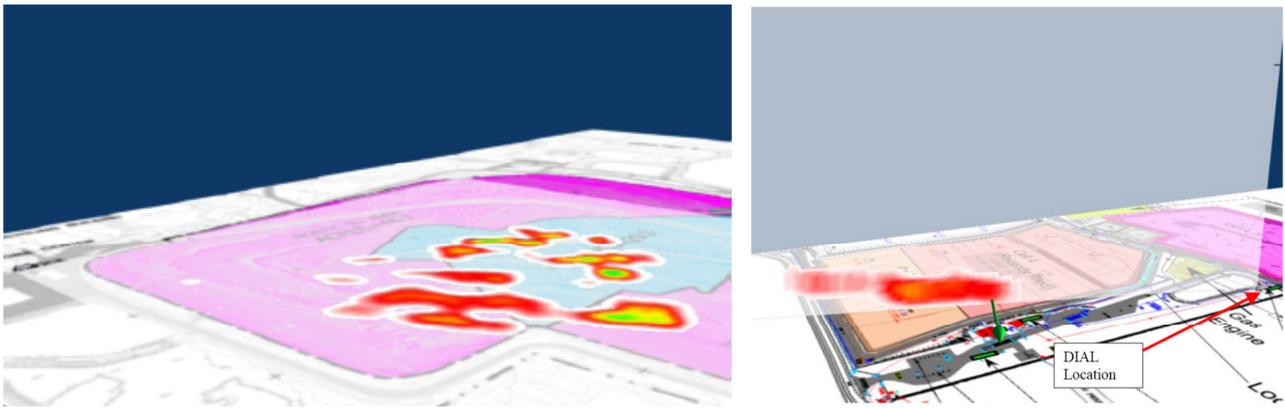


Figure 2. (a) Carte d'analyse sur un plan horizontal (distribution des concentrations).
 (b) Analyse sur un plan vertical (mesure de flux).

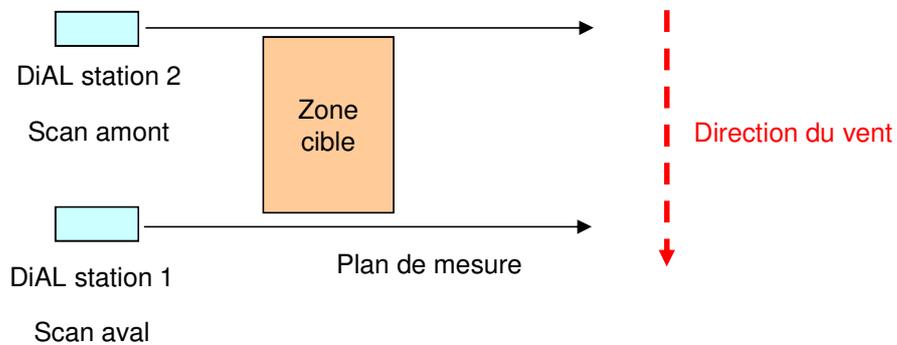


Figure 3. Schéma de positionnement pour la mesure du flux émissif d'une zone cible.

II.2. RETOUR D'EXPERIENCE

Cette technologie a été développée initialement dans les années 1980 pour la mesure de polluants issus de l'industrie pétrochimique. Des mesures de composés hydrocarbonés ont ainsi été réalisées entre autre :

- à l'échappement de torchères industrielles (Figure 4) ;
- au niveau de raffineries et d'usines de traitement de déchets issus de l'industrie pétrolière ;
- sur route ou sur rail, lors d'opérations de chargement de citernes de gazoil.

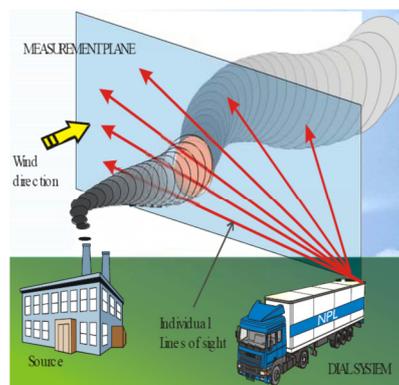


Figure 4. Schéma de principe des scans 2D réalisés à l'échappement de torchères industrielles.

Ces mesures ont été faites soit sur l'ensemble d'un site, soit en séparant les émissions de différentes zones du site industriel.

En ce qui concerne plus spécifiquement le méthane, la technologie DiAL a été utilisée pour la mesure des émissions issues d'infrastructures de stockage et de distribution de gaz naturel. En 2008, la méthode a été testée dans le cadre de campagnes d'inter-comparaison avec d'autres méthodes de mesure² (traçage gazeux, spectroscopie hélicoptée, modélisation inverse et cartographie radiale des panaches). Cette première étude a été complétée par cinq campagnes d'évaluation des performances opérationnelles du DiAL conduites en 2009 sur quatre ISDND françaises³ (Tableau 1).

Tableau 1. Champ d'application de la technologie DiAL.

Site	Caractéristiques des sites				Caractéristiques des casiers		
	Taille	Accessibilité	Topographie	Conditions de vent	Taille	Configuration spatiale	Type de casiers
A	90 ha	Facile d'accès	Plane, simple	Standard (uniforme)	10 ha	Casiers non séparés	Déchets jeunes
B	40 ha	Facile d'accès	Plane, simple	Standard (uniforme)	2 à 4 ha	Moyenne	Déchets jeunes
C	200 ha	Facile d'accès	Plane, simple	Standard (uniforme)	10 ha	Simple	Déchets plus anciens
D	54 ha	Accès moins aisé	En cuvette	Forte composante verticale	Variable	En cuvette	Déchets jeunes

III. APPLICATION DE LA TECHNOLOGIE DIAL SUR LES ISDND

III.1. CHAMP D'APPLICATION

Le Tableau 2 présente le champ d'application de la technologie DiAL, en termes de type de mesure réalisable, nature des sources diffuses mesurables et types de polluants détectables. Elle est donc tout à fait adaptée pour la mesure des émissions diffuses sur les ISDND.

Tableau 2. Champ d'application de la technologie DiAL.

Type de mesure réalisable	- Cartographie des émissions - Mesure du flux émissif
Nature des sources diffuses mesurables	- Sources ponctuelles - Sources surfaciques à l'échelle d'un casier ou d'un site
Polluants détectables	- Polluants dans l'IR : CH ₄ , composés hydrocarbonés en général - Polluants dans l'UV : HCl, benzène, toluène, etc.

² Babilotte (2008) *Field comparison of methods for landfill fugitive methane emissions measurement. Rapport ADEME.*

³ Babilotte (2010) *Mesure des émissions diffuses de méthane des ISDND. Evaluation des performances opérationnelles de la méthode LiDAR à absorption différentielle (DiAL). Rapport ADEME.*

III.2. CONDITIONS OPERATIONNELLES

III.2.1. Collecte de données préalable

Préalablement à une campagne de terrain, certaines informations sont nécessaires. Celles-ci comprennent :

- quelques données structurelles sur le site étudié : infrastructures d'accès, topographie locale, plans de recollement avec délimitation des casiers et localisation des réseaux de drainage et collecte du biogaz ;
- les données météorologiques locales (directions et vitesses des vents, fréquence et intensité des pluies, variations de pression atmosphérique) qui permettent de présélectionner la période de campagne en fonction des données saisonnières. Quant aux prévisions météo à court terme (sur 5 à 10 jours en moyenne), elles permettent en phase ultime de préparation de campagne d'évaluer les risques de perturbations météorologiques de manière à les anticiper autant que possible.

Quelle que soit la technique de mesure sélectionnée, les émissions diffuses dépendent en effet fortement des conditions opérationnelles du site étudié (efficacité du système de dégazage) et des conditions météo (précipitations qui influent sur l'étanchéité des couvertures minérales, gradients de pression atmosphérique, etc.).

III.2.2. Prestataire de service

Ces mesures ne peuvent être réalisées en interne par un exploitant à l'heure actuelle ; la technologie LiDAR requiert en effet un équipement complexe piloté par des spécialistes. A ce jour, très peu de laboratoires disposent de cet outil. En Europe, seul le **National Physical Laboratory** (NPL) en Grande-Bretagne réalise ce type de prestations à titre commercial.

National Physical Laboratory (NPL)
Quality of Life Division,
Environmental Measurements Group
Hampton Rd, Teddington
Middlesex, TW11 0LW, UK
<http://www.npl.co.uk/environment/>

Pour toute demande de proposition technique et commerciale, contacter l'accueil de l'Environmental Measurements Group : environmental_enquiries@npl.co.uk (☎ +44 20 8943 8637) ou encore Melanie Williams (melanie.williams@npl.co.uk ; ☎ +44 20 8943 6121) ou Rod Robinson (rod.robinson@npl.co.uk).

III.2.3. Equipements de mesure

A ce jour, seul l'équipement du NPL est disponible. Ce dernier, qui comprend une source laser, un télescope et un système d'analyse des résultats, est entièrement contenu dans un **semi-remorque** et est autonome énergétiquement. Les dimensions du camion (20 m de long, 4 m de large) le placent dans la catégorie des convois exceptionnels pour déplacement sur route (Figure 5a).



Figure 5. (a) Semi-remorque NPL avec télescope et mat anémométrique. (b) Mat fixe installé au sol.

Un **mat anémométrique** fixe (Figure 5b) est par ailleurs installé sur site tout au long de la campagne, afin de mesurer les caractéristiques du vent (vitesse et direction) à deux niveaux par rapport au sol (3 et 10 m). Un autre mat anémométrique localisé sur le camion avec une hauteur ajustable peut être utilisé à tout instant. Enfin, un système GPS permet le géo-référencement des points de mesure. Préalablement à la campagne, des **bonbonnes standards de méthane** doivent en outre être livrées sur site, pour la calibration des équipements de spectroscopie, ainsi que de **l'azote liquide** pour le refroidissement des lasers.

En conditions normales, **2 à 3 ingénieurs sont nécessaires pour réaliser les mesures**. Un **chauffeur expérimenté** est par ailleurs requis pour le déplacement d'une station de mesure à une autre. L'ensemble du personnel est inclus dans la prestation du National Physical Laboratory.

III.2.4. Conditions opérationnelles (accessibilité, topographie, météorologie)

En dépit de sa taille, l'appareillage LiDAR est fonctionnel dans presque toutes les configurations d'accès car il n'est pas nécessaire de parcourir l'ensemble de la zone à investiguer. Il suffit en effet que le camion d'analyse puisse être positionné à portée de mesure de la zone cible, ce qui est la plupart du temps possible à partir des routes d'accès aux casiers existants : la mesure opère en effet sur une **distance amont de 350 m** (minimum).

La topographie, en particulier la **déclivité du terrain** (cas des casiers en cuvette ou en fond de talweg), peut cependant perturber le champ de vent (qui présente alors une forte composante verticale) et par conséquent la mesure de flux qui est susceptible de diminuer avec la distance aval. Ce phénomène est en effet mal pris en compte par les instruments anémométriques 2D utilisés couramment. En revanche, la mesure DiAL étant censée mesurer la totalité de la distribution des émissions, elle ne fait pas appel aux modèles de dispersion, réduisant de ce fait l'incertitude inhérente à la prise en compte de ce phénomène. En définitive, bien que cela n'ait pas été confirmé par la réalisation d'une campagne inter-comparative sur des sites spécifiquement à fort relief, il se peut que la méthode DiAL donne dans ce cas des résultats plus satisfaisants que d'autres méthodes nécessitant une modélisation des phénomènes de dispersion.

Le **vent** est un facteur critique pour la mesure des émissions de méthane par la technologie DiAL, comme pour beaucoup de méthodes de mesure. Une faible contrainte sur la vitesse du vent doit être respectée : une vitesse comprise entre 2 et 7 m/s représente une fourchette idéale (Tableau 3). Au-delà de 7 m/s, les résultats restent représentatifs mais des vitesses de vent plus élevées entraînent une dilution plus forte du méthane dans l'atmosphère, ce qui rend sa détection plus difficile. Par suite, les flux de méthane étant fonction des concentrations mesurées, la précision des résultats s'en trouve affectée.

Tableau 3. Résultats type d'une série de scans sur un casier.

Heure		Vitesse de vent	Direction du vent	Émissions
Début	Fin			
hh:mm	hh:mm	m/s	°	kg CH ₄ / h
10:31	10:40	4,76	279,97	30,24
10:41	10:50	4,99	277,40	25,30
10:50	11:00	4,88	275,31	19,86
12:19	12:28	4,37	290,62	28,23
12:34	12:44	4,61	290,99	32,45
12:44	12:53	5,25	287,05	34,20
Moyenne		4,8	283,6	28,4
Ecart-type		0,3	6,9	5,2
CV %		6,4 %	-	18,4 %

Mais plus que la vitesse du vent, c'est sa **stabilité** qui importe, tant **en termes de direction que de vitesse**, car elle est requise pendant la durée des scans. Le vent peut être considéré comme stable durant un temps t, si :

- l'écart-type de la direction du vent est inférieur à 10° et ;
- le coefficient de variation (*écart-type/moyenne*) de la vitesse du vent est inférieur à 20 %.

La direction du vent impacte également la mesure en cas d'émissions des casiers environnants dirigées vers le plan de mesure. Dans ce cas, des scans amont et aval sont nécessaires de manière à ne mesurer que le flux issu de la zone étudiée. La mesure locale du vent à l'aide des mats fixe et portable permet en général de bien maîtriser son impact et les limites de la mesure effectuée.

III.3. PHASE DE MESURE

III.3.1. Stratégie de mesure

Après installation du mat fixe sur site et calibration de la longueur d'onde exacte du méthane, la première opération consiste à analyser les conditions météorologiques. En fonction de la vitesse et de la direction du vent notamment, la **station de mesure du camion** ainsi que **l'axe (ou les axes) de mesure** sont sélectionnés de manière à isoler la zone cible. Ils sont respectivement repérés par B01 et LOS1 sur l'exemple type de la Figure 6 ci-dessous ; en vert y est également indiquée la portée (ou distance) de la mesure, suivant l'axe LOS1. Pour chaque station de mesure, un ou plusieurs scans peuvent être réalisés, correspondant à une mesure de flux (scan vertical) ou de la forme du panache émissif (scan horizontal). Dans le cadre d'une mesure de flux, sous réserve de conditions de mesure stables telles que définies précédemment, un **minimum de 4 scans** est nécessaire pour garantir une mesure fiable sur une zone donnée.

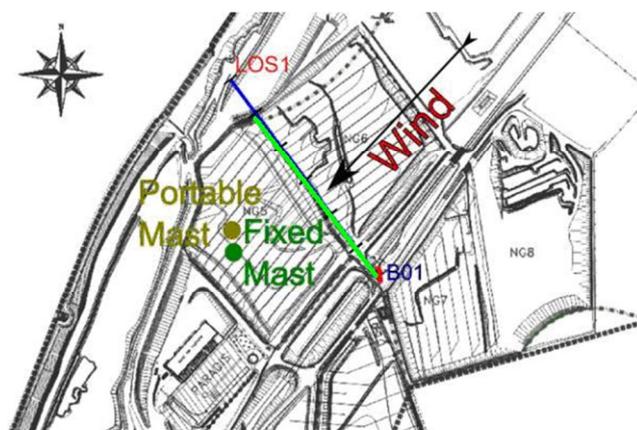


Figure 6. Exemple type de configuration de mesure.

III.3.2. Echelle spatio-temporelle

Un scan dure entre 10 à 20 minutes. Ainsi, dans des conditions de mesure stables, environ 60 à 80 minutes sont nécessaires pour chaque station de mesure.

La surface mesurée correspondante peut atteindre jusqu'à 15 ha (voire au-delà la portée théorique de mesure de la concentration en méthane pouvant dépasser 600 m en conditions idéales).

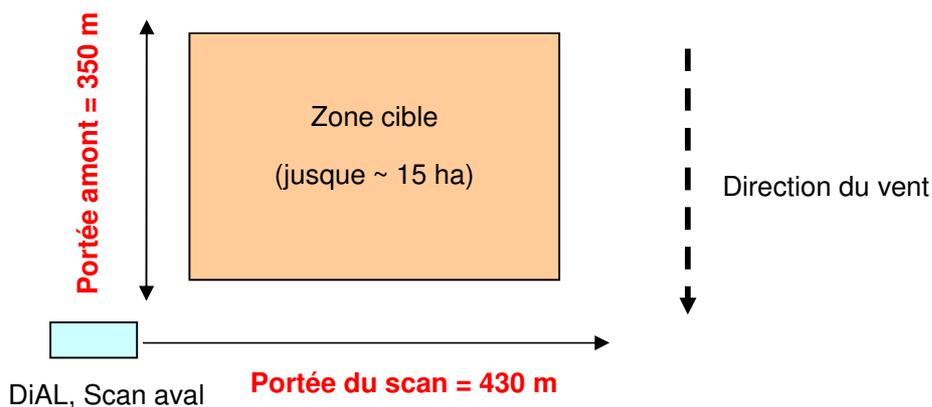


Figure 7. Représentation des dimensions de la zone cible potentielle

En effet,

- une **portée d'analyse moyenne de l'ordre de 430 m** a été mesurée en conditions réelles au cours de 4 campagnes de mesure sur site ;
- la mesure opère en outre sur une **distance amont de 350 m** minimum (Figure 7).

Dans la pratique, la portée est néanmoins parfois ajustée manuellement (et donc réduite) :

- avant tout pour se conformer à la forme et aux dimensions des casiers analysés ;
- mais aussi parfois pour tenir compte de la qualité des signaux laser lorsque les conditions atmosphériques sont médiocres (faible visibilité, forte pluie, particules et poussières en suspension).

III.3.3. Efficacité opérationnelle

Avant d'engager une campagne de mesures, il est nécessaire au préalable de procéder à l'installation du mat anémométrique fixe (1 heure) et à la calibration de la longueur d'onde du laser (½ journée). Ceci étant fait, la campagne de mesure à proprement parler peut débuter. Le temps nécessaire à l'évaluation des émissions d'un casier (de 5 ha par exemple, représentant 10 alvéoles de 5 000 m²) représente au total 3 à 4 h de travail (Tableau 4).

Tableau 4. Phases successives à prévoir lors d'une mesure sur un casier.

Phase	Description	Durée
Analyse préliminaire	Conditions météorologiques Conditions de terrain	½ h
Mise en place de l'appareillage de mesure	Déplacement à vitesse réduite	½ h
Scans	10 à 20 minutes / scan 4 scans si conditions idéales 5 à 10 scans autrement	1 h 30 à 2 h 30 par casier
Rangement du matériel	-	½ h
TOTAL (pour 1 casier de 5 ha environ)		3 à 4 h

L'analyse a posteriori des données opérationnelles indique que la méthode de mesure se comporte de manière assez similaire quelles que soient les conditions d'exécution : **60 % du temps environ est consacré à la mesure, 20 % au déplacement du camion entre les stations de mesure, les 20 % restants représentant les périodes non-opérationnelles** : 1 h le matin est consacrée au démarrage et à l'entretien du système (refroidissement du détecteur, alignement des miroirs, etc.), à quoi s'ajoutent des phases d'attente lorsque les conditions de vent trop variables ne permettent pas de définir un emplacement stratégique pour le camion de mesure.

De manière générale, un compromis doit être recherché par l'équipe de mesure entre le temps de déplacement du camion et le temps nécessaire pour effectuer les séries de scans. Cela peut conduire parfois à des choix d'optimisation entre contraintes logistiques et précision de la mesure. Idéalement, il conviendrait de déplacer le camion au niveau de chaque séparation de casier pour distinguer parfaitement les contributions casier par casier. En déplaçant moins le camion et en jouant sur l'angle de tir, il est possible de gagner en temps non opérationnel mais en contrepartie certains scans sont alors réalisés à cheval sur deux casiers.

III.3.4. Durées des campagnes de mesure

La durée d'une campagne de mesure DiAL sur une ISDND telle que proposée par le National Physical Laboratory, unique prestataire européen, est fonction de la superficie des casiers à couvrir. En première approche, on pourra prévoir une campagne :

- de 1 à 3 jours pour un site de 5 à 20 ha ;
- de 3 à 5 jours pour un site de 20 à 50 ha ;
- jusqu'à 8 jours au-delà de 50 ha.

Cette durée d'intervention est toutefois à moduler en fonction des conditions météorologiques (pluie, vent) mais aussi de l'exigence fixée ou non d'évaluer les émissions à l'échelle de chaque casier de stockage plutôt qu'à l'échelle du site. En effet, une telle évaluation par casier nécessite un nombre accru de mesures (souvent de plus courte portée).

A cette durée d'intervention sur site, s'ajoute les trajets du camion de mesure depuis sa base (banlieue sud-ouest de Londres, près de l'aéroport d'Heathrow) : il convient de compter 2 à 5 jours de voyage aller-retour en fonction de la localisation du site sur le territoire français.

III.3.5. Délais et coûts d'intervention

Les délais d'intervention du NPL sont en général assez longs (jusqu'à 6 mois). D'après NPL cependant, quand l'appareillage n'est pas mobilisé pour de longues durées, le laboratoire essaye de répondre aux demandes en tenant compte des contraintes des clients.

Financièrement parlant, la mobilisation des équipes du NPL représente un coût compris approximativement dans une fourchette de 15 à 45 000 euros (pour une moyenne de 25 à 30 000 euros), trajets et rapports inclus. Le montant de la prestation dépend de la surface du site à étudier, de sa localisation sur le territoire français et enfin de sa configuration. Une mesure globale plutôt qu'individualisée (casier par casier) peut permettre d'économiser entre 3 et 10 000 euros. Enfin, un suivi sur plusieurs sites voisins en une seule tournée peut aussi permettre de réduire sensiblement les coûts d'intervention.

III.4. INTERPRETATION DES RESULTATS

III.4.1. Sensibilité de la mesure

La sensibilité de la mesure de concentration dépend de la portée de la mesure. Pour le méthane, et pour une portée de 200 m, la sensibilité théorique est de l'ordre de 0,05 ppm, soit un niveau très inférieur à la concentration moyenne présente dans l'atmosphère : 1,6 à 2 ppm. Une telle sensibilité est donc amplement suffisante en conditions normales d'utilisation.

III.4.2. Traitement des données

La méthode DiAL présente l'avantage de ne reposer que sur un faible nombre d'hypothèses, contrairement à d'autres méthodes reposant en partie sur des modèles de dispersion atmosphérique. Ceci limite les biais d'interprétation des résultats, néanmoins le traitement des données nécessite tout de même un personnel expert pour le filtrage des données (soustraction du bruit), la génération des profils de concentration à partir des valeurs mesurées (utilisation d'algorithmes développés au NPL pour réduire les artefacts) et la discrétisation des valeurs obtenues dans des conditions non propices (vent non stable, par exemple).

Un soin particulier doit être porté à la détermination du champ de vent, en particulier lorsque les profils de concentration mesurés présentent d'importantes variations spatiales. En effet, une erreur sur la vitesse du vent dans une zone où la concentration est importante affectera fortement la précision des résultats. Dans ce cas, une procédure plus complexe doit être employée, qui inclut l'utilisation d'un logiciel combinant les données mesurées par l'anémomètre à celle d'un modèle météorologique.

III.4.3. Type de résultats

Pour la **mesure de flux de méthane**, une valeur globale par zone cible (ex : un casier) ou pour l'ensemble du site est mesurée (en kg CH₄/heure : cf. Tableau 3 ou encore en g CH₄/seconde).

Pour obtenir des **coefficients d'émission surfacique** (en g CH₄/m²/s), il est nécessaire d'estimer la surface de la zone émissive analysée, à partir de la portée amont et de la portée du scan (cf.

Figure 7). Les valeurs ainsi estimées pourront être ensuite analysées en regard d'une part de la composition initiale et de l'âge de déchets et d'autre part de la configuration des casiers étudiés (hauteur de déchets, type de couverture, etc.).

En outre, il est possible en recoupant deux plans d'analyse verticaux non parallèles de procéder à une **identification des principales zones émissives**. En effet, lorsque les panaches émissifs d'un même casier sont visualisés suivant deux configurations différentes (e.g. Figure 8 : casier identique analysé successivement avec un vent dirigé respectivement vers l'est puis vers le sud), la projection des zones de panaches selon les directions du vent aboutissent à la localisation des zones d'émission principales (cf. cercles roses sur la Figure 9).

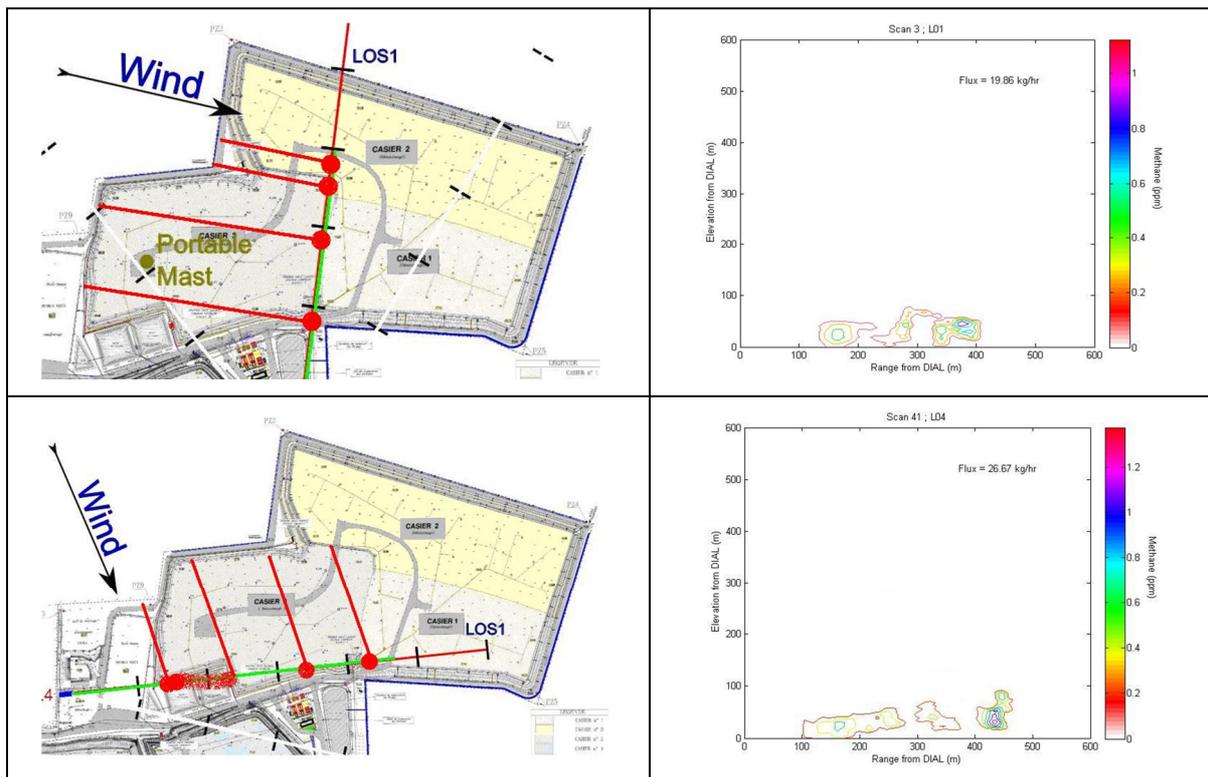


Figure 8. Localisation de deux profils de mesure DiAL sur un même casier et visualisation des panaches correspondants.

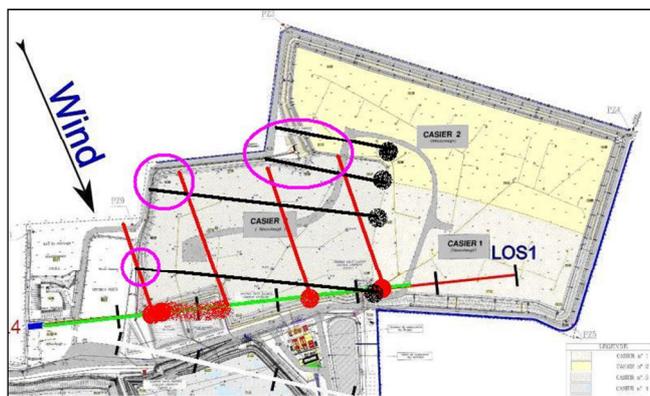


Figure 9. Localisation de zones de fuites par projection combinée de deux profils de mesure.

Enfin, quand pour un même casier des mesures ont été réalisées avec et sans dégazage, il est possible d'aller un peu plus loin dans l'interprétation des données en tentant d'estimer le **coefficient d'oxydation moyen du méthane** de la couverture du casier.

IV. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

IV.1. ANALYSE MULTICRITERES

La Figure 10 synthétise les caractéristiques techniques de la technologie DiAL (zonage foncé), comparée à une solution idéale (zonage clair).

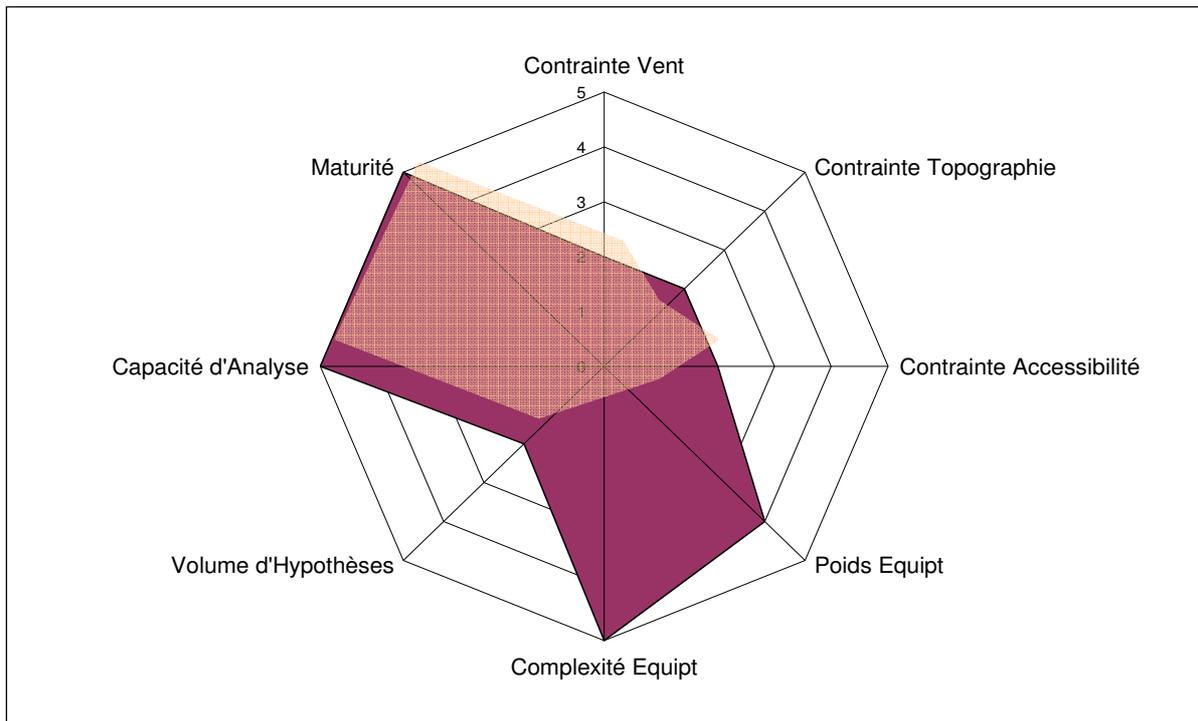


Figure 10. Analyse multicritères de la technologie DiAL.

Les principaux avantages de cette méthode tiennent à :

- **sa forte maturité technique** : bien que le retour d'expérience soit encore limité dans le cadre d'une utilisation en ISDND, la méthode a largement été référencée pour la mesure de polluants hydrocarbonés sur les installations pétrochimiques ;
- **son faible volume d'hypothèses** (utilisation d'hypothèses globales pour la dispersion atmosphérique ce qui permet de s'affranchir d'un modèle de dispersion atmosphérique) ;
- **ses faibles contraintes liées au vent** : la mesure locale du champ de vent permet de s'assurer que la mesure est réalisée dans des conditions optimales (vent de vitesse et direction stables sur une période de 80 minutes environ) ;
- et enfin **sa capacité d'analyse** qui permet à la fois de cartographier et de quantifier les émissions diffuses à l'échelle de chaque casier.

A l'inverse, certaines limites ont été mises en évidence, essentiellement des contraintes logistiques :

- **acheminement et déplacement** du semi-remorque sur le site ;
- **existence d'un unique prestataire** technique à ce jour en Europe ;
- **complexité technique de l'équipement** (qui nécessite une mise en œuvre par une équipe de spécialistes).

Il convient enfin d'ajouter que la technique DiAL n'a été testée qu'à une seule occasion sur un site à fort relief : par conséquent, la qualité des résultats dans des telles conditions mériterait d'être confirmée ultérieurement.

IV.2. PERSPECTIVES DE DEVELOPPEMENT DE LA TECHNOLOGIE DIAL EN ISDND

Compte tenu de la nécessité chaque jour plus grande d'évaluer les émissions de méthane des ISDND dans une démarche générale de qualité, la méthodologie DiAL, dont les performances sont globalement très encourageantes, est très probablement appelée à se développer dans les années à venir.

Cependant, en vue d'une application en routine sur les ISDND, une simplification du système de mesure et d'analyse serait souhaitable dans le sens d'une plus grande mobilité de l'outil et d'une réduction des coûts. En outre, des progrès restent possibles s'agissant de l'estimation de la portée de la mesure.

Enfin, la mise en œuvre de cette technique sur des sites implantés en cuvette ou en fond de talweg induit des perturbations à ce jour mal prises en compte par les instruments anémométriques utilisés. Aussi, l'utilisation de capteurs de vent en 3 dimensions mériterait d'être testée en vue de la détermination de facteurs correctifs applicables aux estimations de flux.