

Étude de cas

EXPOSITION CHIMIQUE DES SALARIÉS DANS LES ACTIVITÉS DE DÉPOLLUTION DES SOLS CONTAMINÉS PAR HYDROCARBURES

PASCAL
POIROT
INRS,
département
Ingénierie des
procédés

FRÉDÉRIC
CLERC
INRS,
département
Métrologie
des polluants

→ **LA PROBLÉMATIQUE:** La réhabilitation des sites et des sols pollués est un secteur d'activité en plein essor en raison de l'augmentation du nombre de friches industrielles et de l'action du ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (MEEM) qui en a fait une priorité du Grenelle de l'environnement. Du fait d'une réglementation contraignante, mais aussi d'une demande foncière forte, ce marché est en augmentation de 9,5% par an. Au-delà des risques que ces sites présentent pour les personnes et son environnement, la dépollution des sols suscite des questions quant aux risques chimiques encourus par le personnel travaillant sur les sites pollués d'autant que les études scientifiques dans ce domaine sont peu nombreuses [1, 2]. En coopération avec l'Union des professionnels de la dépollution des sites (UPDS) [3], principal syndicat professionnel représentant 55% du marché, l'INRS a mené une campagne de mesures visant à évaluer le niveau d'exposition chimique du personnel travaillant sur les sites pollués par les hydrocarbures.

→ **LA RÉPONSE DE L'INRS:** La coopération avec l'UPDS a permis de faciliter les contacts et les interventions sur les chantiers, toujours délicates en raison des incertitudes concernant la nature des polluants, des variations géographiques ou temporelles des concentrations (hétérogénéité), de la multiplicité des intervenants et du caractère temporaire des chantiers de dépollution. Cette collaboration a permis de sélectionner des chantiers temporaires de dépollution avec traitement *in situ* (sans excavation) ou hors site après excavation sur la base d'une liste fournie en fonction de différents critères (Cf. Encadré 1).

La sélection des chantiers a été complétée par celle de sites ou plates-formes de traitement permanent. Ces plates-formes qui font du traitement hors

site reçoivent toute l'année des camions de terres polluées provenant de chantiers temporaires. Dans les deux cas, des visites préliminaires ont permis d'étudier la faisabilité d'une intervention. Sept campagnes de mesures ont été réalisées sur cinq chantiers temporaires (A, B, C, D, G) et deux sites permanents (E et F) en fonction de l'importance du site et de divers paramètres (nombre de salariés, durée du chantier, éloignement...) suivant différentes techniques de dépollution (Cf. Encadré 2) propres aux hydrocarbures. En raison de la variabilité de nombreux paramètres (en plus de ceux cités ci-dessus), comme la quantité de polluants dans le sol, le site lui-même ou les conditions météorologiques, on ne peut parler, dans ce contexte, d'une

ENCADRÉ 1 LES DIFFÉRENTS TYPES DE CHANTIERS

Les chantiers temporaires correspondent à un lieu donné dont il faut dépolluer la terre et n'existent plus lorsque la dépollution est terminée.

Pour y parvenir trois techniques existent :

- *in situ* : la terre est dépolluée sur place sans excavation ;
- sur site : la terre est excavée mais traitée sur le chantier lui-même à proximité de la fouille ;
- hors site : la terre excavée est transportée sur une plate-forme permanente de dépollution fonctionnant toute l'année. Bien que l'excavation ne soit pas en elle-même un traitement du sol (mais du site), elle est souvent rencontrée sur les chantiers, car il s'agit bien d'une étape incontournable pour les professionnels du secteur.

ENCADRÉ 2

PROCÉDÉS ET TECHNIQUES DE DÉPOLLUTION

Les HCT (hydrocarbures ou hydrocarbures totaux) issus de la famille des carburants pétroliers, facilement biodégradables, sont les principaux polluants des sols, seuls ou en mélanges avec d'autres hydrocarbures type BTEX (benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes) ou encore type HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques). Le marché de la dépollution des sols utilise des techniques très variées qui sont classées en quatre grandes catégories : le confinement, les procédés biologiques, les procédés physico-chimiques et les procédés thermiques. Le mode de mise en œuvre de ces techniques peut également se distinguer selon qu'il s'agit de traitements hors site, sur site et *in situ*. Chacune correspond à des contraintes spécifiques résultant à la fois de la nature des polluants et du sol, des objectifs de dépollution, du contexte environnemental, des coûts et de la

durée de dépollution.

En ce qui concerne les hydrocarbures, les principaux procédés sont :

- ventilation forcée des sols *in situ* (traitement biologique, *bioventing*) pour les chantiers *in situ* ;
- ventilation forcée des sols *in situ* (couplée à l'air, *sparging*) pour les chantiers *in situ* ;
- ventilation forcée des sols en terre hors site (traitement biologique, bioterre biopile). Il s'agit souvent de plates-formes de valorisation de terres excavées.

Ces trois techniques sont assez similaires dans leur fonctionnement et, dans la plupart des cas, la ventilation des terres polluées permet la stimulation des microorganismes naturellement présents dans le milieu pour dégrader les hydrocarbures. Dans certains cas, l'ajout de microorganismes a pour but d'augmenter la vitesse de biodégradation. Ces traitements sont qualifiés de biologiques selon

l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe), qu'ils soient avec ou sans apport de bactéries/nutriments. Ils sont efficaces sur un grand nombre de polluants organiques et, en particulier, les hydrocarbures et les solvants halogénés. Ces types d'installation (décrits sur www.selecdepol.fr) ont été rencontrés lors de cette étude mais sans ajout de nutriments/bactéries et ne nécessitent donc pas d'évaluation spécifique de l'exposition biologique des salariés. Il est à noter cependant que des micro-organismes sont naturellement présents dans les sols ; la plupart sont non pathogènes, mais certains peuvent présenter un danger pour la santé (bacille du tétanos, parasites...). Des mesures de prévention contre les risques biologiques sont donc à respecter (cf. Risques biologiques et biodépollution des sols, INRS, *Hygiène et sécurité du travail*, 230, ND 2372, 2013).

bonne représentativité des chantiers investigués, mais plutôt d'un bon aperçu.

Les types de chantiers de dépollution

Les chantiers A, D et G concernaient des zones en milieu urbain nécessitant l'excavation des terres. Les terres excavées par pelle mécanique étaient envoyées par camion soit dans des centres de traitement hors site, soit en comblement de carrières selon la nature et les concentrations en polluants, soit encore en exutoire local pour les déchets ultimes. Sur ce type de chantiers, les salariés potentiellement exposés aux polluants chimiques sont les conducteurs d'engins (personnel sous-traitant) et les techniciens de sols des entreprises de dépollution. Il est à noter la spécificité du chantier G (Cf. Figure 1) qui, en raison de la proximité d'habitations, était clos sous un chapiteau avec ventilation.

Le chantier B, situé dans une ancienne usine à gaz, présentait des sols pollués par hydrocarbures aromatiques ou BTEX (benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes) jusqu'au niveau de la nappe phréatique. Le procédé de traitement *in situ* mis en œuvre était le *venting* (ventilation forcée) couplé à l'*air sparging*, en raison de la présence des nappes d'eau souterraines à faible profondeur.

Le chantier C était en phase d'installation de *venting*

avec forages et mise en place des drains lorsque l'INRS est intervenu.

Les plates-formes E et F (Cf. Figure 2 et 3) valorisaient les terres polluées issues de divers chantiers. La terre, une fois mise en bioterre (andains de terre équipés de drains d'aération), subit une ventilation forcée hors site pour être dépolluée. Selon le taux de pollution en HCT (hydrocarbures totaux) et plus particulièrement en HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques), l'air envoyé dans les drains peut être enrichi en microorganismes ou en apport nutritif pour augmenter la vitesse de dégradation des polluants – ce qui n'a pas été le cas lors des campagnes INRS.

Dans l'ensemble, les chantiers employaient rarement plus de quatre opérateurs par poste de travail. L'équipe-type sur un chantier ou un site était constituée d'un ou deux conducteurs de pelle et d'un ou deux opérateurs polyvalents ou techniciens de sol, dont le chef d'équipe lui-même. La conduite des pelles représentait environ 80% du temps de travail des opérateurs. Les cabines des engins étaient équipées de systèmes de filtration, pour les poussières, *a minima*. Il est à noter que les conducteurs de pelles et de tombereaux (camions assurant les transports de matière entre le chantier et les zones de stockage) appartenaient souvent à des entreprises de sous-traitance.





↑ FIGURE 1 Opérateur dans la fouille du chantier G.

© ERC

Par ailleurs, les salariés, sur le terrain ou au sol, généralement issus de l'entreprise de dépollution, étaient polyvalents, car peu nombreux. Leurs tâches étaient donc très variées : entretiens divers, criblage, traçage au sol dans les fouilles, prélèvements de terre, intervention sur les installations en cas d'incident, ce qui rendait leur exposition potentielle individuelle très variable. Ce personnel était également amené à effectuer diverses interventions sur la base de vie du chantier. Ces travailleurs étaient équipés d'appareils de protection respiratoire et portaient des gants et des combinaisons contre l'exposition cutanée. Les travailleurs portaient également des détecteurs spécifiques avec alarme en rapport avec les polluants pouvant être présents dans le sol. Les caractéristiques des chantiers ainsi que les conditions météorologiques et les périodes des campagnes sont résumées dans le tableau 1.



↑ FIGURE 2 Engins évoluant sur le site E.

© Serge Morillon/INRS

Les prélèvements et mesurages

57 prélèvements individuels complétés par 59 mesurages en ambiance ont été effectués sur la durée d'un poste complet durant trois jours consécutifs sur l'ensemble des chantiers.

Les mesurages ont été réalisés suivant les méthodes de prélèvements et de dosages classiquement utilisées à l'INRS et qui sont regroupées dans le recueil de méthodes d'évaluation des expositions MétroPol¹. Les matières particulaires totales (MPT) issues de l'action mécanique ou physique des engins sur ou dans le sol peuvent fortement contribuer au niveau d'empoussièrement de l'atmosphère de travail, particulièrement en période sèche. Ces concentrations pondérales en MPT ont été mesurées par gravimétrie à hygrométrie compensée. La technique utilisée est décrite dans la fiche MétroPol 002. Ces prélèvements sont également à la base des analyses quantitatives de métaux éventuellement présents dans le sol.

Les hydrocarbures ont été prélevés sur tube de charbon actif SKC 226-06 à un débit de 200 ml/min ou sur badge GABIE (fiche MétroPol C V01). Les analyses qualitative et quantitative ont été effectuées par couplage chromatographie en phase gazeuse/spectrométrie de masse (GC-MS). En outre, l'utilisation d'appareils de mesure à lecture directe équipés d'un détecteur à photo-ionisation (PID) a permis de mettre en évidence les variations de concentration en composés organiques volatils (COV) pendant un poste de travail ou à un poste fixe.



↑ FIGURE 3 Montage d'un biotierre sur le site F.

© Serge Morillon/INRS

Exposition des salariés

Les principaux résultats concernant les MPT et les COV (regroupés sous forme d'un indice d'exposition avec $I_{exp} = C_1/VL_1 + C_2/VL_2 + \dots + C_n/VL_n$) sont présentés sur deux graphiques (Cf. Figures 4 et 5). La figure 4

CHANTIER/ SITE	ORIGINE DE LA POLLUTION	POLLUANTS PRINCIPAUX (SOURCE M O)	C MOY DES POLLUANTS EN MG/KG	PROCÉDÉ ET TECHNIQUE DE DÉPOLLUTION (ÉTAPE PENDANT L'INTERVENTION INRS)	NB DE SALARIÉS	NB DE PT DE PRÉL AMB	PÉRIODE	T°C MIN--- MAX	CONDITIONS MÉTÉO: ÉTAT DU SOL/ TERRE
A temporaire	ancienne usine métallurgique	HCT COHV	5900 < 1	excavation, criblage: stockage sur site et/ou traitement hors site	max 4	2	janvier	1,3--- 9,3	humide: sol boueux
B temporaire	ancienne usine à gaz	BTEXN	10 000	venting/sparging <i>in situ</i> extraction triple phase	2	2	janvier	1,3--- 9,3	humide: sol boueux
C temporaire	ancienne usine métallurgique	HCT COHV	8 000 (max) 80	venting <i>in situ</i> prévu mise en place de forage	3	2	mars	7---13	humide: sol boueux
D temporaire	ancien atelier imprimerie	HCT, HAP, métaux	non connu	excavation, stockage hors site et/ou traitement hors site	2	2	avril	6--- 21,5	soleil: sol sec en surface
E permanent	plate- forme de dépollution permanente	HCT HAP	910 170	(bio)venting hors site montage de biotertre	6	6	octobre	10--- 19	soleil: terre rapportée sèche en surface
F permanent	plate- forme de dépollution permanente	HCT HAP	3 000 > C < 5 000 traces	terre stockée sous hall avant (bio)venting hors site montage de biotertre	3	4	mai	17---22	humide: terre rapportée sèche en surface
G temporaire	ancienne station service	HCT BTEX	4 300 1 200	chantier sous tente excavation, criblage: et traitement hors site	4	4	juin	19---28	soleil: sol sec en surface

montre l'exposition des salariés en indiquant les moyennes et écarts-types géométriques des deux polluants principaux par chantier et distingue les deux catégories de personnel. La figure 5 reprend la même disposition et montre les concentrations mesurées en ambiance par chantier et moyennées sur l'ensemble des chantiers.

Les matières particulaires totales (MPT)

Les chantiers ou sites à ciel ouvert visités étaient des lieux peu empoussiérés. Les MPT sont en effet émises dans l'atmosphère par effet mécanique des engins évoluant sur terrain sec. Les concentrations mesurées en ambiance s'étendent de 0,04 à 1,23 mg/m³. Sur ces chantiers, l'exposition des opérateurs, bien que plus élevée que celle mesurée en ambiance, était à des niveaux relativement faibles (entre 0,07 et 2,54 mg/m³). Sur le chantier G sous tente fermée, malgré la ventilation et l'extraction de l'air, la concentration en ambiance s'étend de 1,89 à 7,74 mg/m³. Cependant et à l'inverse des autres chantiers, les concentrations individuelles sont inférieures (C moy = 1,53 mg/m³) en moyenne aux valeurs mesurées en ambiance et très dispersées (C Max = 7,74 mg/m³); les plus fortes valeurs sur ce chantier pouvant s'expliquer par de la terre

plus sèche due au confinement et à la période de prélèvement.

Les composés organiques volatils (COV)

Les COV ont été prélevés et dosés sur tous les chantiers et sites permanents. Les analyses quantitatives ont mis en évidence, dans l'atmosphère de travail essentiellement, des hydrocarbures aromatiques (dont les BTEX) en très faibles concentrations sur l'ensemble des sites, à l'exception des chantiers B et G où les sols étaient particulièrement pollués par ces substances selon les maîtres d'ouvrage. Sur le chantier B, pourtant à ciel ouvert, des mesures ambiantes ont indiqué la présence de benzène à des concentrations de la moitié de la valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP). Sur le chantier couvert G, la présence de BTEX conduit à un indice d'exposition/pollution maximal de 41%. L'utilisation d'appareils à lecture directe, type PID, montre que les variations d'exposition peuvent être importantes au cours du temps et que les opérateurs au sol sont soumis à des pics d'exposition [4] comme en atteste la figure 6, réalisée à partir de valeurs enregistrées sur le chantier G. Les pics d'exposition, n'indiquant pas la valeur limite à court terme (VLCT) définie sur 15 minutes, ne doivent cependant pas occulter

↑ TABLEAU 1
Caractéristiques
des chantiers/
sites.

FIGURE 4 → Expositions individuelles - moyennes et écarts types géométriques (GSD: écart type géométrique).

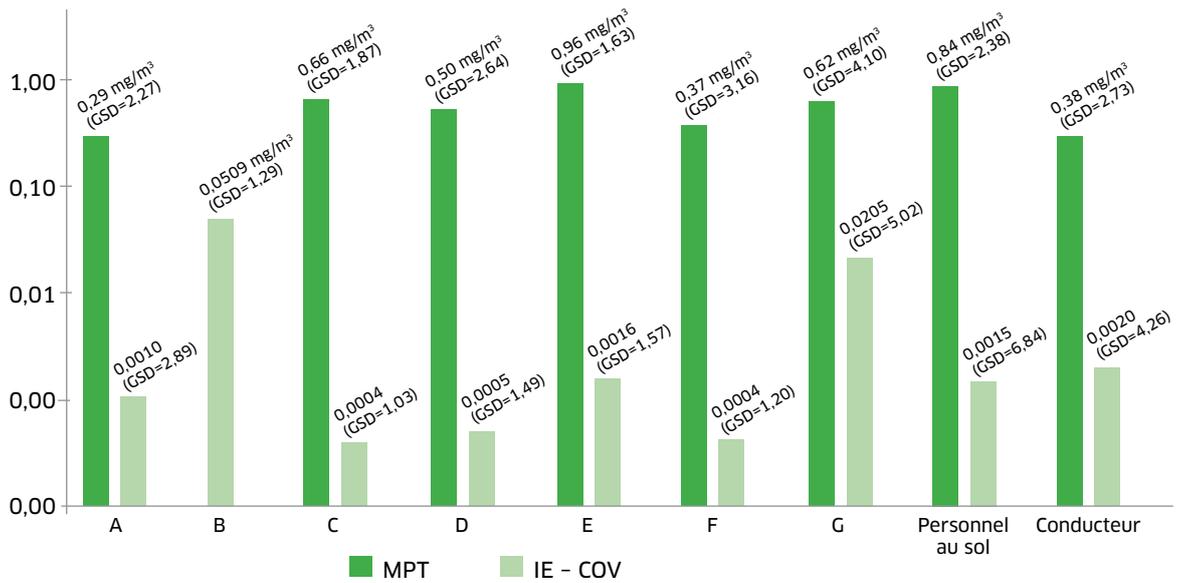
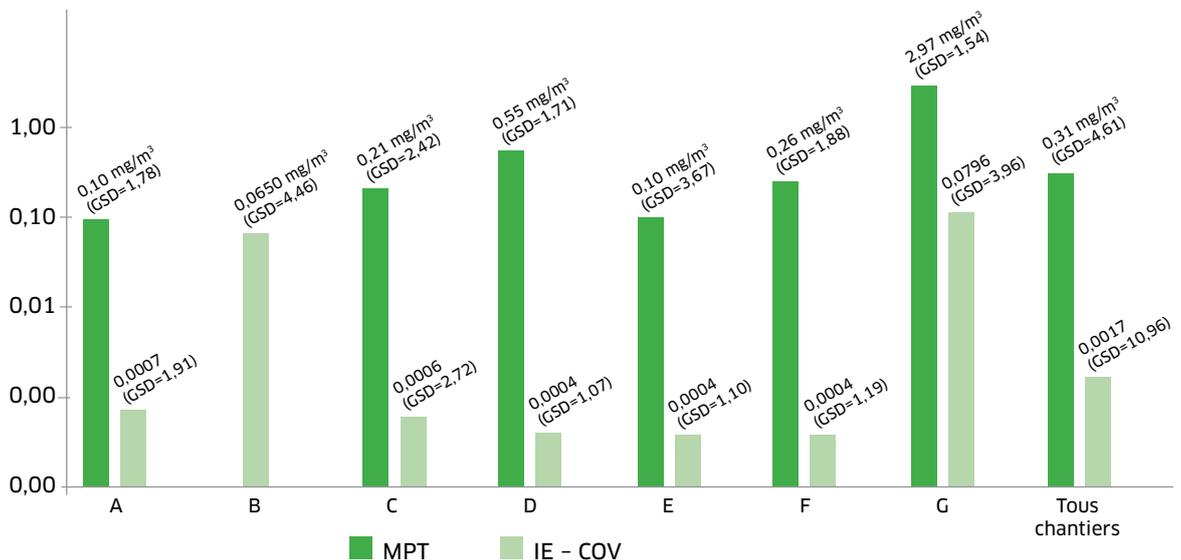


FIGURE 5 → Concentrations ambiantes - moyennes et écarts types géométriques (GSD: écart type géométrique).



l'exposition moyenne prépondérante calculée sur la durée d'un poste de travail.

Protection des travailleurs

Ces campagnes de mesures montrent que les conducteurs d'engins, qu'ils soient employés par la société de dépollution ou par une entreprise de sous-traitance, sont relativement bien protégés en restant dans leurs cabines équipées de caisson filtrant avec une moyenne géométrique de 0,38 mg/m³ en MPT alors que celle-ci s'élève à 0,84 mg/m³ pour les opérateurs au sol. La différence est nettement moins marquée en ce qui concerne les COV, en raison de l'incertitude liée aux très faibles concentrations en général. En revanche, l'exposition des techniciens au sol mesurée à l'extérieur de l'appareil de protection respiratoire (APR), quand ils en portent, est plus élevée que celles des conducteurs d'engin. Il ressort de ces campagnes de mesures que, vis-à-vis de la pollution particulaire ambiante, deux catégories de salariés se distinguent sur presque tous les

chantiers: les conducteurs d'engins et les opérateurs au sol.

Discussion et conclusion

Les campagnes de mesures INRS ont permis d'établir un panorama de l'exposition chimique des salariés et de la pollution des atmosphères ambiantes lors du travail de dépollution des sols pollués par des hydrocarbures totaux avec utilisation de techniques appropriées, qu'il s'agisse de traitement *in situ* ou hors site par ventilation forcée (*venting*) ou simplement d'excavation, procédé largement répandu en zone urbaine.

POUR EN SAVOIR +

- Outil interactif de présélection des techniques de dépollution réalisé par le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) et l'Ademe et consultable sur www.selecdepol.fr



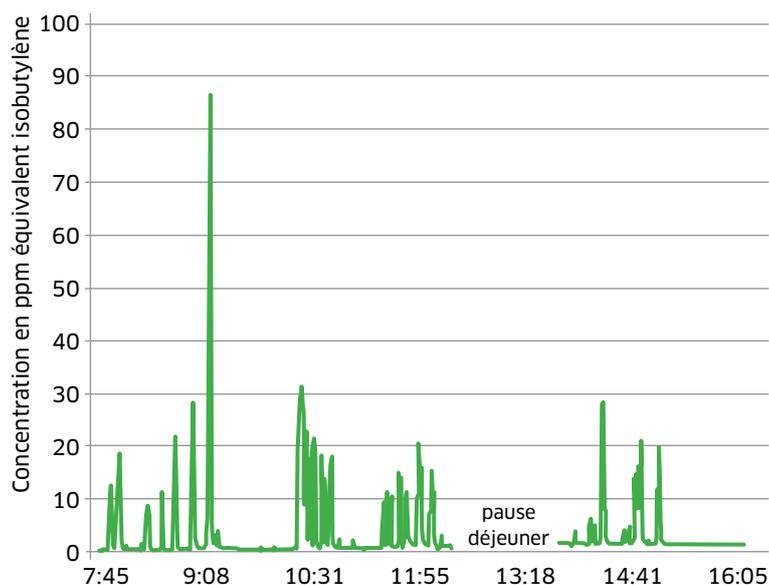
Lors d'une opération de dépollution et de réhabilitation d'un ancien site chimique, des opérateurs interviennent sous la tente pour réaliser des prélèvements de la nappe mise à jour.

Le degré d'empoussièrement est nettement inférieur à la VLEP des matières particulaires sur tous les chantiers dont l'activité est réalisée en extérieur, mais néanmoins très variable selon les plates-formes. Il dépend de plusieurs paramètres, dont l'activité des engins mécanisés, le degré de confinement du milieu de travail et, très probablement, le taux d'humidité des terres excavées ou mises en biotierre.

Les mesures de COV montrent que les substances retrouvées dans l'atmosphère de travail étaient essentiellement des BTEX, probablement en raison de leur volatilité, même si des hydrocarbures du type fuel lourd ou gazoil étaient potentiellement présents dans tous les sols selon les sociétés assurant la dépollution. Bien qu'elles soient faibles sur la plupart des chantiers, des concentrations atmosphériques relativement élevées peuvent être mesurées sur des chantiers « relativement imprégnés » comme le chantier B ou sur des chantiers clos comme le chantier G.

Les concentrations en MPT et en COV dépendent de nombreux paramètres dont la température, le confinement, le criblage à proximité... y compris sur un même chantier. Les résultats concernent les chantiers visités à un moment donné et ne sont certainement pas représentatifs de tous les chantiers de dépollution aux hydrocarbures, tant les paramètres régissant ces chantiers sont nombreux. Les phases de diagnostic concernant le type de polluant et la concentration dans le sol, toujours réalisées en amont, peuvent laisser de surcroît des incertitudes temporelles ou spatiales sur l'exposition chimique des salariés et la nature même des polluants susceptibles d'être rencontrés.

En conclusion, l'exposition aux agents chimiques est avérée et même si, globalement, les concentrations sont inférieures aux VLEP elles demeurent très variables sur un même chantier et d'un chantier à



↑ FIGURE 6 Exposition aux COV d'un technicien au sol : chantier G.

l'autre. Une estimation *a priori* des concentrations émises dans l'air de travail en fonction de différents paramètres intégrés est incertaine et seules des campagnes de mesures permettent d'évaluer avec précision les niveaux d'exposition sur un chantier. Les actions de prévention collectives étant difficiles à établir sur les chantiers en raison de la variation spatio-temporelle de l'activité, le port de l'APR et de détecteurs spécifiques est plus que recommandé aux salariés hors cabine d'engin (voire, éventuellement, pour les conducteurs d'engins en fonction de l'évaluation des risques). Les engins, quant à eux, doivent être équipés de cabines climatisées pressurisées à air épuré (CPAE). L'aide-mémoire technique ED 6228 édité par l'INRS [5] décrit les bonnes pratiques correspondantes qui permettent aux conducteurs de travailler dans un air assaini. ●

1. *MétoPol* est une base de données consultable sur www.inrs.fr

Remerciements

Les auteurs remercient J. Kunz-Iffli, N. Monta, T. Nicot et J. Grosjean pour leur participation à l'étude.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] MAISON A., HÉRY M., MOUTON C. Protection des travailleurs sur les chantiers de réhabilitation de sites industriels pollués, ED 866, INRS-Ademe, 2002, pp. 1-209.
- [2] FONTENEL F. La prévention des risques professionnels lors de la dépollution des sites et sols pollués en Île-de-France, Mémoire de prévention d'ingénieur-conseil, Cramif, 2009.
- [3] www.upds.org
- [4] NISSE C. 30^{es} journées nationales de santé au travail dans le bâtiment et les travaux publics, Blois, 10-12 juin 2009.
- [5] Assainissement de l'air des cabines d'engins mobiles, INRS, ED 6228, 2015.