

CompamedSanté

Evaluation des risques liés aux techniques de désherbage sur la santé des travailleurs



ACTIVITE DE DESHERBAGE ÉTUDE DES FACTEURS DE RISQUE ET PRECONISATIONS

Extrait du rapport final

Auteurs :

Gaëla Brohan*, Delphine Teigné* et Viviane Le Gall*.

Avril 2015

le cnam
Pays de la Loire

Plante&Cité
Ingénierie de la nature **en ville**
Center for landscape and urban horticulture

Financé par



* Conservatoire National des Arts et Métiers des Pays de la Loire - Institut d'Hygiène Industrielle et de l'Environnement – Ouest

RESUME

La réduction de l'usage des produits phytopharmaceutiques dans les zones non agricoles imposée par la réglementation liée à leur impact potentiel sur la santé et l'environnement a engendré l'émergence de techniques de désherbage alternatives notamment par l'usage de procédés thermiques ou mécaniques.

L'objectif de l'étude était d'investiguer les problématiques de risques professionnels engendrés par l'évolution des pratiques de désherbage en évaluant les risques générés par l'usage de différents matériels de désherbage.

Les observations et entretiens menés sur le terrain, la constitution de groupes de travail de professionnels, la recherche bibliographique et la réalisation de campagnes de mesurages pour caractériser les expositions à certains facteurs de risques ont permis d'identifier les différentes situations et les risques associés aux conditions d'utilisation des techniques de désherbage investiguées.

Les différentes techniques de désherbage peuvent présenter des risques pour la santé dont les dommages engendrés sont de gravité variable. L'étude présente des niveaux d'exposition à plusieurs facteurs de risque lors de l'usage de certains matériels de désherbage et précise les mesures de prévention à mettre en œuvre. Ces données pourront être utiles aux structures lors de l'évaluation des risques ou lors du choix d'un nouveau matériel.

Les matériels de désherbage investigués peuvent présenter des niveaux d'exposition importants aux différents facteurs de risque. Une démarche d'évaluation et de prévention efficace doit donc être mise en place. Des préconisations de prévention sont proposées pour chacune de techniques étudiées.

Des fiches de synthèse hygiène et sécurité ont été élaborées : 7 fiches relatives à chaque technique utilisée, 1 fiche concernant l'exposition aux facteurs de risque bruit, vibrations, poussières réputées sans effet spécifique et gaz d'échappement et 1 fiche relative aux risques transversaux.

L'ensemble des livrables de cette étude est disponible sur le site de Compamed : <http://www.compamed.fr/>

SOMMAIRE

RESUME	2
SOMMAIRE.....	3
LISTE DES TABLEAUX	5
LISTE DES FIGURES.....	4
ACRONYMES, SIGLES ET ABREVIATIONS	6
1. ÉTUDE DES FACTEURS DE RISQUE HYGIENE ET SECURITE	7
1.1. IDENTIFICATION DES FACTEURS DE RISQUE ET PERIMETRE D'INVESTIGATION	7
1.2. CARACTERISATION ET QUANTIFICATION DES NIVEAUX D'EXPOSITION	8
1.3. STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE ET PROTOCOLES DE MESURAGES	9
1.4. TRAITEMENT DES RESULTATS.....	9
1.5. PRECONISATIONS.....	10
1.6. LIVRABLES OPERATIONNELS	10
2. LE BRUIT.....	11
2.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS	11
2.2. DEFINITION DU BRUIT	11
2.3. EFFETS SANITAIRES DE L'EXPOSITION AU BRUIT	11
2.4. PARAMETRES PHYSIQUES MESURES	12
2.5. VALEURS REGLEMENTAIRES.....	12
2.6. MATERIEL ET METHODE.....	13
2.7. TRAITEMENT DES RESULTATS.....	13
2.8. RESULTATS MATERIELS DE DESHERBAGE	13
2.9. INTERPRETATION DES RESULTATS	17
2.10. PRECONISATIONS GENERALES	17
2.11. PRECONISATIONS SPECIFIQUES	19
3. LES VIBRATIONS CORPS ENTIER ET MAINS-BRAS.....	20
3.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS	20
3.2. DEFINITION DES VIBRATIONS.....	20
3.3. PARAMETRES PHYSIQUES MESURES	20
3.4. EFFETS SUR LA SANTE DE L'EXPOSITION AUX VIBRATIONS CORPS ENTIER ET MAINS-BRAS	21
3.5. VALEURS REGLEMENTAIRES.....	21
3.6. MATERIEL ET METHODE.....	22
3.7. TRAITEMENT DES RESULTATS.....	22
3.8. RESULTATS CORPS ENTIER	22
3.9. RESULTATS MAINS-BRAS	25
3.10. PRECONISATIONS GENERALES	28
3.11. PRECONISATIONS SPECIFIQUES	29
4. LES POUSSIERES REPUTEES SANS EFFET SPECIFIQUE	31
4.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS	31
4.2. DEFINITION DES POUSSIERES RECHERCHEES ET EFFET SANITAIRE	31
4.3. PARAMETRES PHYSIQUES MESURES	31
4.4. VALEURS REGLEMENTAIRES.....	31
4.5. MATERIEL, METHODE	32
4.6. RESULTATS	32
4.7. PRECONISATIONS GENERALES	33
5. LES GAZ D'ECHAPPEMENT	34

5.1.	CONTEXTE ET OBJECTIFS	34
5.2.	LES MOTEURS THERMIQUES – DEFINITION.....	34
5.3.	LES MOTEURS DES MACHINES PORTATIVES , 2 TEMPS ET 4 TEMPS	35
5.4.	REGLEMENTATION DES VEHICULES ET APPAREILS.....	35
5.5.	EFFETS SANITAIRES DE L’EXPOSITION AUX GAZ D’ECHAPPEMENT	36
5.6.	COMPOSITION DES GAZ D’ECHAPPEMENT DES MOTEURS DIESEL ET ESSENCE.....	36
5.7.	METHODE	36
5.8.	RESULTATS	37
5.9.	INTERPRETATIONS.....	43
5.10.	PRECONISATIONS POUR LES VEHICULES ET APPAREILS.....	44
6.	LE GLYPHOSATE.....	46
6.1.	CONTEXTE ET OBJECTIFS	46
6.2.	DEFINITION DU GLYPHOSATE.....	46
6.3.	EFFETS SANITAIRES DE L’EXPOSITION AU GLYPHOSATE.....	47
6.4.	MATERIELS ET METHODES DE MESURAGE DE L’EXPOSITION INDIVIDUELLE.....	48
6.5.	MESURAGES REALISES.....	49
6.6.	PERFORMANCES ANALYTIQUES DES METHODES	50
6.7.	TRAITEMENT DES DONNEES DE MESURAGE RELATIVES A L’EXPOSITION INDIVIDUELLE	50
6.8.	RESULTATS	52
6.9.	ANALYSE DES RESULTATS	53
6.10.	ANALYSE STATISTIQUE DES DETERMINANTS DES EXPOSITIONS.....	57
6.11.	PRECONISATIONS.....	58

LISTE DES FIGURES

Figure 1 :	Niveaux de bruit en fonction du matériel - comparaison aux valeurs réglementaires	15
Figure 2 :	Niveaux d’exposition aux vibrations corps entier en fonction du véhicule ou du matériel - comparaison aux valeurs réglementaires	24
Figure 3 :	Niveaux d’exposition aux vibrations main bras en fonction du véhicule - comparaison aux valeurs réglementaires.....	25
Figure 4 :	Niveaux d’exposition aux vibrations main bras en fonction du matériel - comparaison aux valeurs réglementaires.....	27
Figure 5 :	Photo d’un applicateur et d’un aide applicateur	46
Figure 6 :	Exemple de lecture des tableaux.....	49
Figure 7 :	Exemple de calcul utilisé pour exprimer l’exposition cutanée du corps.	51
Figure 8 :	Pourcentage du nombre de fois que chacune des 4 zones étudiées ressort comme étant la zone la plus exposée glyphosate+AMPA (b), légende utilisée (a).	53
Figure 9 :	Cinétiques d’élimination du glyphosate pour 10 Hommes-Traitements en µg/L d’urine	55
Figure 10 :	Cinétiques d’élimination du glyphosate pour 10 Hommes-Traitements en µg/g de créatinine	56

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Liste des observations réalisées par les hygiénistes	7
Tableau 2 : Liste des facteurs de risque	8
Tableau 3 : Approche conventionnelle	10
Tableau 4 : Valeurs réglementaires françaises - bruit	13
Tableau 5 : Niveau de bruit en fonction du matériel - comparaison aux valeurs d'exposition supérieures déclenchant l'action de prévention	14
Tableau 6 : Niveaux de bruit de différents tracteurs.....	16
Tableau 7 : Valeurs réglementaires françaises - vibrations corps entier.....	22
Tableau 8 : Niveaux d'exposition aux vibrations corps entier en fonction du véhicule ou du matériel - comparaison aux valeurs limites d'exposition.....	23
Tableau 9 : Valeurs réglementaires françaises – vibrations mains-bras.....	25
Tableau 10 : Niveaux d'exposition aux vibrations main bras en fonction du véhicule - comparaison aux valeurs limites d'exposition.....	25
Tableau 11 : Niveaux d'exposition aux vibrations main bras en fonction du matériel - comparaison aux valeurs limites d'exposition.....	26
Tableau 12 : Niveaux d'exposition aux poussières en fonction du matériel - comparaison aux valeurs limites d'exposition.....	32
Tableau 13 : Extrait d'un tableau repris d'une présentation de l'étude de Surot et al. (2009).....	35
Tableau 14 : Ordre de grandeur des principaux polluants produits par les moteurs thermiques d'engins.....	36
Tableau 15 : Classification des substances selon le règlement CLP.....	37
Tableau 16 : Type de valeur limite selon la substance	37
Tableau 17 : Niveaux d'exposition au benzène - Tondeuse marchant essence 4 temps - comparaison aux valeurs limites d'exposition	38
Tableau 18 : Niveaux d'exposition à certains composants des gaz d'échappement - Débroussailleuse essence 2 temps - Mélange essence huile à faire soi-même - comparaison aux valeurs limites d'exposition.....	39
Tableau 19 : Niveaux d'exposition à certains composants des gaz d'échappement - Débroussailleuse essence 2 temps - Mélange tout prêt - comparaison aux valeurs limites d'exposition	39
Tableau 20 : Niveaux d'exposition à certains composants des gaz d'échappement - Divers engins diesel - Comparaison aux valeurs limites d'exposition - Groupe comprenant des professionnels travaillant à l'intérieur et autour de tracteurs agricoles, camions et locomotives de manœuvre- sans trafic aux alentours	40
Tableau 21 : Valeurs d'immission du carbone élémentaire - mesurages sur 4 stations (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	41
Tableau 22 : Niveaux d'exposition aux particules diesel - Population de professionnels travaillant à l'extérieur - Angers - comparaison aux valeurs limites d'exposition - Groupe comprenant des agents d'entretien parcs et jardins, agents de maîtrise, policiers et agents d'entretien de la ville	41
Tableau 23 : Présentation des traitements ayant fait l'objet de mesurages selon les modalités pulvérisateur à dos; applicateur et aide-applicateur.....	49
Tableau 24 : Présentation des traitements ayant fait l'objet de mesurages selon les modalités pulvérisateur motorisé; applicateur et aide-applicateur.....	49
Tableau 25 : Méthodes d'extraction et d'analyses développées pour l'ensemble des compartiments étudiés	50
Tableau 26 : Performances analytiques des méthodes d'analyse.....	50
Tableau 27 : Résultats des données d'expositions individuelles selon les modalités matériel d'application et activité de l'agent	52
Tableau 28 : Résultats des données d'expositions individuelles quels que soient l'activité ou le matériel utilisé.....	52
Tableau 29 : Résultats des données d'exposition cutanée individuelle au glyphosate et AMPA ¹ en fonction du matériel et de l'activité de l'agent - comparaison à l'AOEL ²	54
Tableau 30 : Résultats d'analyse statistique des déterminants de l'exposition cutanée totale et de l'imprégnation... 57	57

ACRONYMES, SIGLES ET ABREVIATIONS

AMPL : AMPLitude urinaire

BVPG : Bruit, Vibrations, Poussières réputées sans effet spécifique et Gaz d'échappement

CIRC : Centre International de Recherche contre le Cancer

CLP : Classification, Labelling, Packaging (classification et étiquetage des produits)

COMPAMED : COMPAraison des MÉthodes de Désherbage

DL : Dose Létale

ETG : Écart Type Géométrique

GNR : Gazole Non Routier

HJT : Homme-Jour-Traitement

HT : Homme-Traitement

HTS : Homme-Traitement-Substance

LC/MS : Liquid Chromatography (chromatographie en phase liquide) / Mass Spectrometry (spectrométrie de masse)

LD : Limite de Détection

LQ : Limite de Quantification

MG : Moyenne Géométrique

MMO : Mode de Mise en Œuvre

MS : Mass Spectrometry (spectrométrie de masse)

MS/MS : Mass Spectrometry/Mass Spectrometry (spectrométrie de masse en tandem)

OCDE (OECD) : Organisation for Economic Co-opération and Development

PICB : Protecteurs Individuels Contre le Bruit

SCOEL : Scientific Committee on Occupational Exposure Limits - Valeur limite - Europe

T : Traitement

TMS : Troubles Musculo Squelettiques

TRK : Technische RichtKonzentrationen - Concentrations techniques de référence - Allemagne

VDA inf. : Valeur d'exposition inférieure Déclenchant l'Action de prévention

VDA sup. : Valeur d'exposition supérieure Déclenchant l'Action de prévention

VDV : Valeur de la Dose de Vibrations

VLE : Valeur Limite d'Exposition

ZNA : Zone Non Agricole

1. ÉTUDE DES FACTEURS DE RISQUE HYGIENE ET SECURITE

1.1. IDENTIFICATION DES FACTEURS DE RISQUE ET PERIMETRE D'INVESTIGATION

Dans le cadre de l'étude Compamed santé, la sélection des facteurs de risque à prendre en compte, a été réalisée selon les observations et échanges effectués sur le terrain et les recherches bibliographiques.

Le tableau 1 indique les observations réalisées par les hygiénistes.

Tableau 1 : Liste des observations réalisées par les hygiénistes

Date	Structure	Personnes suivies	Techniques de désherbage observées	Lieu
juillet 2013	Ville d'Angers	Chef d'équipe	thermique multi-flamme (Herbiogaz- Rabaud) mécanique tracteur avec un rabet (Irval) mécanique arrachage à la main	Parc public
septembre 2013	Ville d'Angers	3 agents en charge de la taille et du désherbage	mécanique arrachage à la main	Jardin d'enfants Allée d'un lotissement
septembre 2013	Ville d'Angers	3 agents en charge du désherbage	thermique multi-flamme (Herbiogaz- Rabaud) mécanique tracteur avec un rabet (Irval)	Parc public Allée d'un lotissement
septembre 2013	Entreprise partenaire	2 jardiniers	mécanique un tracteur avec une herse (Actisol) mécanique désherbage manuel avec racloir mécanique arrachage à la main	Site naturel Jardin d'enfants Aire de lotissement
novembre 2013	Entreprise partenaire	4 jardiniers	chimique système de détection (Weed-it)	Centre-ville d'une petite commune
2013	Collectivité Entreprises	Divers	thermique mono flamme thermique vapeur grand format mécanique débroussailleuse à brosse dure chimique pulvérisateur dosal	Pays de La Loire
juin 2014	Ville de Nantes	1 jardinier	râteau bunker	Parc public

Le périmètre d'investigation comprend deux niveaux :

- les risques spécifiques à l'activité de désherbage, Ces risques, inhérents à l'activité de désherbage, ont été investigués afin de les caractériser et de les quantifier.

- les risques non spécifiques à l'activité de désherbage appelés risques transversaux.

Les principaux risques transversaux sont liés aux différentes mises en œuvre possibles durant l'activité de désherbage telles que : l'utilisation de véhicules tout terrain, d'appareils à pousser ou à porter, etc. Certains risques transversaux sont mentionnés dans le cadre de l'étude car ceux-ci ont été observés sur le terrain ou mentionnés dans la littérature. Cette présentation ne saurait être exhaustive du fait de la variabilité des situations de travail qui dépendent notamment de l'environnement et de la structure concernée.

Les risques inhérents à l'environnement dans lequel les matériels de désherbage sont mis en œuvre sont exclus du champ de l'étude à savoir : les risques biologiques (allergènes, manipulation de terre, piqûres d'insectes, contact avec des déchets contaminés, etc.), le risque d'accident si le travail est proche de la voirie, le risque de noyade si le travail est à proximité d'une étendue d'eau, les risques liés aux conditions météorologiques, etc.

Sont aussi exclues du champ de l'étude toutes les expositions aux facteurs de risque ayant lieu en dehors de la réalisation des opérations de désherbage telles que : l'exposition au bruit liée au trajet à effectuer jusqu'au lieu à désherber, le risque routier, etc.

Ces risques ne sont pas inhérents à l'activité de désherbage et non donc pas été investigués. Cependant, ils doivent être analysés et répertoriés dans le document unique de la structure dans l'objectif de mettre en place des actions de prévention.

Le tableau 2 répertorie la liste des facteurs de risque.

Tableau 2 : Liste des facteurs de risque

	Risques	Éléments d'aide à l'identification (non exhaustif)
Risques spécifiques à l'activité de désherbage	Produit chimique contact cutané	Pulvérisation de produits phytopharmaceutiques, projections, etc.
	Produit chimique inhalation	Vapeur de produits phytopharmaceutiques, etc.
		Émissions des moteurs thermiques : gaz d'échappement
		Remise en suspension de poussières, etc.
	Bruit	/
	Vibrations corps entier	Conduite d'un véhicule tout terrain, etc.
Vibrations mains bras	Utilisation de machine portable, etc.	
Risques transversaux	Activité physique	Manutentions manuelles, port de charge, gestes répétitifs, postures contraignantes, etc.
	Equipements de travail	Utilisation d'outils, de machines, etc. → blessures, coupures, etc.
	Chute de plain pied	Sol inégal, encombré, glissant, etc.
	Circulation sur le chantier	Mauvaise visibilité, vitesse excessive, zone de manoeuvre exigüe, etc. → heurt, collision, etc.
	Incendie, Explosion	Vapeurs inflammables + source d'ignition, etc.
	Electricité	Câble détérioré, etc.

1.2. CARACTERISATION ET QUANTIFICATION DES NIVEAUX D'EXPOSITION

Une qualification de l'ensemble des expositions des travailleurs aux risques spécifiques à l'activité de désherbage a été réalisée (pas d'exposition, exposition possible, exposition certaine).

Lorsqu'une exposition était qualifiée de possible ou certaine, des recherches bibliographiques ont été entreprises pour caractériser et quantifier ces expositions.

Ces recherches ont porté sur les études d'exposition aux facteurs de risque réalisées lors de l'utilisation de véhicules et d'appareils comparables à ceux étudiés dans le projet Compamed Santé.

Les données sont issues de la littérature scientifique et de bases de recherche. Elles ont été sélectionnées selon leur fiabilité et leur cohérence avec les matériels investigués. Certaines données sont issues de campagnes de mesurages effectuées par une collectivité, ces résultats sont précisés à titre indicatif.

Pour les matériels de désherbage qui ne disposaient d'aucune donnée exploitable dans la littérature, des mesurages ont été envisagés à chaque fois que cela a été possible selon le parc d'appareils disponibles auprès de nos partenaires.

1.3. STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE ET PROTOCOLES DE MESURAGES

La réalisation de mesurage n'étant pas possible pour chaque facteur de risque et pour chaque matériel de désherbage pour des raisons budgétaires, certains facteurs de risque ont été privilégiés.

Les facteurs de risque ciblés pour la réalisation de mesurage étaient : le bruit, les vibrations corps entier, les vibrations mains-bras, les poussières réputées sans effet spécifique et le glyphosate (désherbant chimique).

Lorsque l'exposition au facteur de risque n'était pas certaine, c'est le cas des poussières réputées sans effet spécifique, des mesurages à titre exploratoire ont été réalisés dans des conditions d'exposition élevée.

Il n'a pas été retenu, dans le cadre de l'étude, de réaliser des mesurages des expositions des travailleurs aux émissions des moteurs thermiques, mais plutôt de compiler un ensemble de données déjà existantes.

Les protocoles de mesurages ont été élaborés à partir de recherches bibliographiques.

1.4. TRAITEMENT DES RESULTATS

L'objectif était de réaliser une évaluation comparative. La notion de comparaison fait référence à la comparaison d'un même risque entre les différentes méthodes de désherbage à savoir : le bruit, les vibrations corps entier, les vibrations mains-bras, les poussières réputées sans effet spécifique, les gaz d'échappement et le glyphosate.

Les résultats issus des mesurages ou de la bibliographie ont été comparés aux valeurs limites existantes en France ou à l'étranger selon différentes modalités.

Les résultats ont été traités différemment selon le facteur de risque concerné.

Traitement des résultats - agents physiques

Pour le bruit, les résultats ont été comparés à la valeur déclenchant l'action supérieure (VDA sup.); la valeur limite (VLE) prenant en compte le port de protections auditives. En ce qui concerne les vibrations corps entier et mains-bras, les résultats ont été comparés aux VLE. Cette comparaison a été effectuée en calculant le pourcentage que représente la valeur mesurée par rapport à la VDA sup. ou à la VLE.

Lorsque nous disposions d'un ensemble de valeurs mesurées sur un même matériel de désherbage (cas des vibrations), c'est la valeur maximale qui a été prise en compte pour calculer le pourcentage de la VLE.

Les durées pendant lesquelles un opérateur peut travailler sans dépasser la VDA sup. pour le bruit et les VLE pour les vibrations corps entier et mains-bras ont été précisées.

Traitement des résultats - agents chimiques – poussières réputées sans effet spécifique et gaz d'échappement

Plusieurs types d'approches de traitement des résultats de mesurage d'exposition existent pour les agents chimiques afin d'établir un diagnostic de dépassement ou non de la VLE. Ces approches sont détaillées dans les fiches Métropol (INRS, fiches Métropol). Le choix de l'approche est fonction du nombre de mesurages réalisés.

L'approche probabiliste consiste à déterminer la probabilité de dépassement de la VLE en fonction d'un nombre important de données (≥ 6 mesures). Cette approche prend en compte la dispersion des données d'exposition et est donc à privilégier.

L'approche conventionnelle consiste à comparer la valeur maximale mesurée à une fraction de la VLE en fonction d'un nombre limité de données (< 6 mesures).

Selon le faible nombre de données disponibles dans l'ensemble des études investiguées et, dans un souci d'homogénéité de traitement des données entre les différentes études, c'est l'approche conventionnelle qui a été choisie pour traiter l'ensemble des résultats. Cette approche est construite selon un certain nombre d'hypothèses statistiques sur la courbe de distribution des valeurs d'exposition pour tenter de prendre en compte les incertitudes environnementales inconnues (variations spatiales et temporelles de la concentration des agents) malgré le faible nombre de mesurages.

On suppose que si une valeur mesurée sur un petit échantillon est supérieure à 30% de la VLE, « la probabilité est forte qu'une mesure ultérieure dépasse la VLE » (INRS, fiche Métropol A1, 2005).

Le seuil proposé par l'INRS et le Ministère du travail pour diagnostiquer une exposition inférieure à la VLE est de 30%. Ce seuil a été établi en supposant un écart type géométrique (ETG) de 2 or, cette valeur sous-estime probablement dans certains cas l'ETG réel. Ce seuil est donc probablement théoriquement trop élevé aussi, c'est le seuil de 10% qui est retenu ici pour diagnostiquer une exposition inférieure à la VLE (INRS, fiche Métropol A3, 2008).

Le tableau 3 présente les seuils et diagnostics selon l'approche conventionnelle.

Tableau 3 : Approche conventionnelle

Seuil	Diagnostic
Si les mesures sont \leq 10% VLE	L'exposition est inférieure à la valeur limite
Si une mesure est $>$ 30% VLE	L'exposition est supérieure à la valeur limite
Autres cas	Pas de diagnostic possible, faire des mesurages supplémentaires

Pour diagnostiquer un dépassement de VLE, il suffit qu'une seule valeur de la série de mesurage soit supérieure à 30% de la VLE. C'est donc la valeur maximale mesurée qui a été prise en compte pour être comparée aux seuils.

Si les études investiguées avaient disposé d'un nombre de données suffisant, l'approche probabiliste aurait été utilisée ce qui aurait permis de fiabiliser le diagnostic de dépassement de la VLE.

Traitement des résultats - agents chimiques - glyphosate

Pour le glyphosate, les résultats ont été comparés à la valeur toxicologique de référence : l'AOEL (Acceptable Operator Exposure Level).

Cette comparaison a été effectuée en calculant le pourcentage que représente la valeur mesurée par rapport à l'AOEL.

Lorsque nous disposons d'un ensemble de valeurs mesurées sur un même matériel de désherbage, c'est la valeur maximale qui a été prise en compte pour calculer le pourcentage de l'AOEL.

1.5. PRECONISATIONS

Les préconisations ont été élaborées selon l'observation des situations de travail, les échanges avec les professionnels et les recherches bibliographiques.

Elles sont classées selon 3 catégories :

- Préconisations techniques
- Préconisations organisationnelles
- Préconisations concernant les individus

Ces préconisations ne sont pas exhaustives mais pourront servir de guide pour mettre en place une démarche de prévention des risques. Elles sont à adapter en fonction des situations de travail réelles rencontrées par chaque structure.

1.6. LIVRABLES OPERATIONNELS

Les livrables opérationnels sont constitués de fiches concernant les risques associés aux différentes techniques de désherbage. Les professionnels issus de services des espaces verts des collectivités et d'entreprises du paysage, ainsi que des institutionnels dont les financeurs du projet, ont participé à la validation de ces livrables.

2. LE BRUIT

2.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Certains matériels de désherbage sont sources de bruit de par la façon dont ils sont mis en œuvre (par un tracteur, utilitaire, etc.) ou de par la technique utilisée (brossage, flamme, etc.). Le but, ici, de la caractérisation de l'exposition au bruit est de pouvoir donner des ordres de grandeur de ce que peut être l'exposition des travailleurs au bruit lors de l'utilisation de certaines mises en œuvre et/ou techniques.

Les résultats sont issus de mesurages normalisés réalisés sur le terrain en conditions réelles et d'articles scientifiques, de bases de données et de guides normalisés.

2.2. DEFINITION DU BRUIT

Un son est une variation de pression qui se propage dans l'air. Cette onde acoustique est perceptible par l'oreille. Le bruit se caractérise par son niveau en décibels (dB) et sa fréquence en Hertz (Hz).

La sensibilité de l'oreille au bruit varie selon le niveau et la fréquence. Pour prendre en compte cet effet, il existe différentes courbes de pondération notamment de type « A » pour les niveaux de bruit courants et « C » pour les niveaux élevés. Selon la courbe utilisée, le bruit sera exprimé en dB(A) ou en dB(C) (INRS, TJ16, 2007).

Le spectre des bruits considérés audibles pour un être humain se situe entre 20 Hz et 20 kHz. L'oreille est plus sensible aux fréquences entre 1000 et 5000 Hz, particulièrement à 4000 Hz (Aybek et al., 2009). Lorsque le spectre est inférieur à 20 Hz, il s'agit d'infrasons qui s'expriment en dB(G). Ceux-ci peuvent être perçus par d'autres voies que le système auditif (INRS, TJ16, 2007).

2.3. EFFETS SANITAIRES DE L'EXPOSITION AU BRUIT

Le bruit peut altérer la santé et affecter le comportement du travailleur. Des effets sanitaires sont possibles selon la durée d'exposition et le niveau de bruit tels que des maux de tête, vertiges et nausées.

Les traumatismes et pertes auditives peuvent se produire suite une exposition à un niveau élevé de bruit durant un temps bref ou à une exposition sur la durée à un certain niveau de bruit.

L'exposition au bruit peut engendrer des problèmes de sommeil, de la fatigue et de la nervosité.

Une étude de Sabanci et Uz en 1984 (cité par Aybek et al., 2009) a démontré que des niveaux de bruit de 90 dB(A) pouvaient provoquer l'augmentation de la pression sanguine, l'accélération des battements cardiaques et de la respiration ainsi qu'une tension musculaire. L'exposition à des niveaux élevés de bruit peut induire des effets sur le fœtus d'où l'importance d'une surveillance médicale renforcée pour les femmes enceintes (Bilski, 2012).

Des effets spécifiques dû à l'exposition à des infrasons de faibles niveaux ont été relatés tels que : fatigue, nervosité, stress, dépression, maux de tête et nausées. Ces effets seraient dus à la mise en vibration de certains organes internes (digestifs, cardio-vasculaires, respiratoires, globes oculaires, etc.)(INRS, ND2250, 2006). Une diminution de l'acuité, du champ visuel et des troubles de la vigilance ont été rapportés. Le temps de réaction est plus long de 30 à 40% à un niveau de pression acoustique de 115-120 dB(G) et à une fréquence comprise entre 2 et 20Hz (Bilski, 2012).

Les résultats de certaines recherches présentées ci-dessous montrent que l'exposition au bruit peut avoir une influence sur le comportement de l'opérateur.

Une baisse de concentration est possible et peut engendrer de la négligence, une augmentation des erreurs et ainsi affecter la performance. L'opérateur peut éprouver des difficultés à analyser des informations complexes et à gérer des événements inhabituels. Une étude de Noweir en 1984 (cité par Aybek et al., 2009) a démontré que des personnes exposées à des niveaux de bruit entre 90-99 dB(A) étaient moins efficaces, moins disciplinées et moins assidues.

De plus, le conducteur d'un véhicule bruyant a une perception limitée des signaux externes (klaxon, bruits d'alarme, cris, etc.) ce qui peut potentiellement augmenter les risques d'accidents.

Enfin, la communication (physique ou par téléphone) et la compréhension d'informations avec d'autres individus ne sont pas aisées dans un environnement bruyant et peuvent engendrer des erreurs et des accidents (Bilski, 2012).

2.4. PARAMETRES PHYSIQUES MESURES

Les paramètres mesurés représentent la dose de bruit reçue pendant une période de référence et le niveau sonore instantané maximum.

Ces paramètres sont notés avec la codification suivante :

- la lettre L signifie niveau (level),
- l'indice Ex signifie exposition,
- l'indice C signifie crête.

L'exposition est caractérisée selon :

- le niveau d'exposition quotidienne au bruit noté $L_{EX,8h}$ en dB(A) représentant la «dose journalière» de bruit reçue durant 8 heures de travail,
- le niveau de pression acoustique de crête noté L_{PC} en dB(C) indiquant le niveau maximal instantané du bruit pendant une période de mesure donnée.

Ces niveaux sont comparables aux valeurs limites réglementaires.

2.5. VALEURS REGLEMENTAIRES

Les valeurs limites d'exposition (VLE) sont un niveau d'exposition quotidienne au bruit de 87 dB(A) ou un niveau de pression acoustique de crête de 140 dB(C) avec prise en compte de l'atténuation assurée par les protecteurs auditifs individuels portés par le travailleur (Décret n° 2006-892 du 19 juillet 2006).

Les valeurs d'exposition supérieures déclenchant l'action de prévention sont un niveau d'exposition quotidienne au bruit de 85 dB(A) ou un niveau de pression acoustique de crête de 137 dB(C).

Les valeurs d'exposition inférieures déclenchant l'action de prévention sont un niveau d'exposition quotidienne au bruit de 80 dB(A) ou un niveau de pression acoustique de crête de 135 dB(C).

Des actions sont imposées par le décret n° 2006-892 du 19 juillet 2006 en fonction des niveaux de bruit. En effet, il est nécessaire de mettre à disposition des salariés des protecteurs auditifs appropriés et adaptés à partir du seuil de 80 dB(A) / 135 dB(C), le port est obligatoire à partir du seuil de 85 dB(A) / 137 dB(C) au-delà de 87 dB(A) / 140 dB(C) des actions spécifiques doivent immédiatement être engagées par l'employeur pour réduire l'exposition à un niveau inférieur à la VLE.

Il n'y a pas de valeurs limites françaises pour les infrasons, cependant une étude de Pawlaczyk-Luszczynska et al. en 2000 (cité par l'INRS, ND2250, 2006) préconise une valeur maximale sur 8h de 102 dB(G).

2.6. MATERIEL ET METHODE

Les données sont issues de recherches bibliographiques et de mesurages.

Les mesurages ont été réalisés selon la norme NF S 31-084.

La stratégie de mesurage choisie est une approche par tâche (*versus* métier ou journée entière). En effet, cette méthode est recommandée pour des postes de travail dont la localisation est multiple et dont le nombre de tâches est réduit. Durant la tâche, le niveau de bruit doit être constant et représentatif (INRS, ED 60035, 2009).

Au moins cinq mesurages d'une durée minimale de 5 min ont été effectués durant l'utilisation de chaque appareil de désherbage étudié (5 mesurages par tâche).

Le matériel de mesure a été calibré avant la réalisation des mesurages (calibrateur 01dB Cal 21). L'appareil utilisé était un exposimètre dont le microphone était fixé sur le col du vêtement du travailleur à proximité de l'oreille (exposimètre classe 2 01dB WED007). L'incertitude de mesure liée à l'appareil est de 1.5 dB(A).

Le niveau de bruit mesuré durant la tâche permet de calculer l'exposition quotidienne au bruit de l'opérateur selon la durée de la tâche. C'est l'exposition sur 8 heures, additionnée de la valeur de l'incertitude globale (U) qui est à comparer aux valeurs réglementaires.

2.7. TRAITEMENT DES RESULTATS

Ce sont les valeurs d'exposition supérieures déclenchant l'action de prévention 85 dB(A) et 135 dB(C) qui ont été prises en compte pour interpréter les résultats car, les valeurs limites 87 dB(A) et 140 dB(C) sont fixées en prenant en compte l'atténuation assurée par les protecteurs auditifs.

La méthode des points (INRS, ED 60035, 2009) a été utilisée car elle permet de déterminer à partir du niveau de bruit, les durées quotidiennes des tâches à respecter pour ne pas exposer le salarié à des niveaux de bruit au-dessus des valeurs seuils.

Lorsque des niveaux d'exposition quotidienne de bruit ont pu être déterminés, la durée d'utilisation maximale avant le dépassement de la valeur d'exposition supérieure déclenchant l'action de prévention a été indiquée dans le tableau 5.

2.8. RESULTATS MATERIELS DE DESHERBAGE

Pour rappel, les valeurs seuils sont indiquées dans le tableau 4.

Tableau 4 : Valeurs réglementaires françaises - bruit

Type de valeur	Abréviation	Seuil dB(A)	Seuil dB(C)
Valeur limite d'exposition avec protecteurs	VLE	87	140
Valeur d'exposition supérieure déclenchant l'action de prévention	VDA sup.	85	137
Valeur d'exposition inférieure déclenchant l'action de prévention	VDA inf.	80	135

Le tableau 5 présente les niveaux d'exposition quotidien au bruit en fonction du matériel.

Tableau 5 : Niveau de bruit en fonction du matériel - comparaison aux valeurs d'exposition supérieures déclenchant l'action de prévention

Technique	Type Référence du matériel	Réglages	Type de sol	Distance travailleur/ machine	Nombre de mesures	Niveau d'exposition quotidienne au bruit L _{Ex,8h} dB(A)	VDA sup. 8h dB(A)	% VDA sup.	Durée en heure avant dépassement VDA sup. sur une journée de 8H	Niveau de pression acoustique de crête L _{pc} dB(C)	VDA sup. dB(C)	% VDA sup.	Sources
Thermique	Air chaud Cmar DT 650 - version gaz - autotracté	Débit : max	Herbe rase humide	1m	1	90,5	85	106	≥ 2h	121	137	88	Mesurage Cnam - IHIE (2014)
	Mono flamme Herbio gaz junior city porté Rabaud	Débit : max	Herbe sèche haute	1m	1	84,0	85	99	> 8h	115	137	84	Mesurage Cnam - IHIE (2014)
	Multi flammes Herbio gaz 5 flammes Rabaud	Débit : 15 bar	Gravier	1m	1	87,0	85	102	≥ 4h	115	137	84	Mesurage Cnam - IHIE (2014)
	Vapeur Aquacide ECO355	Température eau : 100°C	Herbe sèche haute	de 2 à 10m	1	80,5	85	95	> 8h	114	137	83	Mesurage Cnam - IHIE (2014)
Mécanique	Rateau bunker Toro Sawd Pro 5040	30 km/h	Gravier	<1m	1	90,0	85	106	≥ 2h	121	137	88	Mesurage Cnam - IHIE (2014)
	Bineuse sarcleuse électrique Pellenc Cultivon	Vitesse 1 : minimale (800 coups/min)	Terre humide	<1m	1	79,0	85	93	> 8h	114	137	83	Mesurage Cnam - IHIE (2014)
	Balayeuse -ramasseuse NC ¹		NC ¹			83,0 ²	85			-			SuvaPro - Suisse (2014)
	Débroussailluse NC ¹		NC ¹			95,0 ²	85			-			SuvaPro - Suisse (2014)
Nettoyage	Soufflette à air comprimé NC ¹		NC ¹			100-105 ³	85			-			Inrs - ED6035 (2009)

¹ NC : non connu

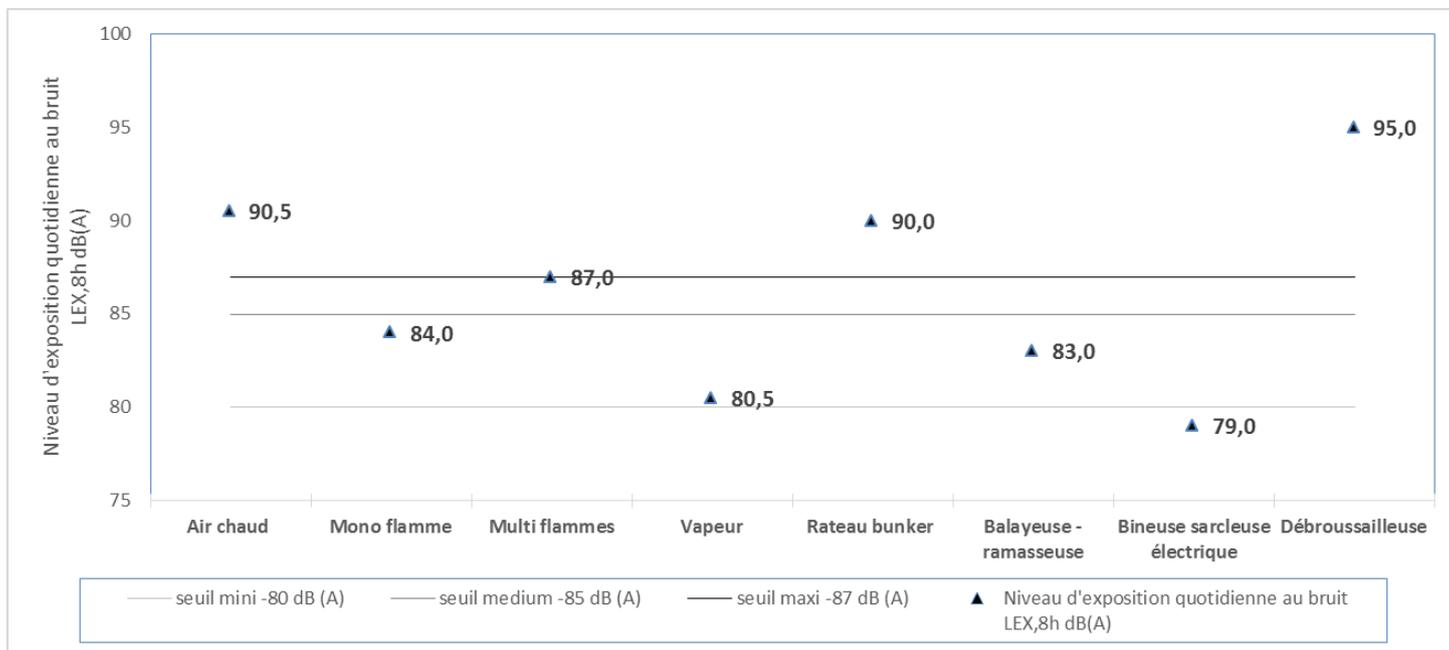
² Niveau de bruit au poste de travail (Leq dB(A))

³ Niveau de bruit sur une durée d'intégration T d'environ une minute (Lp,A,eqT dB(A))

Sur l'ensemble des mesurages réalisés le niveau de pression acoustique de crête est inférieur à 135 dB(C) (VDA inf.).

La figure 1 présente les niveaux d'exposition quotidien au bruit en fonction du matériel.

Figure 1 : Niveaux de bruit en fonction du matériel - comparaison aux valeurs réglementaires



L'ensemble des matériels étudiés présente des niveaux de bruit relativement importants (supérieur à la VDA inf. de 80 dB(A)) nécessitant la mise en place d'actions de prévention. Seule la bineuse sarcleuse électrique a un niveau inférieur à 80 dB(A). Ce résultat illustre le fait que les moteurs électriques sont moins bruyants que les moteurs thermiques.

Plusieurs matériels engendrent des niveaux de bruit supérieurs à 85 dB(A) imposant le port de protections auditives lors de leur usage.

Les appareils à air chaud et multi flamme génèrent des niveaux de bruit importants, de la même façon que les engins et appareils à moteur thermique (râteau bunker et débroussailleuse).

Pour les appareils mono et multi flamme, le débit de gaz et le nombre de brûleurs en fonctionnement semblent influencer le niveau de bruit.

Ces interprétations se basent sur un nombre de données limitées et mériteraient d'être complétées par une nouvelle campagne de mesurage pour chaque situation de travail.

Enfin, le nettoyage avec une soufflette à air comprimé est fortement générateur de bruit et doit être évité.

2.8.1. Résultats tracteurs

Des niveaux de bruit issus de la littérature sont précisés ici (tableau 6) pour donner un ordre d'idée de l'exposition des travailleurs lors de l'usage de tracteurs durant les opérations de désherbage.

Tableau 6 : Niveaux de bruit de différents tracteurs

Secteur Pays	Nombre de tracteurs Caractéristiques	Équipement / Tâche	Niveau de bruit dB(A)			Sources
			Minimum	Moyen	Maximum	
Agriculture Italie	60 tracteurs anciens et usagés de <45 kw à >75 kw	Sans cabine ou cabine non d'origine travail dans une ferme tracteurs au ralenti et se déplaçant à vitesse réduite	-	91-95	> 100	Pessina <i>et al.</i> (1999)
		Cabine d'origine (silencieuse) travail dans une ferme tracteurs au ralenti	72	84.0	90	
Agriculture Turquie	3 tracteurs (1 de 1988, 2 de 2001) de 44 à 70 kW	Tracteurs sans cabine différents équipements adaptés sur les tracteurs	-	89.81 ± 0.59	-	Aybek <i>et al.</i> (2009)
		Tracteurs avec cabine d'origine différents équipements adaptés sur les tracteurs	-	86.7 ± 0.30	-	
Agriculture Pologne	32 tracteurs modernes avec cabines utilisés depuis moins de 4 ans de 51 kW à 228 kW	Tracteurs avec cabine d'origine à l'extérieur (mesurage à 1 m du front du tracteur) avec moteur au ralenti pas d'exposition à d'autres sources de bruit	79	82	86	Bilski (2012)
		Tracteurs avec cabine d'origine à l'intérieur et à l'extérieur (mesurage à 1 m du front du tracteur)	62,3	-	84,7	
		en conditions normales de travail (cabine fermée)	83,8 ¹	-	111,4 ¹	

¹ Niveau d'infrasons en dB(G)

Ces données mettent en évidence la grande variabilité des niveaux d'exposition au bruit lors de l'usage d'un tracteur.

Les tracteurs présentent des niveaux de bruit qui diffèrent selon la présence ou non de cabine et les modalités d'utilisation (type d'équipements attelés, moteur au ralenti, etc.). La fourchette des niveaux de bruit varie de 62,3 dB(A) à des niveaux supérieurs à 100 dB(A). Les niveaux les plus bas sont observés avec les tracteurs modernes équipés de cabine d'origine.

En ce qui concerne les infrasons, les résultats pour des tracteurs modernes avec cabine varient de 83.8 à 111.4 dB(G). La valeur limite préconisée est de 102 dB(G), (Pawlaczyk-Luszczynska et al., 2000 cité par l'INRS, ND2250, 2006), on constate donc que dans certains cas la VLE est dépassée. L'exposition aux infrasons augmenterait significativement lorsque le tracteur se déplace (Bilski, 2012).

2.9. INTERPRETATION DES RESULTATS

Dans le cas de certains matériels de désherbage (notamment ceux équipés d'un moteur), il peut y avoir co-exposition bruit et vibrations. Il est dans ce cas préconisé un abaissement des seuils d'actions de 5 dB(A), tout en s'assurant du respect des valeurs limites d'exposition aux vibrations (directive 2002/44/CE) (Commission européenne, guide bruit sur le lieu de travail, 2009).

On notera que lors de la réalisation d'opérations de désherbage, les opérateurs peuvent aussi être exposés à d'autres sources de bruit notamment le bruit issu du trafic routier à proximité.

2.10. PRECONISATIONS GENERALES

Pour les appareils déjà en usage ou les futures acquisitions, il existe différentes préconisations :

2.10.1. Préconisations Organisationnelles

Il s'agit de réduire la durée d'exposition au bruit en organisant la répartition des tâches et en planifiant des rotations de poste pour éviter d'exposer toujours les mêmes salariés. Lorsqu'un véhicule est utilisé durant l'opération de désherbage (ex : tracteur, utilitaire, etc.), il faut couper le moteur dès que cela est possible.

Lorsque plusieurs opérateurs travaillent simultanément sur la même zone avec des engins et appareils bruyants, le niveau de bruit augmente (pour rappel les dB ne s'additionnent pas mais se combinent, par exemple, le niveau global résultant de deux sources sonores de 80 dB est 83 dB). Il faut donc éviter de travailler à plusieurs sur le même espace. Si cela est impossible, il est nécessaire de maintenir une distance minimale de quinze mètres entre les travailleurs pour éviter la combinaison des niveaux de bruit (Mallick et al., 2009).

Il est nécessaire d'assurer un entretien régulier et une bonne maintenance des équipements. Afin d'évaluer les risques et de vérifier l'efficacité des dispositifs réduisant le bruit (cabine, silencieux, etc.) il est important de réaliser régulièrement des campagnes de mesurages.

2.10.2. Préconisations concernant les individus

Il est important de former le personnel au risque bruit et aux mesures de prévention qui permettront de réduire leur exposition. Il est nécessaire de former les techniciens de maintenance au contrôle, à la maintenance et au remplacement des dispositifs influençant l'exposition au bruit.

2.10.3. Préconisations Techniques

Il existe différents dispositifs techniques sur un équipement qui peuvent réduire la transmission et la propagation du bruit. La présence de ces éléments est à vérifier lors du choix d'un nouvel équipement. Il peut aussi être envisagé de modifier l'appareil après achat en rajoutant les dispositifs adéquats. Ces interventions doivent être réalisées par le fabricant ou avec son accord par des personnes compétentes afin de maintenir en bon état les organes sécurité et la garantie de l'équipement.

Afin de réduire la transmission du bruit, il faut isoler les vibrations par des dispositifs tels que des plots anti-vibratiles, des fixations souples, des amortisseurs, des revêtements spécifiques, etc. Pour limiter la propagation aérienne du bruit, certains éléments de l'équipement peuvent être encoffrés (ex : cabine pour le tracteur, groupe motopompe d'appareil encoffré, etc.).

L'échappement de l'air étant une source importante de bruit, il est important d'acquérir des véhicules ou appareils équipés de silencieux d'échappement. Il est aussi parfois possible de rajouter ces silencieux sur les équipements déjà en usage (contacter le fabricant).

L'utilisation de la soufflette pour le nettoyage est fortement déconseillée car le niveau de bruit émis est élevé. Il est donc préférable de supprimer l'usage de la soufflette et de nettoyer par d'autres procédés comme l'aspiration. Si cette suppression est impossible, il est recommandé de remplacer la buse de soufflage par une buse plus silencieuse ou d'acquérir des soufflettes dites « silencieuses » (INRS, ED997, 2007).

Les protecteurs individuels contre le bruit (PICB) sont à utiliser en dernier recours pour respecter la valeur limite d'exposition si aucun autre moyen n'a pu être mis en place pour réduire l'exposition au bruit (directive 2003/10/CE). En moyenne, le port de protection auditive classique peut atténuer le niveau de bruit de 10 dB(A) (Pessina et al., 1999). On privilégiera cependant, les protections auditives réalisées sur mesure avec filtres sélectifs.

Les PICB doivent être sélectionnés selon plusieurs critères : la certification CE, l'atténuation indiquée, les conditions de travail, la compatibilité avec les autres EPI, le confort, etc. Des guides pour le choix de PICB existent (INRS, ED 133, 2012 et Commission européenne, guide bruit sur le lieu de travail, chapitre 5, 2009).

2.10.4. **Choix d'un nouvel équipement**

Il faut systématiquement privilégier les équipements électriques aux engins ou appareils à moteurs thermiques.

Le guide de la commission européenne recense les différents éléments à prendre en compte lors de l'achat d'un équipement de travail (Commission européenne, guide bruit sur le lieu de travail, chapitre 6, 2009).

Il est utile de demander au fabricant le prêt de la machine avant son achat pour la tester en conditions réelles avec l'ensemble des opérateurs concernés pour vérifier son adéquation.

La directive 2000/14/CE présente les normes et codes d'essais sur les émissions sonores des matériels destinés à être utilisés à l'extérieur (débroussailleuse, balayeuse, etc.). La standardisation des méthodes de mesurages des émissions sonores par famille de machine (normes et codes d'essai) a pour objectif de permettre la comparaison des valeurs d'émissions de bruit de machines entre elles.

Selon les exigences de la directive 2006/42/CE, les fabricants de machines sont tenus de fournir des valeurs d'émission de bruit aérien. Ces valeurs doivent être indiquées dans la déclaration d'émissions sonores et dans la notice d'instruction. Les conditions de fonctionnement de la machine et la méthode utilisée durant les mesurages doivent être mentionnées.

Ces valeurs caractérisent les émissions sonores de la machine déterminées en champs libre (indépendantes de l'environnement). Elles ne sont pas comparables aux valeurs limites d'exposition professionnelles au bruit (directive 2003/10/CE).

Avant l'achat d'un nouvel équipement, il est donc important de demander aux différents fournisseurs la déclaration d'émissions sonores basée sur les normes européennes pour comparer les valeurs et choisir le matériel le plus silencieux.

Il existe certaines bases de données qui répertorient les valeurs d'émissions sonores par machine notamment le site internet « Europa » (http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/mechanical/noise-outdoor-equipment/database/index_en.htm).

L'obligation de fournir les valeurs caractérisant les émissions sonores de la machine n'est pas encore appliquée par l'ensemble des fabricants et il se pose parfois la question de leur traçabilité et de leur crédibilité (INRS, projet Nomad, NS296, 2012). Le projet Nomad (INRS, NS296, 2012) indique des recommandations pour améliorer cette situation et ainsi favoriser le respect des exigences de la directive 2006/42/CE.

2.11. PRECONISATIONS SPECIFIQUES

2.11.1. Tracteur

Afin de réduire le niveau de bruit pour les conducteurs de tracteurs, il s'agit d'acquérir des modèles avec une cabine insonorisée d'origine. Sinon, il peut être rajouté une cabine sur un tracteur déjà en usage. La cabine permettra de réduire le niveau de bruit mais aussi protégera l'opérateur de la poussière, du soleil, des intempéries, etc.

Une cabine d'origine a un impact majeur sur la diminution des niveaux de bruit comparé à une cabine rajoutée qui est tout de même préférable à un tracteur sans cabine. En effet, à la fréquence de 4000 Hz les niveaux de pression sont réduits de 4–18 dB(A) avec une cabine d'origine et de 2–13 dB(A) avec une cabine rajoutée (Aybek et al., 2009).

Une étude de 1995 (Febo et al., 1995, cité par Dewangan et al., 2005) montre que le niveau de bruit d'un ancien tracteur comparé à un modèle récent est toujours supérieur de 1–3 dB(A).

Les tracteurs émettent des infrasons. Une étude de Bilski réalisée sur 32 tracteurs récents indique des résultats allant de 83.8 à 111.4 dB(G) à l'intérieur et à l'extérieur de la cabine. La valeur limite préconisée sur 8 heures est de 102 dB(G) (Pawlaczyk-Luszczynska et al., 2000 cité par l'INRS, ND2250, 2006). Les infrasons sont perçus par d'autres voies que le système auditif, de ce fait, les mesures de protection habituelles contre le bruit telles que les matériaux isolants, absorbants ou les PICB sont peu adaptées à cette gamme de fréquence.

Les mesures à envisager porteront sur la mise en place de dispositif technique réduisant le niveau de bruit à la source (INRS, ND2250, 2006).

Aussi, il serait bénéfique de tester le niveau d'infrason engendré par ce type de véhicule avant leur commercialisation en respectant des méthodes de mesurages standards (Bilski, 2012).

3. LES VIBRATIONS CORPS ENTIER ET MAINS-BRAS

3.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Certains matériels de désherbage engendrent des vibrations corps entier et mains-bras. Le but, ici, de la caractérisation de l'exposition est de pouvoir donner des ordres de grandeur de ce que peut être l'exposition des travailleurs à ces vibrations lors de l'utilisation de certaines mises en œuvre ou techniques.

Les résultats sont issus de mesurages normalisés réalisés sur le terrain en conditions réelles et de différentes bases de données.

3.2. DEFINITION DES VIBRATIONS

On différencie les vibrations transmises à l'ensemble du corps de celles transmises aux membres supérieurs.

Les secousses transmises par les véhicules en mouvement engendrent des vibrations corps entier et des vibrations mains-bras au niveau du volant. Les machines à moteur tenues ou guidées à la main peuvent engendrer une exposition aux vibrations mains-bras (ou membres supérieurs).

Une vibration se caractérise par son amplitude et sa fréquence.

L'accélération de la vibration s'exprime en mètres par seconde au carré (m/s^2) et se mesure sur les 3 axes (x : longitudinal, y : transversal, z : vertical).

3.3. PARAMETRES PHYSIQUES MESURES

La grandeur mesurée pour représenter les vibrations est l'accélération efficace pondérée en fréquence sur chaque axe. Pour tenir compte de la réponse du corps humain à l'excitation vibratoire, on utilise une pondération fréquentielle (symbolisée w).

Pour évaluer les risques sur la santé, l'accélération efficace pondérée en fréquence de chaque axe est multipliée par un facteur multiplicatif ($1,4a_{wx}$, $1,4a_{wy}$ ou $1 a_{wz}$).

Pour l'évaluation de l'exposition des membres supérieurs, on calcule la racine de la somme des carrés des accélérations pondérées en fréquence sur les trois axes. Pour l'évaluation de l'exposition des vibrations corps entier, on utilise la plus grande des trois valeurs mesurées sur les axes orthogonaux.

Le conducteur est soumis à des vibrations corps entier mais aussi à des chocs. Ce phénomène se mesure par la Valeur de la Dose de Vibrations (ou VDV, *Vibration Dose Value*) qui s'exprime en mètre par seconde à la puissance 1,75 ($m/s^{1,75}$). On utilise la plus grande des trois valeurs mesurées sur les axes orthogonaux ($1,4VDV_{wx}$, $1,4VDV_{wy}$ ou $1VDV_{wz}$) pour évaluer l'exposition (Commission européenne, guide vibrations sur le lieu de travail, 2008).

3.4. EFFETS SUR LA SANTE DE L'EXPOSITION AUX VIBRATIONS CORPS ENTIER ET MAINS-BRAS

Les travailleurs utilisant des véhicules sont exposés à des chocs et des vibrations transmises à l'ensemble du corps par le siège. Ces vibrations peuvent entraîner des effets à court et long terme tels que : inconfort, tensions musculaires, douleurs lombaires, pathologies du dos, du cou et des épaules. Il a été démontré dans certaines études des effets sur le système digestif, une insuffisance veineuse et des risques pour le fœtus (INRS, ED 6018, 2012). Les postures contraignantes (position assise prolongée, torsion, etc.) adoptées par le salarié lors de la conduite ou la réalisation de manœuvres sont des facteurs aggravants.

Les travailleurs manipulant ou guidant des machines vibrantes sont exposés à des vibrations transmises aux membres supérieurs. Ces vibrations peuvent entraîner des effets à court et long terme tels que : engourdissement et picotement des doigts et des mains, troubles vasculaires engendrant le blanchissement des doigts (syndrome de Raynaud), diminution de la sensibilité tactile, de la dextérité et de la force de préhension. De plus, des lésions osseuses, articulaires, musculaires et des tendinites sont possibles. Lorsqu'une exposition mains-bras est associée à des gestes répétitifs, des postures contraignantes, une force de préhension importante et du port de charge cela peut favoriser la survenue d'un syndrome du canal carpien (Commission européenne, guide vibrations sur le lieu de travail, 2008).

3.5. VALEURS REGLEMENTAIRES

La directive 2002/44/EC du 25 juin 2002 fixe des prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux vibrations. Les exigences de cette directive européenne sont transposées dans le décret 2005-746 et dans son arrêté associé du 6 juillet 2005.

Des actions sont imposées par ce décret 2005-746 en fonction des niveaux de vibrations.

Il existe deux types de valeurs limites à savoir, la Valeur Déclenchant l'Action (VDA) et la Valeur Limite d'Exposition (VLE).

Pour les vibrations corps entier, deux méthodes d'évaluation sont possibles :

L'accélération continue équivalente, normalisée pour une journée de 8 heures en m/s^2 :

- 0,5 m/s^2 déclenche l'action de prévention et impose de contrôler les risques de vibrations globales du corps chez les travailleurs (VDA),
- 1,15 m/s^2 correspond à la valeur limite d'exposition journalière au-dessus de laquelle les travailleurs ne doivent pas être exposés (VLE).

La valeur de dose de vibration (VDV - valeur cumulative selon la durée) en $m/s^{1,75}$:

- 9,1 $m/s^{1,75}$ déclenche l'action (VDA),
- 21 $m/s^{1,75}$ correspond à la valeur limite (VLE).

Pour les vibrations mains-bras, les valeurs d'exposition journalière sont de :

- 2,5 m/s^2 , valeur déclenchant l'action de prévention (VDA),
- 5 m/s^2 , valeur correspondant à la valeur limite (VLE).

3.6. MATERIEL ET METHODE

Les données sont issues de recherches bibliographiques et de mesurages.

Les mesurages ont été réalisés selon la norme NF EN ISO 14253+A1 et ISO 5349-2 respectivement pour les vibrations corps entier et mains-bras. Seuls des mesurages d'accélération continue équivalente ont été réalisés pour caractériser le niveau de vibrations corps entier, bien qu'il eut été intéressant de mesurer la VDV.

Le mesurage des amplitudes vibratoires a été effectué par mesurage continu sur une phase d'une durée minimale de 15 min durant l'utilisation des appareils de désherbage étudiés.

Les matériels de mesure utilisés étaient une chaîne de mesure (01 dB Metravib VIB 008) et des accéléromètres triaxiaux :

- un capteur « assiette » corps complet positionné au niveau du siège, maintenu par l'opérateur assis dessus (capteur 01dB Metravib WBA 001),
- un capteur main bras positionné au niveau de la zone de préhension fixé sur la poignée par un collier serré (capteur Aptech AP 2042).

Les incertitudes de mesure intègrent les incertitudes dues à l'appareillage, à l'échantillonnage et au temps d'exposition.

Le niveau d'amplitude vibratoire est mesuré durant la tâche sur chaque axe. Il permet de calculer l'exposition quotidienne aux vibrations de l'opérateur selon la durée de la tâche.

3.7. TRAITEMENT DES RESULTATS

Il existe différents calculateurs permettant d'estimer ou de calculer l'exposition quotidienne vibratoire et de la comparer aux valeurs limites à l'aide de méthode simplifiée ou complète.

Pour estimer les niveaux d'exposition vibrations corps entier, la méthode simple (INRS, OSEV, 2012) utilise des accélérations équivalentes moyennes par famille d'engin. La méthode complète (HSE, WBV and HAV calculators) permet la saisie des résultats de mesurages (accélérations efficaces pondérées par axe) afin de déterminer les niveaux d'exposition selon la durée de la tâche. Ces calculatrices indiquent les durées quotidiennes des tâches à respecter pour ne pas exposer le salarié à des vibrations au-dessus des valeurs seuils d'action et limites.

Lorsque des niveaux d'exposition aux vibrations corps entier et mains-bras ont pu être déterminés, la durée d'utilisation maximale avant le dépassement de la valeur limite a été indiquée.

3.8. RESULTATS CORPS ENTIER

Pour rappel, les valeurs seuils sont indiquées dans le tableau 7.

Tableau 7 : Valeurs réglementaires françaises - vibrations corps entier

Type de valeur	Abréviation	Seuil m/s ²
Valeur limite d'exposition	VLE	1,15
Valeur d'exposition déclenchant l'action de prévention	VDA	0,5

Le tableau 8 présente les niveaux d'exposition aux vibrations corps entier en fonction du véhicule ou du matériel.

Tableau 8 : Niveaux d'exposition aux vibrations corps entier en fonction du véhicule ou du matériel - comparaison aux valeurs limites d'exposition

Mise en œuvre	Type Référence du matériel	Nombre de modèles de véhicules	Nombre de mesures	Valeur d'exposition quotidienne aux vibrations A(8) (m/s ²)			VLE (m/s ²)	% VLE si valeur maximale	Durée en heure avant dépassement de la VLE en fonction de la valeur maximale	Sources
				Min	Moy arithmétique	Max				
Véhicules tout terrain	Rateau bunker 30 km/h Toro Sawd Pro 5040	1	1	0,72			1,15	62,6	>8h	Mesurage Cnam - IHIE (2014)
	Microtracteurs	2	2	0,77	1,15	1,53	1,15	132,7	04:42	Mesurage Ville du Havre ¹ (2011)
	Tracteurs	5	5	1,17	1,59	2,03	1,15	176,6	02:38	Mesurage Ville du Havre ¹ (2011)
	Tracteurs (secteur agricole - pulvérisation)	7	9	0,5	0,84	1,3	1,15	113	06:15	Base de données Umea Suède
	Tracteurs agricoles	NC ²		0,55 ³	0,7 ³	0,85 ³	1,15	73,9	>8h	Formulaire vibrations Inrs
Autres véhicules	Balayeuses	6	13	0,1	0,57	1	1,15	87,0	>8h	Base de données Inail Italie
	Utilitaires à plateau	46	72	0,3	0,575	1	1,15	87	>8h	Base de données Inail Italie
	Camionnettes	6	9	0,1	0,54	1	1,15	87	>8h	Base de données Inail Italie
	Véhicules légers et voitures	NC ²		0,2	0,3	0,4	1,15	34,8	>8h	Formulaire vibrations Inrs
Porté	Débroussailleuse dorsale Stihl FR450 - 2,1 kW	1	1	1			1,15	87,0	>8h	Mesurage Ville du Havre ¹ (2011)

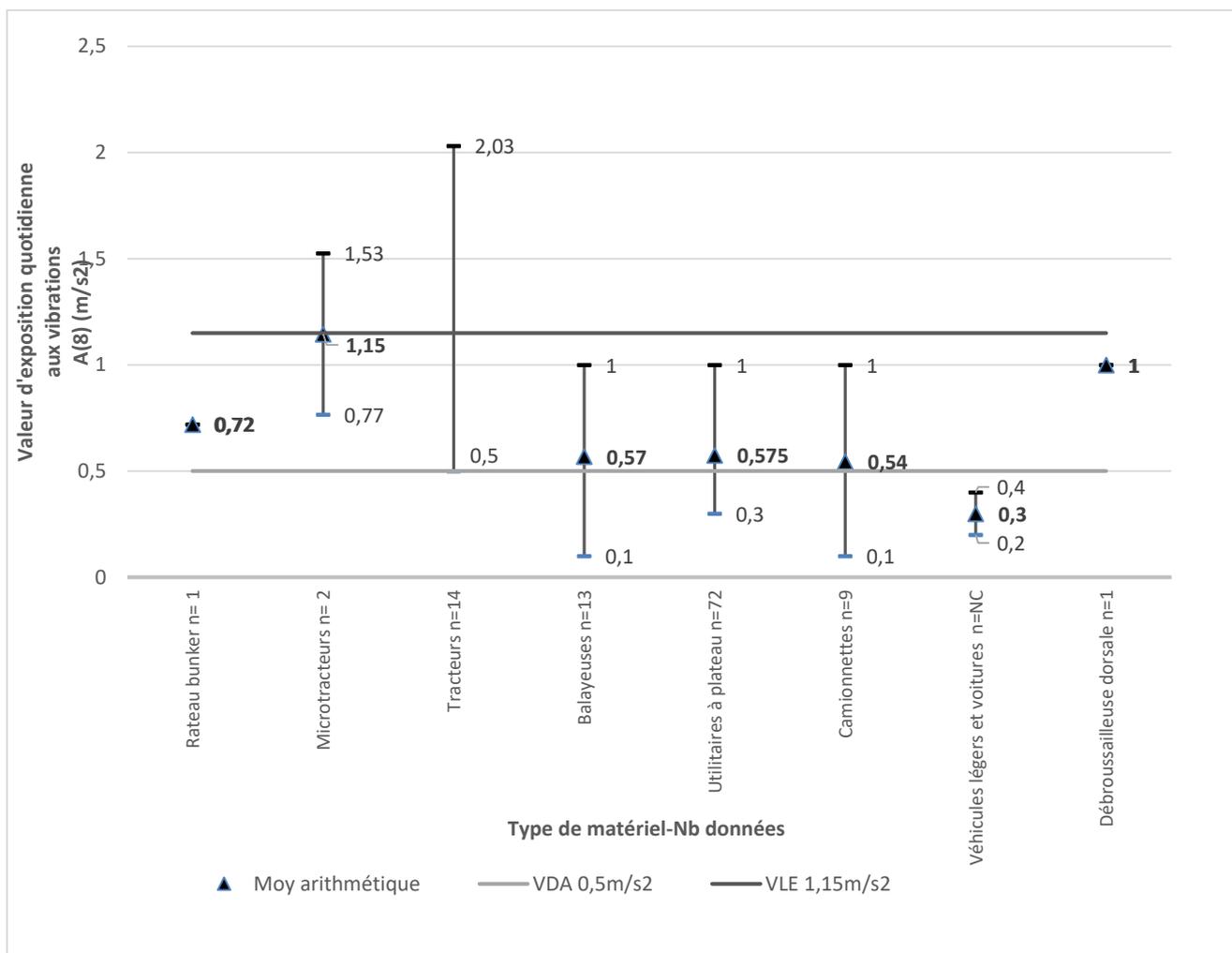
¹ Ville du Havre, mesure indicative : données non publiées

² NC : non connu

³ Valeurs indiquées selon différentes conditions : favorables, normales et sévères

La figure 2 présente les fourchettes de niveau d'exposition aux vibrations corps entier en fonction du véhicule ou du matériel.

Figure 2 : Niveaux d'exposition aux vibrations corps entier en fonction du véhicule ou du matériel - comparaison aux valeurs réglementaires



L'ensemble des véhicules et appareils étudiés génère des vibrations corps entier.

La totalité des véhicules tout terrain génère des niveaux de vibrations supérieurs ou égaux à la VDA. Ce sont les tracteurs et microtracteurs qui semblent les plus exposés pouvant conduire dans certains cas au dépassement de la VLE.

En ce qui concerne les autres types de véhicules, le niveau moyen est aux alentours de 0,5 m/s² (excepté pour les véhicules légers et les voitures), les niveaux maximums restent inférieurs à la VLE.

Il faut noter que même un équipement porté sur le dos génère des vibrations corps entier.

Cependant, le faible nombre de mesurages n'est pas suffisant pour conclure.

3.9. RESULTATS MAINS-BRAS

Pour rappel, les valeurs seuils sont indiquées dans le tableau 9.

Tableau 9 : Valeurs réglementaires françaises – vibrations mains-bras

Type de valeur	Abréviation	Seuil m/s ²
Valeur limite d'exposition	VLE	5
Valeur d'exposition déclenchant l'action de prévention	VDA	2,5

Le tableau 10 présente les niveaux d'exposition aux vibrations mains-bras en fonction du véhicule.

Tableau 10 : Niveaux d'exposition aux vibrations main bras en fonction du véhicule - comparaison aux valeurs limites d'exposition

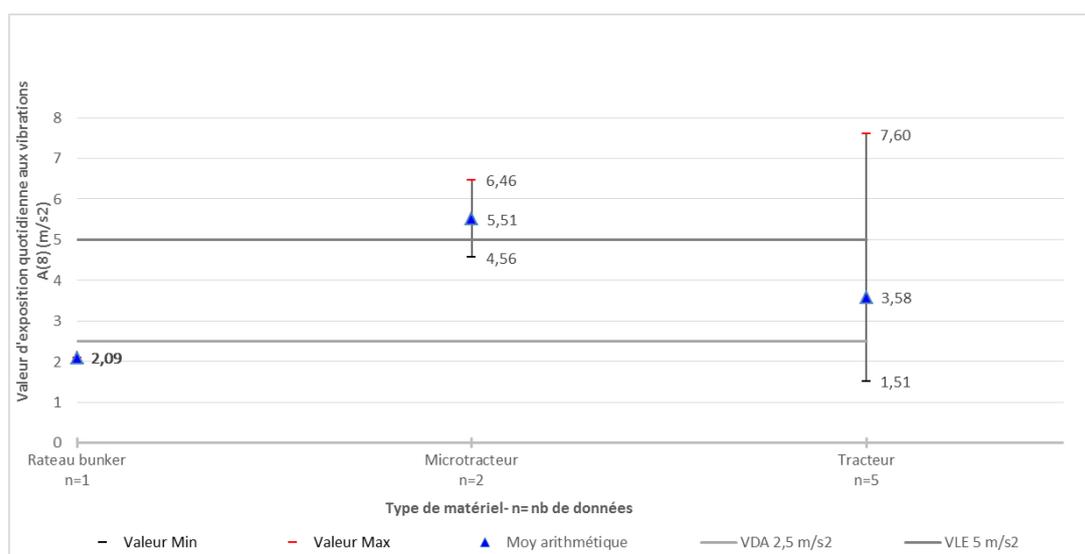
Mise en œuvre	Type Référence du matériel	Vitesse type de sol	Nombre de modèles de véhicules	Nombre de mesures	Valeur d'exposition quotidienne aux vibrations			VLE (m/s ²)	% VLE si valeur maximale	Durée en heure avant dépassement de la VLE en fonction de la valeur maximale	Sources
					Min	Moy arithmétique	Max				
Véhicules tout terrain	Râteau bunker Toro Sawd Pro 5040	30 km/h gravier	1	1	2,09			5	41,8	>8h	Mesurage Cnam - IHIE (2014)
	Microtracteur	NC ¹	2	2	4,56	5,51	6,46	5	129,3	04:47	Mesurage Ville du Havre ² (2011)
	Tracteur	NC ¹	5	5	1,51	3,58	7,60	5	152,0	03:28	Mesurage Ville du Havre ² (2011)

¹ NC : non connu

² Ville du Havre, données non publiées

La figure 3 présente les fourchettes de niveau d'exposition aux vibrations mains-bras en fonction du véhicule.

Figure 3 : Niveaux d'exposition aux vibrations main bras en fonction du véhicule - comparaison aux valeurs réglementaires



Les résultats des mesurages mains-bras confirment l'observation faite sur les tracteurs et micro tracteurs concernant les niveaux importants de vibrations corps entier. Ces engins sont manifestement plus exposants et conduisent à des dépassements de VLE. L'unique mesurage réalisé sur le râteau bunker présente une valeur inférieure à la VDA.

Cependant, le faible nombre de mesurages n'est pas suffisant pour conclure.

Le tableau 11 présente les niveaux d'exposition aux vibrations mains-bras en fonction du matériel. Des valeurs d'exposition mains-bras de tondeuse sont précisées afin d'avoir un ordre de grandeur des niveaux d'exposition pour les appareils à pousser/tirer de type Brosseuse. Les niveaux trouvés dans la littérature sur les débroussailleuses concernent la réalisation d'activités de débroussaillage et non de désherbage (avec l'ajout d'une brosse).

Tableau 11 : Niveaux d'exposition aux vibrations main bras en fonction du matériel - comparaison aux valeurs limites d'exposition

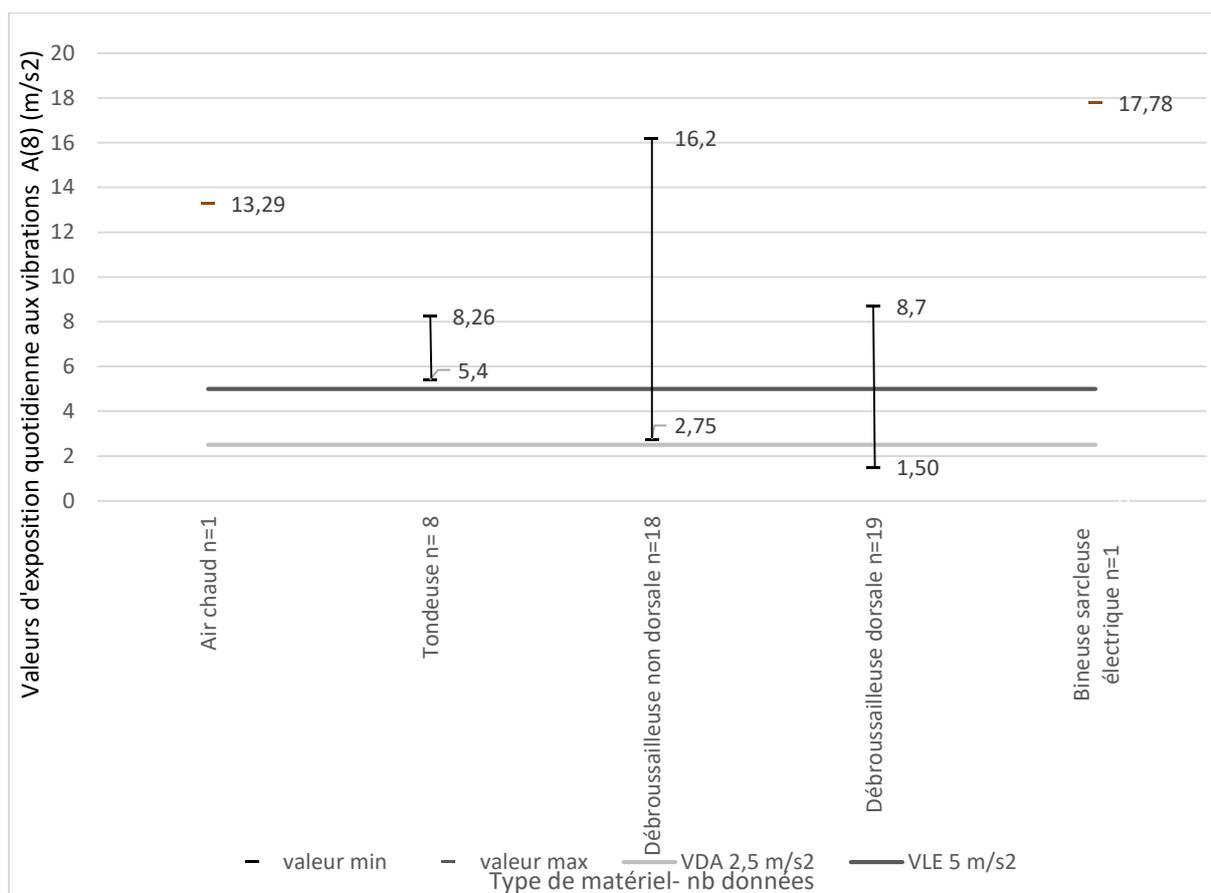
Mise en œuvre	Type de matériel	Référence du matériel réglage type de sol	Nombre de mesures	Main ou poignée ¹	Valeur d'exposition quotidienne aux vibrations A(B) (m/s ²)	VLE (m/s ²)	%VLE	Durée en heure avant dépassement de la VLE h:min	Sources
A pousser ou tirer	Air chaud	CMAR DT 650 - version gaz autotracté débit : max herbe rase humide	1	Gauche	13,29	5	266	01:08	Mesurage Cnam - IHIE (2014)
	Tondeuse	John Deere - JX90C	1	Droite	6,25	5	125	05:07	Mesurage Ville du Havre ² (2011)
			1	Gauche	8,26	5	165	02:56	Mesurage Ville du Havre ² (2011)
		Honda - HRB 536C	2	Droite	5,6	5	112	06:23	Base de données Inail Italie
		Honda - HRH 536	2	Droite	5,4	5	108	06:52	Base de données Inail Italie
		Ibea - IB 55095B	2	Centrale	7,8	5	156	03:17	Base de données Inail Italie
Porté par l'utilisateur	Débroussailleuse non dorsale	Stihl - FS 450	1	Droite	2,75	5	55	>8h	Mesurage Ville du Havre ² (2011)
			1	Gauche	3,69	5	74	>8h	Mesurage Ville du Havre ² (2011)
		Active - BIG 5,5	2	Antérieur	14	5	280	01:01	Base de données Inail Italie
		Husqvarna - RL 22	2	Postérieur	10,5	5	210	01:49	Base de données Inail Italie
		Kawasaki - Decespugliatore N.I	2	Droite	4,7	5	94	>8h	Base de données Inail Italie
		Komatsu - BC435DLM-1	2	Postérieur	9,3	5	186	02:19	Base de données Inail Italie
		Mecho - SRM250SI	2	Gauche	16,2	5	324	00:46	Base de données Inail Italie
		Oleomac - 735 S	2	Droite	8,9	5	178	02:31	Base de données Inail Italie
		Promac - 3500	2	Gauche	14	5	280	01:01	Base de données Inail Italie
	Débroussailleuse dorsale	Stihl - FR450	1	Droite	3,40	5	68	>8h	Mesurage Ville du Havre ² (2011)
			1	Gauche	4,21	5	84	>8h	Mesurage Ville du Havre ² (2011)
		Efco - 8400	2	Gauche	1,5	5	30	>8h	Base de données Inail Italie
		Alpina - VIP52	2	Postérieur	4,4	5	88	>8h	Base de données Inail Italie
			2	Antérieur	4,5	5	90	>8h	Base de données Inail Italie
		Husqvarna - 240RBD	2	Antérieur	5,5	5	110	06:37	Base de données Inail Italie
		Mitsubishi - TL43RX43	2	Postérieur	6,7	5	134	04:27	Base de données Inail Italie
			2	Antérieur	8,7	5	174	02:39	Base de données Inail Italie
		STIHL -FR450	2	Antérieur	4,7	5	94	>8h	Base de données Inail Italie
	2		Gauche	6,3	5	126	05:02	Base de données Inail Italie	
	Bineuse sarcleuse électrique	Pellenc Cultivon vitesse 1 : minimale (800 coups/min) terre humide	1	Droite	17,78	5	356	0h38	Mesurage Cnam - IHIE (2014)

¹ Lorsqu'une seule valeur est indiquée pour un appareil, c'est le cas le plus défavorable (worst case handle)

² Ville du Havre, données non publiées

Le figure 4 présente les fourchettes de niveau d'exposition aux vibrations mains-bras en fonction du matériel.

Figure 4 : Niveaux d'exposition aux vibrations main bras en fonction du matériel - comparaison aux valeurs réglementaires



La fourchette des niveaux de vibrations mains-bras des tondeuses varie de 5.4 à 8.26 m/s². La VLE est dépassée sur les 4 modèles étudiés.

La débroussailleuse non dorsale et la débroussailleuse dorsale ont respectivement des fourchettes de niveaux de 2.75 à 16.2 m/s² et de 1.5 à 8.7 m/s². La débroussailleuse non dorsale est plus exposante que la dorsale (facteur 2). La valeur déclenchant l'action de prévention (2.5 m/s²) est dépassée pour la majorité des débroussailleuses (13 modèles sur 14). La VLE est dépassée pour 10 modèles de débroussailleuse sur les 14 investigués. On ne peut conclure sur ce point car ces données sont issues de mesurages réalisés lors de débroussaillage et non d'activité de désherbage avec le rajout d'une brosse sur l'arbre de la débroussailleuse.

L'appareil à air chaud et la bineuse sarcleuse électrique présentent des niveaux très importants, au-delà de la VLE. La bineuse sarcleuse génère un niveau de vibrations main-bras supérieur à 350% de la VLE avec la vitesse minimale et un terrain humide. Le faible nombre de mesurages concernant ces appareils ne permet cependant pas de conclure.

L'ensemble des appareils étudiés, à pousser ou à porter, semblent très exposants.

3.10. PRECONISATIONS GENERALES

Pour les véhicules ou appareils déjà en usage ou les futures acquisitions, il existe différentes préconisations :

3.10.1. Préconisations Organisationnelles

Il s'agit de réduire la durée d'exposition aux vibrations en organisant la répartition des tâches et en planifiant des rotations de poste pour éviter d'exposer toujours les mêmes salariés.

Lors de la conduite de véhicule, il peut être envisagé de réduire les distances de déplacement et de limiter la vitesse selon le type de sol (nid de poule, dénivelé, etc.).

Lorsqu'un véhicule ou appareil engendrant des vibrations est utilisé durant l'opération de désherbage, il faut couper le moteur dès que cela est possible.

Il est nécessaire d'assurer un entretien régulier et une bonne maintenance des équipements.

Afin d'évaluer les risques et de vérifier l'efficacité des dispositifs réduisant les vibrations, il est important de réaliser régulièrement les campagnes de mesurages. L'efficacité des sièges peut être vérifiée en mesurant le Seat « Seat Effective Acceleration Transmissibility » qui est le rapport entre l'accélération mesurée au niveau du siège et celle mesurée sur le sol du véhicule selon l'axe Z.

3.10.2. Préconisations concernant les individus

Il est important de former le personnel au risque vibrations et aux mesures de prévention qui permettront de réduire leur exposition.

Il est nécessaire de former les techniciens de maintenance au contrôle, à la maintenance et au remplacement des dispositifs influençant l'exposition aux vibrations (suspensions, pièces de réglage des sièges, pneumatiques, poignées « anti-vibrations », etc.).

Les conducteurs doivent être formés au réglage du siège selon leur poids et taille (suspensions, position avant-arrière et hauteur du siège, inclinaison du dossier, etc.)(MSA, réf 11204, 2010). Il faut aussi insister sur le fait de limiter la vitesse selon le type de sol (nids- de-poule, etc.), d'adopter une conduite plus souple et de porter la ceinture de sécurité. En effet, le port de la ceinture permet de maintenir le conducteur correctement dans son siège en cas de fortes secousses.

Les utilisateurs d'appareils tenus ou guidés par les mains devraient être sensibilisés au fait d'utiliser la force minimale de préhension et de poussée nécessaire sur l'appareil.

3.10.3. Préconisations Techniques

Il existe différents dispositifs techniques sur un équipement qui peuvent réduire la transmission des vibrations. La présence de ces éléments est à vérifier lors du choix d'un nouvel équipement. Il peut aussi être envisagé de modifier l'appareil après achat en rajoutant les dispositifs adéquats. Ces interventions doivent être réalisées par le fabricant ou avec son accord par des personnes compétentes afin de maintenir en bon état les organes sécurité et la garantie de l'équipement.

Afin de réduire la transmission, il faut isoler les vibrations par des dispositifs tels que des plots anti-vibratiles, des fixations souples, des amortisseurs adaptés, des pneumatiques plus souples, une cabine suspendue pour réduire les basses fréquences, etc.

3.11. PRECONISATIONS SPECIFIQUES

3.11.1. Préconisations pour les véhicules

Le siège et ses suspensions doivent être adaptés au véhicule, à la tâche à effectuer et à l'ensemble des conducteurs concernés (MSA, réf 11204, 2010). L'accès aux commandes doit être aisé et n'engendrer aucun effort ni posture contraignante (élongations, force de préhension, etc.). Le réglage du siège doit pouvoir se faire facilement à chaque changement de conducteur. Des postures contraignantes (ex : torsions) peuvent parfois être adoptées par le conducteur à cause d'une mauvaise visibilité vers l'arrière. Afin de faciliter ses manœuvres, il peut être rajouté des rétroviseurs adaptés et une caméra de recul.

3.11.2. Préconisations pour appareils

Les appareils de désherbage tenus ou guidés par les mains peuvent être équipés de poignées « anti-vibrations ». Il est nécessaire d'équiper la machine exclusivement avec des poignées homologuées par le fabricant de l'appareil. En effet, des poignées inadaptées peuvent engendrer une augmentation des vibrations au niveau des mains. Il faut aussi prendre en compte la forme, le revêtement et le confort de la poignée.

Aussi, afin de protéger les mains de l'opérateur du froid, il peut être envisagé de recouvrir les éléments de préhension d'une isolation thermique adaptée. Il existe aussi certains équipements avec des poignées chauffantes.

Pour limiter les forces de préhension et de poussée, le poids de l'appareil doit être pris en compte, celui-ci peut être équipé de dispositifs facilitant son maniement et son guidage (pneumatiques tout terrain, appareil autottracté, modification du matériau de la surface de préhension, etc.). Il faut aussi s'assurer que les postures adoptées (angles poignets, bras, épaules, tronc, etc.) respectent les angles de confort de l'ensemble des salariés quelques soient leurs morphologies. On prévoira donc des dispositifs réglables par chaque opérateur (ex : hauteur de guidon réglable).

Des gants anti-vibratiles existent mais ne sont pas efficaces sur les basses fréquences. Ils doivent être complets (main et doigts), labellisés CE, conformes à la norme ISO 10819 et compatibles avec l'activité réalisée et les autres EPI.

De façon générale, afin de limiter les pathologies liées aux vibrations, il est nécessaire de réduire les autres sollicitations (efforts, port de charge, postures contraignantes, position assise prolongée, etc.).

3.11.3. Préconisations relatives au terrain

Si possible, des travaux pour améliorer la surface des sols peuvent être engagés pour éliminer les nids-de-poule et bosses qui engendrent des chocs à chaque passage.

3.11.4. Choix d'un nouvel équipement

Le guide de la commission européenne recense les différents éléments à prendre en compte lors de l'achat d'un équipement de travail (Commission européenne, guide vibrations sur le lieu de travail, chapitre 3, 2008).

Il est utile de demander au fabricant le prêt de la machine avant son achat pour la tester en conditions réelles avec l'ensemble des opérateurs concernés pour vérifier son adéquation.

Selon les exigences de la directive 2006/42/CE, les fabricants de machines sont tenus de fournir les niveaux vibratoires transmis au système main-bras et corps entier. Ces valeurs doivent être indiquées dans la déclaration de l'émission vibratoire et dans la notice d'instruction.

Les conditions de fonctionnement de la machine et la méthode utilisée durant les mesurages doivent être mentionnées. Ces valeurs ne sont pas comparables aux valeurs limites d'exposition professionnelle car elles peuvent varier selon l'environnement dans lequel la machine est utilisée.

Avant l'achat d'un nouvel équipement, il est donc important de demander aux différents fournisseurs la déclaration de l'émission vibratoire basée sur les normes européennes pour comparer les valeurs et choisir le matériel ayant l'amplitude vibratoire minimale. Il est à noter que l'homologation des sièges est obligatoire pour les tracteurs agricoles neufs.

La standardisation des méthodes de mesurages des vibrations (normes et codes d'essai) a pour objectif de permettre la comparaison des machines entre elles. Cependant, il n'existe pas encore de codes d'essai pour l'ensemble des machines existantes ; des codes existent notamment pour les chariots élévateurs. Les valeurs indiquées pour les autres machines sont donc indicatives (INRS, ED 6018, 2012).

4. LES POUSSIÈRES RÉPUTÉES SANS EFFET SPÉCIFIQUE

4.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Certains matériels de désherbage engendrent un empoussièrement de par la façon dont ils sont mis en œuvre (par exemple par un tracteur) ou de par la technique utilisée (ex : mécanique). Le but, ici, de la caractérisation de l'exposition aux poussières est de pouvoir donner des ordres de grandeur de ce que peut être l'exposition des travailleurs lors de l'utilisation de certaines mises en œuvre et/ou techniques.

Les résultats sont issus de mesurages réalisés sur le terrain en conditions réelles.

4.2. DÉFINITION DES POUSSIÈRES RECHERCHÉES ET EFFET SANITAIRE

« Les poussières sont des dispersions de particules solides dans l'atmosphère formées par un procédé mécanique ou par la remise en suspension depuis les lieux de dépôt » (INRS, ED984, 2012). Il en existe de différents types, parmi elles, les poussières réputées sans effet spécifique, c'est-à-dire qui « ne sont pas en mesure de provoquer seules sur les poumons, ou sur tout autre organe ou système du corps humain, d'autre effet que celui de surcharge » (*circulaire du ministère du travail du 9 mai 1985*).

4.3. PARAMÈTRES PHYSIQUES MESURES

La concentration en poussières en milligramme par mètre cube d'air inhalé est mesurée pour caractériser l'exposition.

Les fractions d'intérêt à prélever pour les poussières réputées sans effet spécifique sont les fractions inhalables et alvéolaires (INRS, fiche Métropol 002, 2009). La fraction inhalable est la fraction massique des particules totales en suspension dans l'air inhalé par le nez et la bouche. La fraction alvéolaire est la fraction massique des particules inhalées qui se déposent dans la région des échanges gazeux.

4.4. VALEURS RÉGLEMENTAIRES

Les valeurs réglementaires contraignantes sur une période de 8 h sont :

- fraction inhalable : 10 mg/m³ d'air
- fraction alvéolaire : 5 mg/m³ d'air

Une étude de Bazin (INRS, PR16, 2005) propose de ré-évaluer les valeurs limites datant de 1984. En effet, l'auteur précise que ces valeurs ne prennent pas en compte l'évolution des connaissances et « correspondent à des empoussièrtements considérés maintenant comme excessifs par les professionnels en matière d'hygiène (dépôts de matières pulvérulentes dans tout l'environnement du poste de travail, sur les vêtements et dans les cheveux ; vue gênée par un nuage de poussières ; gênes oculaires, nasales, et respiratoires)». Il indique aussi que « ces valeurs ne reposent sur aucune base toxicologique objective ». D'ailleurs, certains pays comme l'Allemagne ont abaissé ces valeurs depuis 1997 avec une valeur limite pour la fraction inhalable de 4 mg/m³ et de 1,5 mg/m³ pour la fraction alvéolaire.

4.5. MATERIEL, METHODE

Les données sont issues de mesurages.

Le mesurage a été effectué sur une phase d'une durée minimale de 1 h durant l'utilisation des appareils de désherbage étudiés.

Le matériel de mesure utilisé était un capteur individuel de poussière, le CIP 10 (Tecora Licence Ineris) avec un débit d'aspiration réglé à 10 l.min⁻¹. Les sélecteurs utilisés étaient le CIP 10-R (fraction alvéolaire) et le CIP 10-I (fraction inhalable).

Le principe de l'échantillonneur CIP 10 est basé sur l'aspiration d'un aérosol à travers une fente annulaire et une filtration de l'air par un filtre rotatif en mousse poreuse (Görner et al., 1990 cité par INRS, ND2327, 2010).

Les deux fractions ont été mesurées simultanément sur un même travailleur à l'aide de deux CIP 10 positionnés au niveau des voies respiratoires au moyen de baudriers.

Avant leur utilisation, les CIP 10 ont fait l'objet d'une vérification technique et d'un étalonnage.

4.6. RESULTATS

Les mesurages ont été réalisés sur une période relativement ensoleillée durant le mois de juin 2014.

Le tableau 12 présente les niveaux d'exposition aux poussières en fonction du matériel.

Tableau 12 : Niveaux d'exposition aux poussières en fonction du matériel - comparaison aux valeurs limites d'exposition (sol sable et gravillons)

Type Référence du matériel	Ville Date Plage horaire du mesurage	Plage Humidité (%) Température (°C)	Fraction	Durée du prélèvement (heure)	Concentration par prélèvement (mg/m ³)	VLE (mg/m ³)	% VLE	Seuil par rapport à la VLE	Sources
Rateau bunker Toro Sawd Pro 5040	Nantes 26 juin 2014 9h00 à 16h00	91 - 50 % 17,2 - 23,3 °C	Alvéolaire	2,4	1,4	5	28	<30% VLE	Mesurage Cnam - IHIE (2014)
			Inhalable	2,4	30,5	10	305	>100% VLE	
Microtracteur sans cabine Kubota STV40 38,3 cv équipé d'un rabot mécanique à coupoles : Irrval	Angers 18 juin 2014 8h19 à 10h30	88 - 82 % 12,3 - 13,8 °C	Alvéolaire	1,23	2	5	40	>30%	
			Inhalable	2,27	27,5	10	275	>100% VLE	

Ces résultats donnent des valeurs toutes supérieures à 10% de la VLE.

Concernant la fraction inhalable, les concentrations sont très élevées (>250% de la VLE) mettant en évidence une exposition importante. Ces résultats sont confirmés par l'observation d'un important nuage de poussières lors de l'exécution de la tâche de désherbage avec les deux matériels.

Concernant la fraction alvéolaire, l'exposition est moindre que pour la fraction inhalable. Cependant, dans le cas du microtracteur l'exposition est supérieure à 30% de la VLE laissant supposer un dépassement de la valeur limite.

Cependant, le faible nombre de mesurages effectué exclusivement durant une période relativement ensoleillée n'est pas suffisant pour conclure.

4.7. PRECONISATIONS GENERALES

Pour les véhicules ou appareils déjà en usage ou les futures acquisitions, il existe différentes préconisations :

4.7.1. Préconisations Organisationnelles

Il s'agit de réduire la durée d'exposition aux poussières en organisant la répartition des tâches et en planifiant des rotations de poste pour éviter d'exposer toujours les mêmes salariés.

Lorsque plusieurs opérateurs travaillent simultanément sur la même zone avec des engins et appareils, l'empoussièrement peut augmenter. Il faut donc éviter de travailler à plusieurs sur le même espace sinon, il est nécessaire de maintenir une distance raisonnable entre les différents travailleurs. Le conducteur veillera à maintenir fermées les portes et fenêtres pour limiter son exposition. Il réfléchira à l'avance au chemin qui sera emprunté pour ne pas faire demi-tour et être ainsi exposé au nuage de poussières qu'il aura engendré. Il peut aussi être utile de prendre en compte le sens du vent.

Pour limiter la remise en suspension des poussières lors des passages, la tâche peut être effectuée tôt le matin (rosée) ou suite à une averse pour profiter d'un sol humide. De plus, il faut limiter la vitesse de l'engin.

Il est nécessaire d'assurer un entretien régulier et une bonne maintenance des équipements. Afin d'évaluer les risques, il est important de réaliser régulièrement les campagnes de mesurages.

4.7.2. Préconisations concernant les individus

Il est important de former le personnel au risque lié aux poussières sans effet spécifique et aux mesures de prévention qui permettront de réduire leur exposition.

Il est nécessaire de former les techniciens de maintenance au contrôle, à la maintenance et au remplacement des dispositifs influençant l'exposition aux poussières.

4.7.3. Préconisations techniques

Il existe différents dispositifs techniques sur un équipement qui peuvent limiter l'empoussièrement. La présence de ces éléments est à vérifier lors du choix d'un nouvel équipement. Il peut aussi être envisagé de modifier l'appareil après achat en rajoutant les dispositifs adéquats. Ces interventions doivent être réalisées par le fabricant ou avec son accord par des personnes compétentes afin de maintenir en bon état les organes sécurité et la garantie de l'équipement.

Afin de réduire l'empoussièrement, certains matériels tels que les balayeuses sont équipés d'un dispositif d'arrosage et d'un système d'aspiration.

L'utilisation de la soufflette pour le nettoyage est fortement déconseillée car la remise en suspension des poussières est favorisée. Il est donc préférable de supprimer l'usage de la soufflette et de nettoyer par d'autres procédés comme l'aspiration.

Le port d'un demi-masque jetable à ventilation libre avec un filtre « anti-poussières » marqués P1 ou FFP1 (INRS, ED 98, 2008 et INRS, ED6106, 2011) est à préconiser en dernier recours pour respecter la valeur limite d'exposition si aucun autre moyen n'a pu être mis en place pour réduire l'exposition.

4.7.4. Choix d'un nouvel équipement

Lors de l'achat d'un nouveau véhicule ou appareil, il est utile de s'informer auprès du constructeur sur les systèmes limitant l'empoussièrement existants selon l'activité et l'environnement d'utilisation afin, d'acquérir l'équipement avec la meilleure technique disponible. Il est important de choisir un véhicule équipé de la climatisation pour éviter l'augmentation de la pollution à l'intérieur du véhicule liée aux fenêtres ouvertes.

5. LES GAZ D'ÉCHAPPEMENT

5.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Certains matériels de désherbage sont équipés de moteurs thermiques qui émettent des gaz d'échappement. Les émissions peuvent provenir de deux sources distinctes :

1 – Le moteur du véhicule tractant mis en marche durant l'opération de désherbage.

Ce moteur engendre une exposition des travailleurs aux gaz d'échappement soit :

- dans l'habitacle du véhicule, pour le travailleur qui reste au poste de conduite,
- à l'extérieur du véhicule, pour les opérateurs travaillant à proximité.

Dans le cadre de l'étude Compamed ZNA, il a été observé que le véhicule le plus couramment utilisé est un utilitaire à plateau (ou une camionnette du même gabarit) type 6t.

2 – Le moteur de l'appareil de désherbage, par exemple :

- moteur de machines portatives
- moteur de brosseuse

Le but, ici, de la caractérisation de l'exposition aux gaz d'échappement est de pouvoir donner des ordres de grandeur de ce que peut être l'exposition des travailleurs aux gaz d'échappement lors de l'utilisation de certaines mises en œuvre et/ou techniques.

Il n'a pas été retenu, dans le cadre du projet, de réaliser des mesurages des expositions des travailleurs aux émissions des moteurs thermiques, mais plutôt de compiler un ensemble de données déjà existantes. Certains appareils de désherbage fonctionnent avec des groupes motopompes ou des groupes électrogènes, aucune donnée sur les niveaux d'exposition de dispositifs similaires n'a été trouvée dans la littérature.

5.2. LES MOTEURS THERMIQUES – DEFINITION

Il existe deux types de moteurs à combustion interne qui se différencient selon le mode d'allumage de la charge combustible et le carburant utilisé :

- le moteur à allumage commandé avec carburant essence (ou gaz de pétrole liquéfié ou comprimé), une étincelle électrique enflamme le mélange air-carburant dans les cylindres,
- le moteur à allumage par compression avec carburant gazole (diesel), la température de l'air comprimé dans le cylindre provoque l'auto inflammation du mélange lors de l'injection du carburant.

5.3. LES MOTEURS DES MACHINES PORTATIVES , 2 TEMPS ET 4 TEMPS

Un moteur 2 temps est alimenté par un mélange d'essence et d'huile alors qu'un moteur 4 temps est alimenté par de l'essence. Sur les machines portatives, on trouve majoritairement des moteurs 2 temps qui polluent davantage que les moteurs 4 temps.

En effet, le moteur 2 temps brûle un mélange essence et huile et rejette beaucoup d'imbrûlés engendrant la création d'hydrocarbures polycycliques insaturés. L'huile ne brûle pas dans les moteurs 4 temps donc il y a moins de fumée.

Les moteurs essence rejettent principalement du monoxyde de carbone et des hydrocarbures.

Le tableau 13 présente certaines caractéristiques des moteurs 2 et 4 temps.

Tableau 13 : Extrait d'un tableau repris d'une présentation de l'étude de Surot et al. (2009).

Moteur 2 temps	Moteur 4 temps
Léger, maniable, insensible à l'inclinaison	Lourd, doit rester horizontal
Brûle le mélange essence et huile : rejet d'imbrûlés : création d'HAP	Brûle l'essence
Produit beaucoup de fumée	Produit peu de fumée

5.4. REGLEMENTATION DES VEHICULES ET APPAREILS

5.4.1. Réglementation des engins mobiles routiers

Les normes européennes (norme Euro) fixent les émissions maximales des polluants pour les moteurs à allumage commandé et les moteurs à allumage par compression. Les procédures d'essai sont standardisées. Les polluants réglementés sont les suivants : monoxyde carbone (CO), hydrocarbures non méthaniques et hydrocarbures totaux, oxydes d'azote (NOx) et particules (PM).

Afin de respecter ces normes les constructeurs sont contraints d'ajouter des systèmes spécifiques comme les filtres à particules, le recyclage des gaz d'échappement, l'emploi d'un additif à base d'urée, etc. Les normes évoluent afin de prendre en compte la concentration en nombre de particules émises et non plus uniquement la masse des particules.

5.4.2. Réglementation des engins mobiles non routiers EMNR

La directive 97/68/CE fixe les limites d'émissions des engins mobiles non routiers (directive EMNR).

Les engins mobiles non routiers comprennent des matériels motorisés portables ou non tels que : débroussailleuse, tondeuse, tracteur, etc.

Les niveaux admissibles des polluants réglementés des moteurs de tracteurs sont indiqués dans la directive 2000/25/CE qui reprend les valeurs limites d'émissions de la directive 97/68/CE.

Les limites d'émissions pour les moteurs (<19kW) de petits matériels portables (ex : débroussailleuse) ou non portables (ex : tondeuse) sont aussi indiquées dans les directives sur les émissions des engins mobiles non routiers.

La réglementation sur les niveaux d'émissions d'hydrocarbures devenant plus drastique en Europe, on peut s'attendre à une augmentation de la production de moteur 4 temps comparé à celle des moteurs 2 temps.

5.5. EFFETS SANITAIRES DE L'EXPOSITION AUX GAZ D'ÉCHAPPEMENT

Des irritations des yeux, des voies respiratoires supérieures ainsi que des maux de tête ou nausées peuvent être observées suite à une exposition importante aux gaz d'échappement diesel.

Les gaz d'échappement contiennent du monoxyde de carbone pouvant entraîner une intoxication aiguë dont les signes cliniques sont : maux de tête, nausée, malaise, vomissements, perte de connaissance pouvant engendrer coma et décès.

Des intoxications chroniques suite à une exposition fréquente aux gaz d'échappement sont dues entre autres, aux particules diesel qui pénètrent dans l'appareil respiratoire engendrant des irritations et infections et favorisant les mécanismes allergiques (INRS, ND 2239, 2005).

Le Centre International de Recherche contre le Cancer (CIRC) a classé les gaz d'échappement des moteurs diesel comme cancérigènes avérés pour l'Homme (Groupe 1). Le Groupe de Travail du CIRC a constaté que les gaz d'échappement des moteurs diesel provoquaient le cancer du poumon (indications suffisantes) et a également noté une association positive (indications limitées) à un risque accru de cancer de la vessie. Les gaz d'échappement des moteurs essence sont classés comme cancérigènes possibles pour l'Homme (Groupe 2B) (IARC, 2013).

L'exposition aux gaz d'échappement diesel est estimée comme l'exposition à un cancérigène la plus fréquente sur les lieux de travail en France (INRS, TF 211, 2013).

5.6. COMPOSITION DES GAZ D'ÉCHAPPEMENT DES MOTEURS DIESEL ET ESSENCE

« Les émissions provenant de ces moteurs sont complexes et leur composition chimique variable. La phase gazeuse se compose de monoxyde de carbone, d'oxyde d'azote et de composés organiques volatiles comme le benzène et le formaldéhyde. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques et les nitroarènes sont répartis entre la phase gazeuse et la phase particulaire. Les particules se composent de carbone élémentaire et organique, cendres, sulfate et métaux. » (IARC, 2013).

On distingue 2 types de particules :

Les particules primaires, émises à l'échappement des véhicules (principalement diesel).

Les particules secondaires se forment par réaction chimique dans l'atmosphère à partir des gaz précurseurs émis par les véhicules diesel et essence. Ces particules uniquement émises après l'échappement ne peuvent pas être filtrées (ADEME, 2014).

Les émissions des moteurs selon le carburant utilisé sont de nature et de concentrations différentes (tableau 14).

Tableau 14 : Ordre de grandeur des principaux polluants produits par les moteurs thermiques d'engins

Extrait d'un tableau publié par l'INRS, ND2239, 2005.

	Monoxyde de carbone (CO) (ppm ¹)	Oxydes d'azote (NO _x) (en NO) (ppm)	Dioxyde de soufre (SO ₂) (ppm)	Hydrocarbures (C _x H _y) (ppm)	Aldéhydes (R-CHO) (ppm)	Particules (mg/m ³)
Diesel	300 à 10 000	300 à 2 000	50 à 200	200 à 1 100	10 à 300	20 à 200
Essence	10 000 à 70 000	300 à 2 000	Traces	500 à 10 000	100 à 300	Faible

1 ppm : partie par million soit 1 cm³ du gaz en question dans 1 m³ d'air.

5.7. METHODE

Une revue bibliographique a été réalisée pour estimer les niveaux d'exposition aux émissions des moteurs thermiques des travailleurs de la population d'étude concernée (hors expositions de l'environnement). Les recherches bibliographiques ont porté sur les études d'exposition aux gaz d'échappement réalisées lors de l'utilisation de véhicules et d'appareils comparables à ceux étudiés dans le projet Compamed.

5.8. RESULTATS

Des données relatives à l'exposition aux gaz d'échappement sur des engins ou matériels comparables à ceux étudiés dans le projet Compamed Santé ont été trouvées dans la littérature.

Le tableau 15 précise la classification selon le règlement CLP¹ des substances quantifiées lors de ces études.

Tableau 15 : Classification des substances selon le règlement CLP

Substance	Classification selon le règlement CLP
Benzène	Cancérogénicité catégorie 1A Mutagénicité sur les cellules germinales catégorie 1B
Naphtalène	Cancérogénicité catégorie 2
Benzoapyrène	Cancérogénicité catégorie 1B Mutagénicité sur les cellules germinales catégorie 1B Toxicité pour la reproduction catégorie 1B
Dioxyde d'azote	Non classé CMR - Toxicité aiguë - H 330 Mortel par inhalation

Les résultats des mesurages sont comparés aux valeurs limites professionnelles existantes.

Il n'existe pas de valeur limite pour les particules diesel en France, de ce fait, les résultats ont été comparés à la valeur limite technique allemande (TRK) pour le carbone élémentaire. Pour le dioxyde d'azote, les résultats ont été comparés à la valeur sur 8 heures proposée par le SCOEL ; le système français n'ayant qu'une valeur limite sur 15 min.

Le tableau 16 indique le type de valeur limite selon la substance concernée.

Tableau 16 : Type de valeur limite selon la substance

Substance	Type de valeur limite - Origine
Benzène	Valeur limite réglementaire contraignante - France
Naphtalène	Valeur limite réglementaire indicative - France
Benzo[a]pyrène	Recommandation CNAM - France
Dioxyde d'azote	SCOEL (Scientific Committee on Occupational Exposure Limits) Valeur limite - Europe
Carbone élémentaire	TRK (Technische Richtkonzentrationen) Concentrations techniques de référence - Allemagne

¹ Règlement CLP (Classification, Labelling, Packaging) : règlement européen relatif à la classification et à l'étiquetage des produits.

5.8.1. Appareils de désherbage - résultats

5.8.1.1. Tondeuse essence 4 temps

L'étude de Lagneau (2010) porte sur la caractérisation du niveau d'exposition et d'imprégnation au benzène lors de l'usage d'une tondeuse marchant par un non-fumeur (le tabagisme étant également une source d'exposition au benzène).

Ces données sont indiquées afin d'avoir un ordre de grandeur des niveaux d'exposition pour les appareils à pousser/tirer de type brosseuse. En effet, les moteurs utilisés sur les tondeuses « marchant » sont comparables (carburant et puissance) aux moteurs des autres appareils à pousser. Il est à noter que depuis 2000, la teneur en benzène de l'essence ne doit pas dépasser 1% du volume (directive 1998/70/CE).

Le dosage de l'acide trans, trans-muconique (t,t-MA, métabolite du benzène), dans les urines en fin de poste est un bon indicateur de l'exposition au benzène pour des concentrations atmosphériques supérieures à 0.1 ppm.

Pour des expositions inférieures à ce seuil (cas de l'étude) ce n'est pas le marqueur à privilégier car il manque de spécificité et de sensibilité. En effet, l'acide sorbique (additif alimentaire, conservateur de produits cosmétique et pharmaceutique) est aussi métabolisé en t,t-MA et peut donc interférer en augmentant la concentration de t,t-MA.

La valeur de référence pour le t,t-MA est de 1.2 mg/L d'urine (0.9 mg/g de créatinine) correspondant à la VLE de 1 ppm (3.25 mg/m³) édictée pour les concentrations atmosphériques.

Le dosage du benzène dans les urines en fin de poste est un bon indicateur de l'exposition au benzène même pour des expositions faibles (INRS, fiche biotox du benzène, 2014).

Le tableau 17 présente les niveaux d'exposition au benzène lors de l'usage d'une tondeuse.

Tableau 17 : Niveaux d'exposition au benzène - Tondeuse marchant essence 4 temps - comparaison aux valeurs limites d'exposition

Type de mesures	Nombre de travailleurs ; nombre de mesures	Concentrations (DP début de poste - FP fin de poste)	VLE	% de la VLE	Seuil par rapport à la VLE	Sources
Benzène voie respiratoire	(1;1)	20 µg/m ³	3250 µg/m ³	0,6	≤10%	Lagneau (2010)
t,t-MA ¹ urine	(1;1)	2 mg/L (FP)	1,2 mg/L	-	-	
		1 mg/g de créatinine ² (FP)	0,9 mg/ g de créatinine	-	-	
Benzénurie ³ urine	(1;2)	<57 (DP) - 137 ng/g de créatinine (FP)	Absence de valeur limite de référence			

¹ t,t-MA : acide trans, trans muconique, métabolite du benzène

² Le dosage par rapport à la créatinine prend en compte la dilution de l'urine liée à la diurèse

³ Benzénurie : marqueur urinaire de l'exposition au benzène

La concentration en benzène mesurée au niveau des voies respiratoires est de 20 µg/m³ correspondant à moins de 1% de la VLE.

La concentration urinaire de t,t-MA en fin de poste est supérieure à la valeur de référence de 1.2 mg/L.

On observe une augmentation de la concentration de benzène dans les urines de l'ordre de 80 ng/g de créatinine entre le début et la fin de poste.

Les concentrations mesurées indiquent une exposition réelle au benzène lors de l'usage d'une tondeuse.

Le nombre de mesurage est cependant insuffisant pour conclure.

5.8.1.2. Débroussailleuse essence 2 temps

L'étude de Lagneau (2010) porte sur la caractérisation du niveau d'exposition au benzène lors de l'usage d'une débroussailleuse « mélange à faire soi-même ».

L'étude de Surot et al. (2009) porte sur la caractérisation des niveaux d'exposition par prélèvement au niveau des voies respiratoires des HAP gazeux et particulaires lors de l'usage de débroussailleuse « mélange à faire soi-même » et « mélange tout prêt ».

Ces données sont indiquées afin d'avoir un ordre de grandeur des niveaux d'exposition lors de l'usage de machine portable à moteur thermique telle que la débroussailleuse à brosse.

Les tableaux 18 et 19 présentent les niveaux d'exposition à certains composants des gaz d'échappement lors de l'usage d'une débroussailleuse selon deux types de mélanges.

Tableau 18 : Niveaux d'exposition à certains composants des gaz d'échappement - Débroussailleuse essence 2 temps - Mélange essence huile à faire soi-même - comparaison aux valeurs limites d'exposition

Substance	Nombre de travailleurs ; nombre de mesures	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Min - Max	Concentration max ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	VLE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	% de la VLE en fonction de la concentration max	Seuil par rapport à la VLE	Sources
Benzène	(2;2)	30-40	40	3250	1,2	$\leq 10\%$	Lagneau (2010)
HAP ¹ Gazeux	(3;3)	0,798 - 1,107	1,107	Absence de valeur limite de référence			Données issues de l'étude de Surot <i>et al.</i> (2009)
HAP Gazeux : Naphtalène	(3;3)	0,758 - 1,052	1,052	50000	0,002	$\leq 10\%$	
HAP Particulaire	(3;3)	0,011 - 0,021	0,021	Absence de valeur limite de référence			
HAP Particulaire Σ HAP cancérigènes	(3;3)	0,0025 ²	-	Absence de valeur limite de référence			
HAP Particulaire : Benzo[a]pyrène	(3;3)	0,0015 ³	-	0,15	1	$\leq 10\%$	

Tableau 19 : Niveaux d'exposition à certains composants des gaz d'échappement - Débroussailleuse essence 2 temps - Mélange tout prêt - comparaison aux valeurs limites d'exposition

Substance	Nombre de travailleurs ; nombre de mesures	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Min - Max	Concentration max ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	VLE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	% de la VLE en fonction de la concentration max	Seuil par rapport à la VLE	Sources
HAP ¹ Gazeux	(3;3)	0,669 - 0,731	0,731	Absence de valeur limite de référence			Données issues de l'étude de Surot <i>et al.</i> (2009)
HAP Gazeux : Naphtalène	(3;3)	0,635- 0,694	0,694	50000	0,0014	$\leq 10\%$	
HAP Particulaire	(3;3)	0,028 - 0,069	0,069	Absence de valeur limite de référence			
HAP Particulaire Σ HAP cancérigènes	(3;3)	0,01975 ²	-	Absence de valeur limite de référence			
HAP Particulaire : Benzo[a]pyrène	(3;3)	0,0045 ³	-	0,15	3	$\leq 10\%$	

¹ HAP : hydrocarbure aromatique polycyclique

² Médiane somme des HAP cancérigènes

³ Valeur moyenne calculée à partir des données de l'étude

Les concentrations en benzène mesurées au niveau des voies respiratoires lors de l'usage d'une débroussailleuse sont de 30 et 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ correspondant à environ 1% de la VLE. Il est à noter que ces mesurages concernent deux salariés qui travaillent souvent à proximité l'un de l'autre.

Les concentrations maximales de naphtalène (HAP gazeux majoritaire) mesurées au niveau des voies respiratoires sont de 1 µg/m³ pour le « mélange à faire soi-même » et de 0.7 µg/m³ pour le « mélange tout prêt ». Ces valeurs sont inférieures à 0.1% de la VLE.

Les sommes des HAP particuliers cancérigènes selon le « mélange à faire soi-même » et le « mélange tout prêt » sont respectivement de 0.0025 µg/m³ et de 0.02 µg/m³. On observe un facteur 10 entre les deux mélanges.

La concentration moyenne du benzo(a)pyrène (Bap) est de 0.0015 µg/m³ pour le « mélange à faire soi-même » et de 0.0045 µg/m³ pour le « mélange tout prêt ». Bien qu'un facteur 3 entre les deux mélanges soit observé, les valeurs sont inférieures à 10% de la VLE.

L'exposition est modérée, mais non négligeable.

Le choix du carburant semble influencer sur le niveau d'exposition avec des concentrations d'HAP et de BAP plus élevées. Cependant, le faible nombre de mesurages réalisés ne permet pas de conclure.

5.8.2. Usage de véhicules diesel et population de professionnels- résultats

5.8.2.1. Usage de véhicules diesel

L'étude de Lewné et al. (2007) avait pour objectif de caractériser l'exposition de professionnels travaillant à l'intérieur ou autour de véhicules diesel tels que des tracteurs, des camions ou des locomotives de manœuvre.

Ces données sont indiquées afin d'avoir un ordre de grandeur des niveaux d'exposition des individus travaillant avec et à proximité de tracteurs diesel.

Le tableau 20 présente les niveaux d'exposition à certains composants des gaz d'échappement lors de l'usage de véhicule diesel.

Tableau 20 : Niveaux d'exposition à certains composants des gaz d'échappement - Divers engins diesel - Comparaison aux valeurs limites d'exposition - Groupe comprenant des professionnels travaillant à l'intérieur et autour de tracteurs agricoles, camions et locomotives de manœuvre- sans trafic aux alentours

Substance	Concentration (µg/m ³) MG (ETG) ¹ n = 12	Concentration max calculée à 99,7% (µg/m ³)	VLE (µg/m ³)	% de la VLE en fonction de la concentration max	Seuil par rapport à la VLE	Sources
Dioxyde d'azote	32.2 (1.6)	131,89	400	33	>30%	Lewné et al. (2007)
Carbone élémentaire	4.1 (2.5)	64,06	100	64,1	>30%	
Carbone total	9.5 (2.3)	115,59	Absence de valeurs limites de référence			
PM ² (entre 0,1 et 10 µm)	39.3 (2.4)	543,28				
PM 1 ³	20.7 (1.8)	120,72				
PM 2.5 ⁴	26.4 (1.8)	153,96				

¹ MG moyenne géométrique et ETG écart type géométrique (entre parenthèses)

² PM particulate matter, masse totale de particules

³ PM 1 Particules avec un diamètre <1µm

⁴ PM 2.5 Particules avec un diamètre <2,5µm

Cette étude montre que l'exposition au dioxyde d'azote et au carbone élémentaire est importante dans le cas d'activité en lien avec des véhicules diesel. En effet, les concentrations maximales mesurées sont supérieures à 30% de la VLE.

5.8.2.2. Population de professionnels

L'étude menée par Blanchard (2001) avait pour objectif de caractériser l'exposition de professionnels travaillant à l'extérieur dans une agglomération selon la saison. Le groupe comprenait des agents d'entretien des parcs et jardins, des agents de maîtrise, des policiers et des agents d'entretien de la ville. Afin de connaître les concentrations dans l'air du carbone élémentaire (CE) durant la période des mesurages individuels, des mesurages sur points fixes (4 stations) ont aussi été réalisés.

Les valeurs issues de cette étude sont précisées dans la cadre de Compamed Santé afin d'avoir un ordre de grandeur des niveaux d'exposition de ce type de population qui se rapproche de notre population d'étude.

Les tableaux 21 et 22 présentent respectivement les valeurs d'immission² sur points fixes et les niveaux d'exposition aux particules diesel pour une population de professionnels travaillant à l'extérieur.

Tableau 21 : Valeurs d'immission du carbone élémentaire - mesurages sur 4 stations (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Type de site	Site urbain de fond			Site urbain de proximité
N° de station	1	2	3	4
Été	<0,3	0,4	<0,3	3,5
Automne	<1	4,2	2,5	5,6

Tableau 22 : Niveaux d'exposition aux particules diesel - Population de professionnels travaillant à l'extérieur - Angers - comparaison aux valeurs limites d'exposition - Groupe comprenant des agents d'entretien parcs et jardins, agents de maîtrise, policiers et agents d'entretien de la ville

Saison	Substance	Nombre de travailleurs ; nombre de mesures	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Min - max Moyenne arithmétique \pm écart type	Concentration max ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	VLE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	% de la VLE en fonction de la concentration max	Seuil par rapport à la VLE	Sources
Été	Carbone élémentaire	(10;40)	5,5 - 37,4 18.8 \pm 10.2	37,4	100	37,4	>30%	Blanchard (2001)
	Masse totale des particules	(10;40)	<60-480 190 \pm 130	480	Absence de valeur limite de référence			
Automne	Carbone élémentaire	(8;16)	4 - 40,5 16.7 \pm 11.5	40,5	100	40,5	>30%	
	Carbone total ¹	(8;16)	8,7 - 81 38.1	81	Absence de valeur limite de référence			
	Masse totale des particules	(8;16)	50 - 360 180 \pm 100	360				

¹ Concentration en carbone total calculée en additionnant les concentrations de carbone élémentaire et de carbone organique
Pour les mesurages individuels, les concentrations en carbone élémentaire (CE) présentent des niveaux sensiblement équivalents en été et en automne.

² L'immission caractérise la concentration des polluants dans l'air ambiant.

Les mesurages du CE réalisés en points fixes sur la même période que les prélèvements individuels permettent de connaître la part de concentration de CE attribuable à l'air ambiant et celle liée à l'activité professionnelle.

Dans l'air ambiant, on observe les concentrations les plus importantes en CE en automne sur la station 4 (située dans une rue en centre-ville), avec un maximum de $5.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La concentration moyenne en CE mesurée à la même période sur les professionnels est de $16.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Cette étude montre que l'exposition au carbone élémentaire est importante pour les professionnels travaillant à l'extérieur dans une agglomération. En effet, les concentrations maximales mesurées quelle que soit la saison sont supérieures à 30% de la VLE.

5.9. INTERPRETATIONS

La comparaison entre les différentes techniques de désherbage pour le facteur de risque gaz d'échappement est complexe à réaliser. En effet, il existe peu d'études pour caractériser et quantifier les niveaux d'exposition lors de l'utilisation de matériel de désherbage hors, ces expositions mériteraient d'être mieux documentées.

Certains matériels de désherbage nécessitent le fonctionnement simultané de deux moteurs, le moteur du véhicule et celui de l'équipement (groupe motopompe ou groupe électrogène) durant une part variable de la durée de l'intervention ; c'est le cas des pulvérisateurs motorisés et des désherbeurs vapeur, eau chaude de grand format. Ces expositions « double moteurs » n'ont pu être caractérisées ni quantifiées par manque de données.

Des études d'exposition devraient donc être effectuées lors de l'usage de matériels de désherbage (véhicule et appareil) afin de permettre la comparaison des matériels entre eux. Ces études pourraient inclure d'autres types de carburant tel que le biodiesel pour quantifier leur impact sur l'exposition (Jen-Hsiung et al., 2013).

On notera que lors de la réalisation d'opérations de désherbage, les opérateurs peuvent aussi être exposés aux gaz d'échappement issus du trafic routier à proximité.

Les résultats montrent, pour les substances caractérisées, que l'exposition lors de l'usage d'un appareil essence (tondeuse et débroussailleuse) s'avèrent être inférieurs à 10% de la VLE. Cependant, il n'est pas possible de généraliser cette conclusion car le nombre de données concernant les appareils est faible.

Les résultats des études portant sur des groupes de professionnels potentiellement exposés aux composants de gaz d'échappement de véhicules diesel (Lewné et al., 2007, et Blanchard, 2001) montrent des expositions supérieures aux VLE (>30% VLE).

Plusieurs des substances quantifiées dans ces études n'ont pas de VLE.

Cependant, quel que soit le niveau d'exposition, il s'agit ici de gaz d'échappement classés cancérogènes avérés (diesel) et cancérogènes possibles (essence) aussi, il est nécessaire de supprimer ou à défaut d'abaisser l'exposition au niveau le plus bas possible.

Pour un agent cancérogène, il n'existe pas systématiquement de seuil de concentration au-dessous duquel on peut garantir l'absence de risque d'atteinte à la santé. Les VLE doivent donc être considérées comme des objectifs minimaux de prévention.

En effet, les VLE sont déterminées pour une substance pure et, de ce fait, elles ne prennent pas en compte l'exposition à des mélanges complexes pouvant avoir des effets synergiques notamment avec les produits phytopharmaceutiques. De plus, les VLE sont fixées en prenant en compte essentiellement la voie respiratoire, cependant le passage de la substance par voie cutanée et orale est possible.

Il est donc très important de noter que le respect de ces valeurs limites ne protège pas nécessairement d'un risque cancérogène ou allergique les personnes exposées (INRS, ED984, 2012).

Ce risque sanitaire doit être impérativement pris en compte pour la population étudiée dans le cadre de Compamed Santé car l'étude Compamed ZNA a prouvé que ce sont des véhicules diesel qui sont majoritairement utilisés en collectivité ou en entreprise de gestion des espaces verts.

5.10. PRECONISATIONS POUR LES VEHICULES ET APPAREILS

La composition qualitative et quantitative des gaz d'échappement dépend de plusieurs paramètres à savoir :

le type de moteur, le système d'injection, sa température, son ancienneté, le type et la qualité du carburant utilisé, le réglage du moteur et son entretien, les systèmes de dépollution présents, le régime moteur utilisé (ralenti, accélération, pleine charge, etc.).

L'exposition du travailleur varie selon certains éléments dont : l'ouverture ou non des fenêtres, le système de ventilation de l'habitacle, le nombre de sources d'émissions de gaz d'échappement et la distance par rapport à ces sources.

5.10.1. Préconisations générales

5.10.1.1. Préconisations Organisationnelles

Pour diminuer les niveaux d'exposition aux gaz d'échappement, il faut choisir une technique de désherbage ne nécessitant pas la mise en marche d'un véhicule ou d'un appareil à moteur thermique durant l'opération de désherbage.

Si un équipement à moteur thermique est utilisé, il faut réduire la durée d'exposition et le nombre de salariés exposés. Il est indispensable de couper le moteur dès que possible (ne pas le laisser tourner inutilement au ralenti) ; cela permet aussi de réduire le gaspillage de carburant et l'usure des moteurs. Il est nécessaire de limiter au minimum le nombre de véhicules ou d'appareil équipés de moteurs thermiques en fonctionnement dans une même zone pour limiter la co-pollution. En ce qui concerne les véhicules, il est à noter que les fenêtres ouvertes ou de fréquents arrêts accompagnés de l'ouverture des portes engendrent une contribution accrue des sources extérieures (c.-à-d. de la circulation environnante) à la pollution intérieure du véhicule. De plus, il faut éviter de diriger la sortie des gaz vers un opérateur travaillant à proximité.

Les différentes préconisations liées à l'utilisation, au contrôle, à l'entretien et à la maintenance des véhicules, des appareils et des dispositifs de dépollution devront être rigoureusement respectées. Par exemple, pour éviter une dégradation du filtre ou du moteur, il est nécessaire de contrôler la contre-pression³ et de la maintenir à la valeur recommandée par le constructeur (CRAMIF, 2011).

Il est aussi nécessaire de contrôler l'exposition des travailleurs aux émissions de gaz d'échappement selon la réglementation en vigueur.

5.10.1.2. Préconisations techniques

Carburant

Il est important d'utiliser un carburant de bonne qualité (INRS, ND 2239, 2005 et CRAMIF, 2011). Les carburants à basse teneur en soufre sont désormais obligatoires et ont pour objectif de réduire les émissions de dioxyde de soufre et les particules. Le gazole routier et le gazole non routier (GNR) contiennent au maximum 10 ppm de soufre. Le GNR remplace le fioul rouge anciennement utilisé sur les tracteurs. Le GNR a un indice de cétane plus élevé que le fioul ce qui favorise la combustion et entraîne une réduction des émissions de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures. Il peut aussi être envisagé d'utiliser des biocarburants afin de réduire les émissions (Jen-Hsiung et al., 2013).

³ La contre-pression est la pression induite par le FAP dans le conduit, elle augmente lorsque les gaz ne peuvent plus passer à travers le filtre car celui-ci est encrassé ou colmaté.

Huile

Choisir une huile moteur de bonne qualité et surveiller sa consommation est important pour les véhicules équipés de filtre à particules afin d'éviter son colmatage prématuré et ainsi limiter les émissions. Il est possible de se renseigner auprès du constructeur du véhicule ou du distributeur de lubrifiants (CRAMIF, 2011).

Système de dépollution

Il existe plusieurs systèmes de dépollution des gaz d'échappement pour les moteurs diesel ou essence des véhicules. Ils sont rappelés très brièvement dans le paragraphe ci-dessous.

Pour le traitement des particules, il y a le filtre à particules de série. Dans certain cas, il peut être installé sur un véhicule déjà en usage (CRAMIF, 2011). L'ajout d'un pot catalytique dans la ligne d'échappement permet aussi de limiter la quantité de monoxyde de carbone, d'hydrocarbure imbrûlé et d'oxyde d'azote. De plus, il existe différents systèmes de dépollution pour le traitement des oxydes d'azote tels que l'EGR (recirculation des gaz d'échappement), la SCR (réduction catalytique sélective) et le piège à NOx. Le système d'injection diesel à rampe commune (common-rail), en améliorant la pulvérisation du carburant, engendre la réduction des émissions de CO, NOx et particules à la source. Enfin, il existe des filtres d'habitacle montés en amont de la climatisation ou du système de ventilation qui permettent différents niveaux de filtration. Certains systèmes peuvent se rajouter sur un véhicule déjà en usage, il est nécessaire de se renseigner auprès de votre constructeur.

En dernier recours, pour abaisser le niveau d'exposition, le port d'un masque avec filtres anti-aérosols et antigaz peut être envisagé (Lagneau, 2010).

5.10.1.3. Préconisations concernant les individus

Il est important de former le personnel au risque lié à l'exposition aux gaz d'échappement et aux mesures de prévention qui permettront de réduire leur exposition.

Les utilisateurs doivent être sensibilisés au fait de couper le moteur dès que possible et d'éviter de se trouver à proximité d'autres moteurs thermiques en fonctionnement. Ils doivent aussi être aptes à contrôler et identifier les anomalies des dispositifs de dépollution (signal d'alarme) afin d'en avertir le service maintenance. Les techniciens de maintenance seront formés au contrôle et à la maintenance des dispositifs de dépollution (CRAMIF, 2011).

5.10.2. Préconisations spécifiques appareils à moteur thermique

Pour limiter les émissions des appareils à moteur thermique 2 temps, il est conseillé de respecter les proportions de mélange indiquées.

Un catalyseur peut être installé sur certains appareils, il est nécessaire de se renseigner auprès du fabricant.

Achat

Lorsque l'achat d'un véhicule (ou d'un appareil) est envisagé, le choix doit se porter en priorité vers des moteurs électriques, GPL ou gaz naturel. Si toutefois, la structure s'orientait vers le choix de carburant plus classique, il est préférable de s'orienter vers les moteurs essence plutôt que les moteurs diesel. Pour les équipements tels que : groupe moto pompe de pulvérisateur, groupe électrogène pour désherbeur vapeur/eau chaude, appareil autotracté ou à pousser et machines portatives, il est impératif de privilégier les moteurs électriques et, en dernier recours, les moteurs essence 4 temps puis les 2 temps.

Lors de l'achat d'un nouveau véhicule ou appareil, il est utile de s'informer auprès du constructeur sur les systèmes de dépollution existants selon le type de moteur, l'activité et l'environnement d'utilisation afin d'acquérir l'équipement avec la meilleure technique disponible relative aux émissions (CRAMIF, 2011). Il est aussi important de choisir un véhicule équipé de la climatisation pour éviter l'augmentation de la pollution à l'intérieur du véhicule liée aux fenêtres ouvertes.

L'acquisition d'un véhicule ou d'un appareil récent aura l'avantage d'être conforme aux dernières normes Euro ou directive EMNR.

6. LE GLYPHOSATE

6.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Une étude a été réalisée par l'IHIE Ouest de 2007 à 2011 afin d'estimer les expositions aux produits phytopharmaceutiques dans une population de professionnels non agricoles à savoir : les personnels territoriaux de la ville d'Angers chargés de l'entretien de différents espaces (parcs, jardins, voiries, cimetières, etc.)(Teigné, 2011). L'étude avait pour objectif de caractériser les niveaux d'exposition respiratoire, cutanée et d'imprégnation urinaire des travailleurs et d'identifier les déterminants des expositions.

Dans ce rapport, il sera présenté uniquement

- i) les résultats pour le glyphosate, cette substance étant l'herbicide majoritairement utilisé⁴ et
- ii) les déterminants des expositions qui ont été mis en exergue dans l'étude.

Des mesurages ont été réalisés sur les applicateurs et aide applicateurs lors de l'utilisation de pulvérisateurs motorisés et de pulvérisateurs à dos.

L'applicateur est la personne qui dépose le produit phytopharmaceutique sur la zone à traiter, elle effectue en général aussi la préparation et le nettoyage. L'aide-applicateur participe aux traitements sans être lui-même applicateur, il peut intervenir lors de la préparation, du nettoyage, de la conduite d'engin, etc. (figure 5).

Figure 5 : Photo d'un applicateur et d'un aide applicateur



6.2. DEFINITION DU GLYPHOSATE

Le glyphosate est un herbicide systémique à large spectre, non sélectif, qui agit en inhibant la biosynthèse des acides aminés aromatiques (tryptophane, phénylalanine, tyrosine) au niveau du chloroplaste, provoquant la désorganisation de la plante et sa mort. Il s'agit de l'herbicide le plus utilisé à l'échelle mondiale.

En milieu professionnel agricole, différentes études ont montré que l'exposition par contact cutané était la voie prépondérante de pénétration dans l'organisme des applicateurs, même si l'absorption cutanée du glyphosate est faible et lente selon les résultats d'études menées avec du Roundup MD chez des singes ou sur des échantillons de peau humaine (2,2 % de pénétration cutanée chez l'homme) (Wester et al., 1991).

Par voie orale, l'absorption du glyphosate est rapide, avec un pic plasmatique chez l'homme compris entre une et deux heures. Testud (2007) précise qu'en milieu professionnel, une contamination digestive par déglutition des microparticules inhalées est possible.

⁴ D'autres substances que le glyphosate sont utilisées et peuvent potentiellement engendrer des effets sur la santé. Sont aussi à prendre en compte les effets de la préparation et les synergies possibles dus à l'usage d'autres substances.

Le glyphosate est principalement excrété dans les fèces (68 à 80 %) et à un niveau moindre dans l'urine (7 à 31%). Les études de métabolisme indiquent que le glyphosate est faiblement métabolisé par les mammifères et qu'il est excrété dans les urines presque exclusivement sous forme inchangée. Environ 0,5% sont métabolisés en acide aminométhyl phosphonique (AMPA). La demi-vie d'excrétion du glyphosate est courte, mais il n'existe pas de données de toxicocinétique chez l'homme. Lors d'une étude chez des rats, 95 % de la dose radioactive fut excrétée dans les 48 heures suivant l'administration et l'on considère que, chez l'homme, plus de 90 % d'une dose orale sont rapidement éliminés en 72 heures (Farmer, 2010).

Le glyphosate ne s'accumule pas dans l'organisme. Seule une très faible proportion fait l'objet d'une distribution et d'un stockage tissulaire, essentiellement au niveau des os (INRS, fiche biotox du glyphosate, 2014).

6.3. EFFETS SANITAIRES DE L'EXPOSITION AU GLYPHOSATE

Le glyphosate est considéré comme peu toxique ($DL50^5 > 5000$ mg/kg chez le rat) en dehors de cas d'ingestions accidentelles ou suicidaires pouvant conduire au décès par détresse respiratoire, acidose métabolique et troubles du rythme cardiaque. Mais administrées à des doses équivalentes, les préparations sont plus toxiques que le glyphosate et cette augmentation de toxicité peut s'expliquer par l'effet du tensioactif POAE (Polyoxyéthylène amine). En milieu professionnel sont essentiellement décrites des dermatites de contact après contact répété. Le glyphosate est classé par l'OMS en catégorie III (Slightly hazardous) (IPCS, 2010).

Pour ce qui est de la toxicité chronique et notamment des effets cancérogènes, des études cas-témoins en Suède et au Canada ont suggéré une association entre l'utilisation du glyphosate et le risque de lymphome non-Hodgkinien (Testud, 2007).

Le glyphosate est depuis le 20 mars 2015 classé par le CIRC cancérogène probable pour l'Homme, groupe 2 A.

De la même manière, des études ont été publiées récemment sur la toxicité du glyphosate pour la reproduction et le développement du fœtus. L'équipe du Professeur Séralini a présenté des résultats préoccupants sur 3 modèles cellulaires humains - lignée de cellules tumorales placentaires JEG3, lignée de cellules rénales embryonnaires 293 et cultures primaires de cellules endothéliales de la veine ombilicale HUVEC (Benachour, 2009). Ces publications ont entraîné une réponse de l'AFSSA (saisine n°2008-SA- 0034 – Glyphosate) qui juge que « ces travaux ne mettent en lumière aucun nouveau mécanisme d'action du glyphosate et des préparations contenant du glyphosate Au regard de ces éléments, l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments estime que les effets cytotoxiques du glyphosate, de son métabolite AMPA, du tensioactif POAE et des préparations à base de glyphosate avancés dans cette publication n'apportent pas de nouveaux éléments pertinents qui soient de nature à remettre en cause les conclusions de l'évaluation européenne du glyphosate ni celles de l'évaluation nationale des préparations». Il n'en demeure pas moins que d'autres équipes prenant en compte l'inhibition de l'aromatase présente dans les cellules placentaires,...suspectent le glyphosate de dérégulation hormonale et de perturbation de la reproduction et du développement fœtal (Romano et al., 2010 ; Paganelli et al., 2010).

La toxicité chronique de la préparation commerciale à l'égard du système nerveux central est à prendre en compte (Malhotra et al., 2010) et, se pose la question, comme pour d'autres produits phytopharmaceutiques, d'une relation entre exposition au glyphosate et maladie de Parkinson (Wang et al., 2011). Depuis 2012 la maladie de Parkinson a été reconnue comme maladie professionnelle en lien possible avec les produits phytopharmaceutiques.

⁵ DL50 : Les lettres DL désignent la « dose létale ». La DL₅₀ est la quantité d'une matière, administrée en une seule fois, qui cause la mort de 50 % (la moitié) d'un groupe d'animaux d'essai. La DL₅₀ est une façon de mesurer le potentiel toxique à court terme (toxicité aiguë) d'une matière.

6.4. MATERIELS ET METHODES DE MESURAGE DE L'EXPOSITION INDIVIDUELLE

6.4.1. Mesurage de l'exposition individuelle respiratoire en champ libre

Les prélèvements d'air individuels actifs ont été réalisés au moyen de tubes XAD-2 (Supelco orbo 609), maintenus au niveau des voies respiratoires des agents et reliés à une pompe portable (Gilian3500, Sensidyne®) calibrée à un débit de 1 l.min⁻¹. Le débit de la pompe a été contrôlé avant et après mesurages et ajusté au besoin en utilisant le système de calibration de débit d'air Gilibrator®. Les tubes de résine ont été installés avant le début du traitement et retirés à la fin du traitement. Immédiatement après les essais, les tubes de résine ont été bouchés, protégés de la lumière par du papier aluminium puis congelés dans un délai inférieur à deux heures. Lorsque le traitement avait une durée supérieure à 4 heures, deux tubes de résine ont été successivement installés (tube de sorbant ôté et remplacé lors d'une pause).

6.4.2. Mesurage de l'exposition individuelle cutanée

Les prélèvements ont été réalisés au moyen de patches. Des gazes chirurgicales (Mesoft, Mölnlycke Healthcare, France) en coton de 100 cm² (10 x 10 cm) ont été placées sur la peau des agents avant la prise de poste selon les recommandations de l'OCDE.

Douze parties du corps ont été échantillonnées : tête, nuque, dos, thorax, avant-bras (droit et gauche), partie supérieure des bras (droite et gauche), tibias (droit et gauche), cuisses (droite et gauche).

Les compresses ont été retirées à la fin du traitement indépendamment de sa durée. Pour l'ensemble des traitements suivis, les expositions des mains ont été mesurées par essuyage : deux gazes humidifiées de propan-2-ol (GLC-Produit phytopharmaceutique residue grade, Fisher Scientific, France) par main. Cet essuyage a été réalisé à la fin de la période de travail et avant chaque pause.

Les patches (corps ou mains) ont été, à la fin de la réalisation du traitement, conditionnés dans des flacons de verre (Fisher Scientific, France), puis protégés de la lumière par du papier aluminium et congelés dans un délai inférieur à deux heures.

6.4.3. Suivi biométriologique urinaire

Deux xénobiotiques ont été recherchés : le glyphosate et AMPA. La durée de la phase de recueil urinaire était de 24h.

Un recueil urinaire à la prise de poste (avant le début du traitement phytopharmaceutique) a également été réalisé.

Les urines ont été collectées dans des flacons de 60 mL à usage unique en polyéthylène (laboratoires Humeau, France). Pendant la durée du traitement, les échantillons d'urine ont été conservés à 4°C, puis protégés de la lumière et congelés dans un délai inférieur à deux heures après la fin du traitement. Les urines du soir et du lendemain matin ont été immédiatement congelées à domicile par les agents.

6.5. MESURAGES REALISES

Figure 6 : Exemple de lecture des tableaux

ER : Exposition respiratoire EC : Exposition cutanée BM : Biométrie

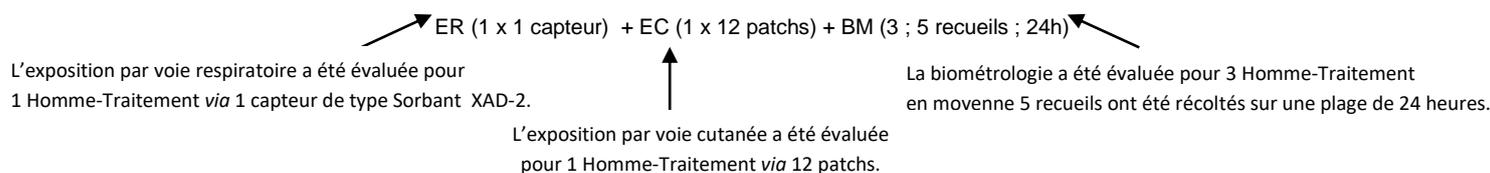


Tableau 23 : Présentation des traitements ayant fait l'objet de mesurages selon les modalités pulvérisateur à dos; applicateur et aide-applicateur

Matériel	Activité	
	applicateur	aide applicateur
pulvérisateur à dos	Citepro® (glyphosate) : 2 Hommes-Traitements Durée d'exposition : 5h00 Mesurages réalisés : ER (0) + EC (1 x 12 patches) + BM (2 ; 7 recueils ; 24h)	Citepro® (glyphosate) : 1 Homme-Traitement Durée d'exposition : 00h10 Mesurages réalisés : ER (n) + EC (1 x 12 patches) + BM (1 ; 3 recueils ; 24h)
	Oxalis® (glyphosate) : 3 Hommes-Traitements Durée d'exposition : min 3h10 ; max 6h00 Mesurages réalisés : ER (1 x 2 capteurs) + EC (1 x 12 patches) + BM (3 ; 6 recueils ; 24h)	non concerné
	Round'up® (glyphosate) : 1 Homme-Traitement Durée d'exposition : 3h00 Mesurages réalisés : ER (0) + EC (1 x 12 patches) + BM (1 ; 8 recueils ; 24h)	non concerné

Tableau 24 : Présentation des traitements ayant fait l'objet de mesurages selon les modalités pulvérisateur motorisé; applicateur et aide-applicateur

Matériel	Activité	
	applicateur	aide applicateur
pulvérisateur motorisé	Canyon® + PistoEV® (diuron, glyphosate, diflufenicanil, glufosinate ammonium) : 1 Homme-Traitement Durée d'exposition : 5h30 Mesurages réalisés : ER (1 x 1 capteur) + EC (1 x 12 patches) + BM (1 ; 6 recueils ; 24h)	Canyon® + PistoEV® (diuron, glyphosate, diflufenicanil, glufosinate ammonium) : 1 Homme-Traitement Durée d'exposition : 5h30 Mesurages réalisés : ER (1 x 1 capteur) + EC (1 x 12 patches) + BM (1 ; 7 recueils ; 24h)
	Oxalis® (glyphosate) : 1 Homme-Traitement Durée d'exposition : 6h00 Mesurages réalisés : ER (0) + EC (1 x 6 patches) + BM (1 ; 5 recueils ; 24h)	Oxalis® (glyphosate) : 1 Homme-Traitement Durée d'exposition : 6h00 Mesurages réalisés : ER (0) + EC (1 x 6 patches) + BM 1 ; 3 recueils ; 24h)
	PistoEV® (glyphosate, diflufenicanil) : 4 Hommes-Traitements Durée d'exposition : min 3h45 ; max 6h00 Mesurages réalisés : ER (1 x 1 capteur) + EC (1 x 6 patches ; 3 x 12 patches) + BM (4 ; 6 recueils ; 24h à 48h)	PistoEV® (glyphosate, diflufenicanil) : 4 Hommes-Traitements Durée d'exposition : min 3h45 ; max 6h00 Mesurages réalisés : ER (1 x 1 capteur) + EC (1 x 6 patches ; 2 x 12 patches) + BM (4 ; 8 recueils ; 24h à 72h)

6.6. PERFORMANCES ANALYTIQUES DES METHODES

Le tableau 25 présente les méthodes d'extraction et d'analyse mises en œuvre dans le projet. Les techniques analytiques utilisées ont été la chromatographie liquide haute performance couplée à une détection fluorimétrique ainsi que la chromatographie liquide couplée à une détection par spectrométrie de masse en tandem.

Tableau 25 : Méthodes d'extraction et d'analyses développées pour l'ensemble des compartiments étudiés

Substance	Exposition cutanée		Exposition respiratoire		Biomonitoring urinaire	
	Méthode d'extraction	Méthode d'analyse	Méthode d'extraction	Méthode d'analyse	Méthode d'extraction	Méthode d'analyse
AMPA	Ultra-sons	LC/Fluo	Ultra-sons	LC/Fluo	Non dosé	/
glyphosate	Ultra-sons	LC/Fluo	Ultra-sons	LC/Fluo	LLE	LC/MS-MS

Légende :

LLE : extraction liquide-liquide

LC/Fluo : chromatographie en phase liquide couplée à une détection fluorométrique

LC/MS-MS : chromatographie en phase liquide couplée à la spectrométrie de masse en tandem

Les performances analytiques des méthodes sont résumées dans le tableau 26.

Tableau 26 : Performances analytiques des méthodes d'analyse

Substance	Exposition cutanée		Exposition respiratoire		Biomonitoring urinaire	
	LD ; LQ (pg/cm ²)	Taux de recouvrement Domaine de linéarité	LD ; LQ (ng/m ³)	Taux de recouvrement Domaine de linéarité	LD ; LQ (µg/L)	Domaine de linéarité (µg/L) (+++)
AMPA	7,5 ; 25	97,7±6	12 ; 40	97,7±6	non dosé	non dosé
glyphosate	10 ; 32,5	95,3±10	16 ; 52	95,3±10	3 ; 5	LQ à 500

Légende :

LD : limite de détection

LQ : limite de quantification

Taux de recouvrement : Le taux de recouvrement est aussi appelé rendement d'extraction. Il s'agit d'un paramètre indicatif qui n'intervient pas dans la quantification ; l'étalonnage ayant été systématiquement réalisé dans la matrice à analyser.

6.7. TRAITEMENT DES DONNEES DE MESURAGE RELATIVES A L'EXPOSITION INDIVIDUELLE

6.7.1. Traitement des mesures relatives à l'exposition par voie respiratoire

L'exposition respiratoire potentielle (PRE) est exprimée en ng/m³ d'air. Elle est calculée selon la formule ci-après :

$$PRE = \left(\frac{\text{massedeSA}}{\text{Débit} \times \text{Temps}} \right) \times 1000$$

avec : la masse de substances actives exprimée en ng (SA)

le débit d'échantillonnage en l.min⁻¹ (Débit)

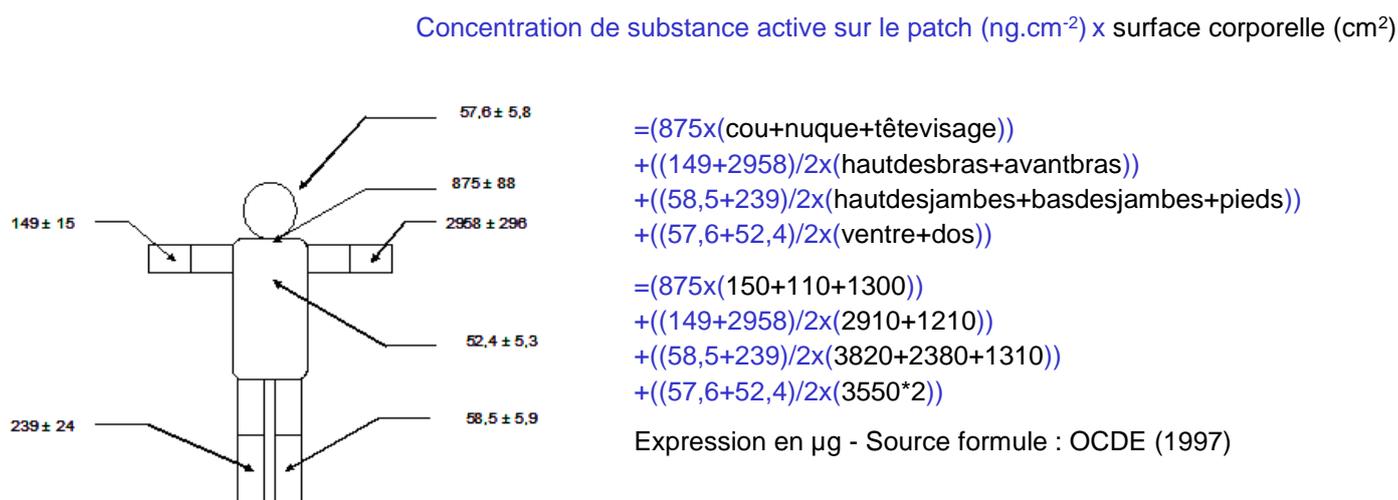
le temps d'échantillonnage en min (Temps)

6.7.2. Traitement des mesures relatives à l'exposition cutanée

6.7.2.1. Calcul de l'exposition totale cutanée

Les contaminations de chaque partie (= zone) du corps sont obtenues en multipliant la concentration en substances actives déterminées pour chaque patch (ng.cm^{-2}) par la surface corporelle correspondante (exprimée en cm^2) relatée dans la table de Lund et Browder (OCDE, 1997). L'exposition cutanée du corps est obtenue en additionnant les expositions de l'ensemble des zones du corps. Elle est exprimée en μg . Un exemple de calcul est présenté en figure 7.

Figure 7 : Exemple de calcul utilisé pour exprimer l'exposition cutanée du corps.



Les données de mesurage de l'exposition des mains sont directement exprimées en masse. L'exposition totale des mains est obtenue en additionnant l'exposition des deux mains. Elle est exprimée en μg .

L'exposition totale du corps est obtenue en additionnant l'exposition cutanée corporelle et l'exposition cutanée des mains. Elle est exprimée en μg .

Les expositions cutanées (corps, mains et corps+mains) pour le glyphosate ont été obtenues en prenant en compte les mesures de glyphosate ainsi que les mesures d'AMPA⁶. La formule ci-dessous a été utilisée :

$$\text{Exposition cutanée glyphosate} = \text{masse}_{\text{glyphosate}} + \text{masse}_{\text{AMPA}} \times \left(\frac{\text{PM}_{\text{glyphosate}}}{\text{PM}_{\text{AMPA}}} \right)$$

avec : la masse de glyphosate et d'AMPA en μg

Poids moléculaire (PM) du glyphosate = 169 g.mol^{-1}

Poids moléculaire (PM) de l'AMPA = 111 g.mol^{-1}

6.7.3. Calcul de l'intensité de l'imprégnation (AMPL)

L'intensité de l'imprégnation aux xénobiotiques des agents a été déterminée par le calcul de la différence (appelée également AMPLitude) entre la concentration maximale (C_{max}) et la concentration minimale (C_{min}) en xénobiotique excrétée sur la durée de recueil déterminée. Cette différence est notée AMPL.

⁶ L'AMPA est un produit de dégradation du glyphosate. Cette dégradation peut intervenir lors de la réalisation du traitement phytopharmaceutique et/ou au laboratoire lors de l'analyse des compresses.

6.8. RESULTATS

6.8.1. Description des données d'exposition respiratoire

La méthode consistant à prélever uniquement la phase gazeuse (tubes de sorbant XAD-2) a abouti à des résultats inférieurs aux limites de détection des méthodes pour la totalité des échantillonneurs analysés. Il n'est pas possible de considérer, à ce stade des connaissances, que les expositions respiratoires lors de l'application sont négligeables.

Les outils de mesurage de l'exposition respiratoire (méthodes de prélèvement et d'analyse) aux produits phytopharmaceutiques ne sont pas totalement adaptés à la problématique. Pour autant, il n'est pas possible d'affirmer que l'exposition respiratoire soit négligeable.

6.8.2. Résultats des données d'exposition cutanée et d'imprégnation

Tableau 27 : Résultats des données d'expositions individuelles selon les modalités matériel d'application et activité de l'agent

Substance / Matériel d'application	Activité			
	applicateur		aide-applicateur	
	Exposition cutanée totale (*) (µg)	Biomonitoring urinaire (**) AMPL (µg/L)	Exposition cutanée totale (*) (µg)	Biomonitoring urinaire (**) AMPL (µg/L)
	MG (***) (min – max)	MG (min – max)	MG (min – max)	MG (min – max)
Pulvérisateur motorisé glyphosate+AMPA	n=5 3630,1 (291 ; 32148)	n=6 4,3 (2,1 ; 11,5)	n=4 329,4 (62 ; 1117)	n=6 5,0 (2,1 ; 71,3)
Pulvérisateur à dos glyphosate+AMPA	n=4 2981,8 (1205 ; 10580)	n=6 35,5 (7,1 ; 168,0)	non analysé	non analysé

(*) l'exposition cutanée totale est calculée par rapport à la surface totale des parties du corps mesurées

(**) l'AMPL (ou amplitude d'excrétion urinaire) est utilisée pour caractériser l'imprégnation totale

(***) MG Moyenne géométrique

Tableau 28 : Résultats des données d'expositions individuelles quels que soient l'activité ou le matériel utilisé

substance phytopharmaceutique	données à l'échelle de l'individu		
	nombre de journées consacrées à l'activité 'traitement'	Exposition cutanée totale (µg)	Imprégnation (µg/L)
		MG (min – max)	MG (min – max)
glyphosate+AMPA	65,5	1633 (61,9 – 32148)	9,1 (2,1 – 168)

6.9. ANALYSE DES RESULTATS

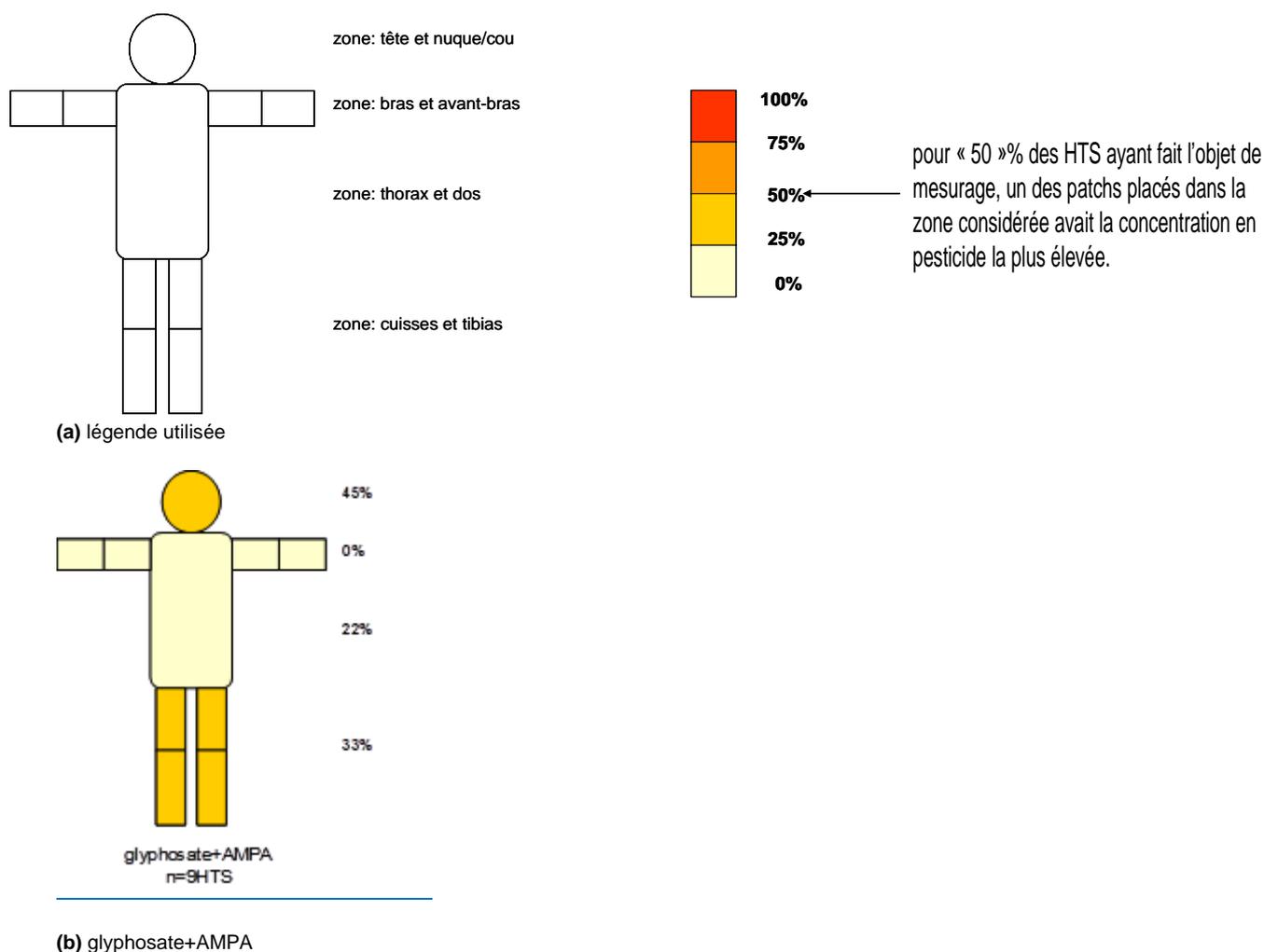
6.9.1. Analyse des données d'exposition cutanée individuelle

Pour le cas du glyphosate +AMPA, l'étendue des valeurs est de : 62 µg à 32 mg. La moyenne géométrique est de 1,6 mg (tableau 28).

Pour cette étude, l'ensemble des parties du corps échantillonnées a été classé par ordre d'exposition croissante pour chaque Homme-Traitement-Substance suivi. Plusieurs zones échantillonnées ont été regroupées en fonction de leur proximité (tête et nuque ; AVB⁷s et bras ; thorax et dos ; cuisses et tibias). A été comptabilisé pour chacune de ces zones, le nombre de fois qu'une des parties du corps était la plus exposée. Cette étude a été réalisée quel que soit le matériel mis en œuvre. En effet, le fait d'utiliser un pulvérisateur à dos n'est pas apparu représenter un biais ; le dos n'ayant jamais été observé comme étant la zone la plus exposée.

La figure 8 présente le pourcentage du nombre de fois que chacune des 4 zones étudiées ressort comme étant la zone la plus exposée pour le glyphosate + AMPA.

Figure 8 : Pourcentage du nombre de fois que chacune des 4 zones étudiées ressort comme étant la zone la plus exposée glyphosate+AMPA (b), légende utilisée (a).



⁷ AVant-Bras

Dans le cas du glyphosate (+AMPA) ce sont les zones « tête et nuque/cou » et « cuisses et tibias » qui ont été classées comme étant les zones les plus exposées (pour respectivement 45% et 33% des HTS).

Des explications plausibles seraient (i) la capuche de la combinaison non portée, (ii) des contaminations de cette zone *via* des gestes mains-tête ou mains-nuque/cou, (iii) le type de matériel utilisé ou (iv) la méthode de traitement employée par l'agent (tuyau posé sur l'épaule).

6.9.2. Comparaison à la valeur toxicologique de référence

L'évaluation du risque repose sur la comparaison entre les quantités de matières actives susceptibles d'être absorbées par l'utilisateur et la valeur toxicologique de référence : l'AOEL (Acceptable Operator Exposure Level). L'AOEL désigne la quantité maximum de substance active à laquelle l'utilisateur peut être exposé quotidiennement, sans effet dangereux pour sa santé. Elle est exprimée en mg de substance active/kg de poids corporel/jour (ANSES, guide agritox, 2012). L'AOEL est établie, en prenant en compte des facteurs de correction, à partir d'un NOAEL animal (No Observed Adverse Effect Level) (mg de s.a./kg/jour) qui est la quantité maximale de substance active à laquelle l'animal peut être exposé sans effet néfaste observé (Ndao, 2008).

L'AOEL pour le glyphosate est de 0,2 mg/kg p.c./jour (Annexe 1 de la directive 91/414/CEE).

A partir de la dose externe reçue par voie respiratoire et cutanée, on calcule la dose interne potentielle reçue que l'on compare à l'AOEL. Durant l'étude, les mesurages par voie respiratoire ont abouti à des résultats inférieurs aux limites de détection. Le calcul de pourcentage de l'AOEL a donc été effectué exclusivement en prenant en compte l'exposition par voie cutanée. Pour autant, il n'est pas possible d'affirmer que l'exposition par voie respiratoire soit négligeable. Le calcul a été réalisé à partir de la concentration maximale mesurée pour un adulte de 70 kg. Le coefficient de pénétration cutané pour le glyphosate est de 3% (ANSES, base agritox, 2001).

Le tableau 29 présente les résultats des données d'exposition cutanée individuelle et la comparaison à l'AOEL.

Tableau 29 : Résultats des données d'exposition cutanée individuelle au glyphosate et AMPA¹ en fonction du matériel et de l'activité de l'agent - comparaison à l'AOEL²

Type de matériel	Activité	Nombre de mesures	Exposition cutanée totale (mg) Moyenne géométrique (min - max)	Valeur maximale (mg)	Dose interne calculée ³ (mg)	Dose interne par kilo de poids corporel ⁴ (mg/kg)	AOEL ² (mg/kg p.c./jour)	% AOEL
Pulvérisateur motorisé	Applicateur	5	3,630 (0,291 ; 32,148)	32,148	0,964	0,0138	0,2	6,89
	Aide-applicateur	4	0,329 (0,062 ; 1,117)	1,117	0,034	0,0005	0,2	0,24
Pulvérisateur à dos	Applicateur	4	2,982 (1,205 ; 10,580)	10,580	0,317	0,0045	0,2	2,27
	Aide-applicateur	Non analysé						

¹ AMPA : L'acide aminométhyl phosphonique est un produit de dégradation du glyphosate. Cette dégradation peut intervenir lors de la réalisation du traitement phytopharmaceutique et/ou au laboratoire lors de l'analyse des compresses.

² AOEL : Acceptable Operator Exposure Level : quantité maximale de substance active à laquelle l'opérateur peut être exposé quotidiennement, sans effet néfaste pour sa santé (en mg de substance active par kg de poids corporel et par jour) - (ANSES, guide agritox, 2012)

³ Dose interne calculée en prenant en compte le coefficient de pénétration cutanée du glyphosate à savoir : 3% - (ANSES, base agritox, 2001)

⁴ Dose interne par kilo calculée pour un adulte de 70 kg.

L'individu le plus exposé par voie cutanée est l'applicateur avec pulvérisateur motorisé. Celui-ci présente une concentration cutanée totale maximale de 32,15 mg/m³ soit 6.9% de l'AOEL. L'applicateur avec pulvérisateur à dos présente une concentration cutanée totale maximale de 10,58 mg/m³ soit 2.3% de l'AOEL. Il faut rappeler que le pourcentage de l'AOEL a été calculé sans prendre en compte l'exposition par voie respiratoire.

Le faible nombre de mesurages n'est pas suffisant pour conclure.

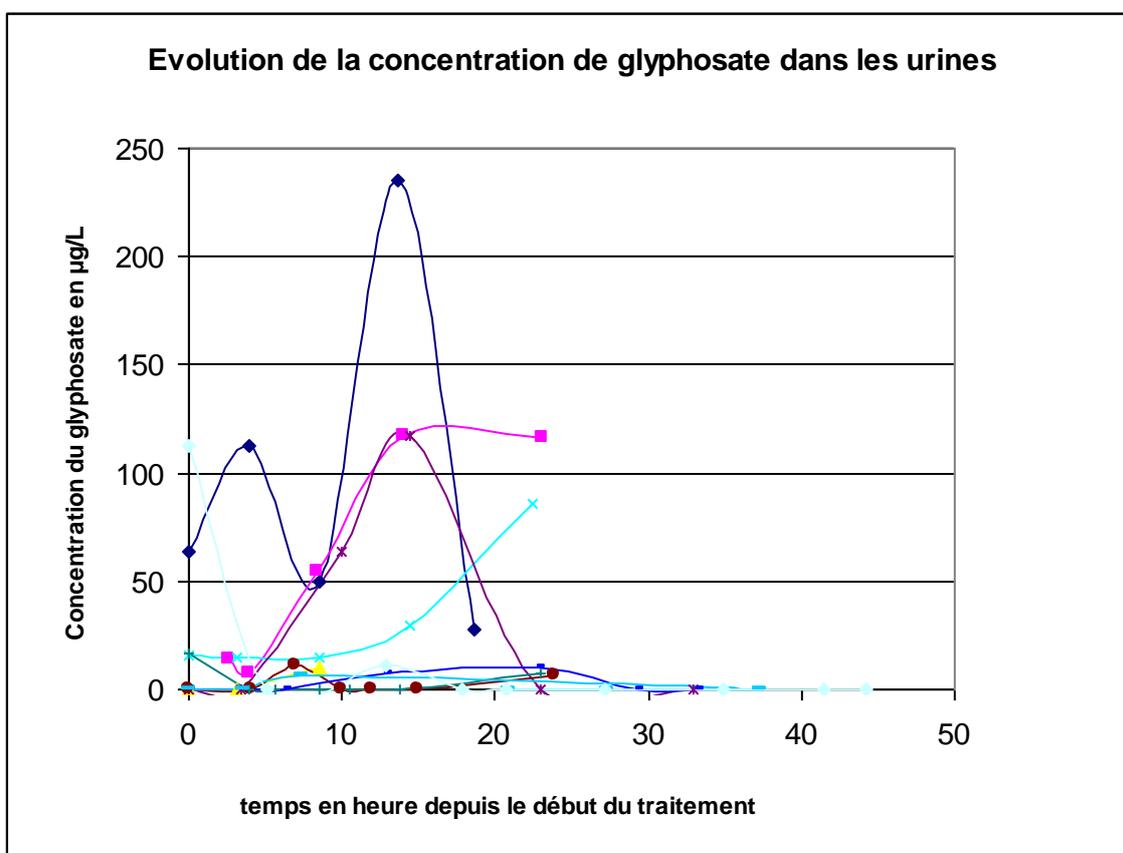
6.9.3. Description des données d'imprégnation

Pour le glyphosate, l'étendue des valeurs des AMPL est de 2,12 à 168 µg/L (n=18). La moyenne géométrique est de 9,15 µg/L. Concernant les valeurs exprimées en µg/g créatinine (n=11), les valeurs varient de 3,61 à 157 µg/g créatinine ; la moyenne géométrique est de 13,2 µg/g créatinine.

- une variabilité inter-individus des cinétiques d'excrétion des xénobiotiques est observée.

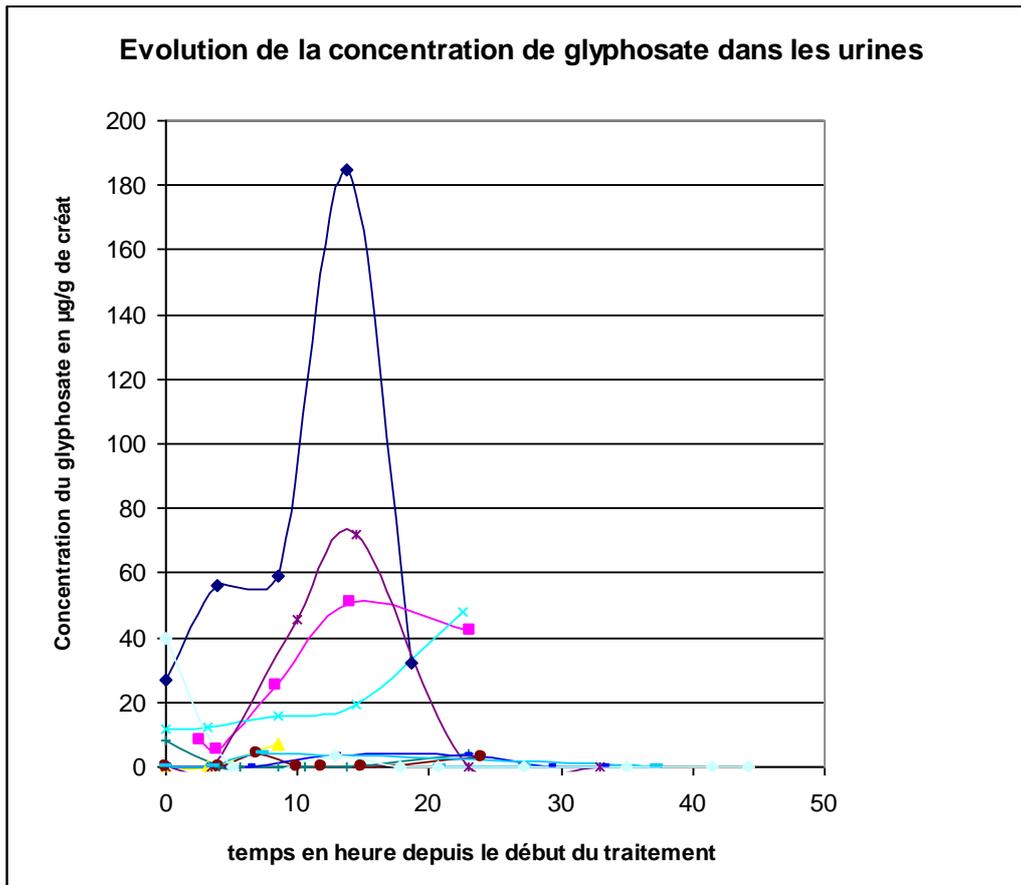
A titre d'exemple, la figure 9 présente les cinétiques d'élimination du glyphosate (+AMPA) pour 10 Hommes-Traitements suivis dans ce projet. Il semblerait qu'un maximum d'excrétion urinaire puisse se situer 14 heures après le début de l'exposition pour 5 Hommes-Traitements. Pour 3 Hommes-Traitements, ce maximum d'excrétion est situé aux environs de 7 heures après le début de la réalisation du traitement ; pour les 2 autres Hommes-Traitements il est situé à 23 heures (à noter que la figure 10 présente les variations d'excrétion urinaire du glyphosate pour les mêmes Hommes-Traitements avec les concentrations exprimées en fonction de la créatininurie).

Figure 9 : Cinétiques d'élimination du glyphosate pour 10 Hommes-Traitements en µg/L d'urine



Quant aux concentrations observées pour le glyphosate excrété (figure 9), leur variabilité et leur intensité sont comparables à celles mesurées dans le cadre de l'étude d'Acquavella et al. (2004) qui avait noté, le jour de l'application, des concentrations urinaires moyennes de glyphosate pour des agriculteurs de $3,2 \pm 6,4$ µg/L (extrêmes 1 à 233 µg/L).

Figure 10 : Cinétiques d'élimination du glyphosate pour 10 Hommes-Traitements en $\mu\text{g/g}$ de créatinine



Cependant, quel que soit le niveau d'exposition, il s'agit ici du mesurage de la substance seule. Hors administrées à des doses équivalentes, les préparations sont plus toxiques que le glyphosate. En effet, la toxicité chronique de la préparation commerciale à l'égard du système nerveux central est à prendre en compte (Malhotra et al., 2010) et, se pose la question, comme pour d'autres produits phytopharmaceutiques, d'une relation entre exposition aux glyphosate et maladie de Parkinson (Wang et al., 2011). Depuis 2012 la maladie de Parkinson a été reconnue comme maladie professionnelle en lien possible avec les produits phytopharmaceutiques.

De plus, des effets synergiques sont possibles dus à l'usage d'autres molécules.

Le glyphosate est depuis le 20 mars 2015 classé par le CIRC cancérogène probable pour l'Homme, groupe 2 A.

Ce risque sanitaire doit donc être impérativement pris en compte pour la population étudiée dans le cadre de Compamed Santé.

6.10. ANALYSE STATISTIQUE DES DETERMINANTS DES EXPOSITIONS

L'analyse statistique des déterminants des expositions a été réalisée au moyen de l'outil statistique Minitab (version PC 15.1). Elle a été menée 'toutes substances confondues'. L'approche 'substance par substance' n'a pas été envisageable du fait d'une matrice non équilibrée.

Les conclusions sont les suivantes :

- **quatre déterminants de l'exposition cutanée totale ont été mis en exergue :**
 - **le matériel d'application,**
 - **le type de substances actives,**
 - **la concentration initiale de la substance active,**
 - **et la masse de substance active appliquée,**
- **et deux déterminants des imprégnations**
 - **le matériel d'application,**
 - **et la durée de traitement.**

L'étude des déterminants a été effectuée à partir des résultats d'exposition totale cutanée et des résultats d'imprégnation (AMPL). Dix déterminants potentiels ont été retenus parmi l'ensemble des paramètres notés et mesurés au cours des observations des pratiques professionnelles. Les résultats sont présentés dans le tableau 30.

Tableau 30 : Résultats d'analyse statistique des déterminants de l'exposition cutanée totale et de l'imprégnation

Déterminants testés	Exposition cutanée totale		Imprégnation	
	Valeur de p	Valeur de R ²	Valeur de p	Valeur de R ²
Type de molécules	0,000	37,8%	0,9	1%
Concentration initiale de la substance active dans le produit commercial	0,000	15,8%	0,4	<1%
Masse de substance active appliquée	0,006	9,6%	0,5	0,6%
Masse préparée en substances actives	0,022	6,7%	0,8	0,0%
Matériel utilisé	0,010	8,3%	0,000	16,9%
Durée du traitement	0,5	<1%	0,000	16,5%
Activité de l'agent	0,023	4,6%	0,1	2,9%
Hygrométrie	0,5	<1%	0,9	0,0%
Vitesse du vent	0,3	1,3%	0,7	0,3%
Température	0,088	2,8%	0,9	0,0%

*En vert : les résultats dont les variables peuvent être considérées comme être des déterminants ;
En rouge : les résultats dont les variables ne peuvent pas être considérées comme des déterminants.*

la valeur de p (p value) ainsi que la valeur du R² (appelé aussi coefficient de détermination ou R-sq) permettent d'avoir une idée globale de l'ajustement du modèle. Un modèle est dit bien estimé lorsque la valeur de R² est élevée (proche de 100%) et que la valeur de la p value est faible et inférieure à 0,05 (seuil de risque 5%).

Le type de molécules utilisées est le déterminant de l'exposition cutanée (corps, mains et exposition totale) qui apparaît prédominant. La concentration initiale de la substance utilisée apparaît, à l'issue de cette étude statistique, être un déterminant non négligeable de l'exposition cutanée.

Quelle que soit l'unité utilisée pour exprimer les valeurs d'imprégnation (µg/g creat ou µg/L) les conclusions sont similaires.

Les analyses des déterminants des expositions cutanées et des imprégnations se rejoignent quant à la variable « matériel ». L'utilisation d'un pulvérisateur à dos conduirait à des niveaux d'expositions et d'imprégnations statistiquement plus élevés que lors de l'utilisation d'un pulvérisateur motorisé.

Dans le cadre de cette étude, il n'a pas été mis en évidence de relation statistiquement significative entre les mesures d'imprégnations urinaires et les variables « molécules, concentrations initiales ou masse de substance appliquée ». Ces variables, à l'inverse, constituent des déterminants de l'exposition cutanée. L'existence de cofacteurs entre les variables et/ou le nombre restreint des biomarqueurs à partir desquels l'analyse statistique des données a été réalisée, peuvent également expliquer cette différence de résultats.

La durée de traitement, elle, serait un déterminant des niveaux d'imprégnation.

Ces résultats rejoignent ceux de travaux obtenus par d'autres équipes de recherche. Pour exemple, Lebailly et al. (2008), n'ont pas mis en évidence de corrélation significative entre l'exposition cutanée potentielle totale et la durée de pulvérisation, la surface traitée. Le matériel utilisé a lui été significativement corrélé au niveau d'exposition totale (matériels étudiés différents de ceux de ce projet car à usage viticole). A noter que dans ces travaux, la masse de principe actif (Isoproturon) appliqué n'avait pas été positivement corrélée avec l'exposition cutanée totale.

- **le port de combinaison (quel que soit le type) et le nombre de couches de vêtements portés n'influent pas sur le niveau d'exposition cutanée.**

Deux autres déterminants ont été étudiés sur les données « expositions du corps » (sans prise en compte des données de contamination des mains), à savoir l'influence du port de la combinaison et du nombre de couches supérieures (hors combinaison).

L'influence du port de la combinaison a été étudiée uniquement sur les résultats d'exposition cutanée du corps. Ont été mis en parallèle les niveaux d'exposition des agents ayant porté des combinaisons de type 3 et 4 (n = 49 pour 10 substances actives différentes), de type 5 et 6 (n = 18 pour 5 substances actives différentes) et n'ayant pas porté de combinaison (n = 23 pour 10 substances actives différentes). Quel que soit le moyen de protection cutanée utilisé, les moyennes d'exposition ne sont statistiquement pas différentes ($p=0,5$ et $R^2=1,7$).

L'influence du nombre de couches supérieures (hormis combinaison) portées par les agents a été étudiée pour les agents s'étant protégés au moyen d'une combinaison de type 3 et 4. A ainsi été comparée l'influence du port d'1 couche (n = 16), versus 2 couches (n = 23), versus plus de 2 couches (n = 11). Quel que soit le nombre de couches portées par les agents, les niveaux d'exposition de ces derniers ne sont statistiquement pas différents ($p=0,6$ et $R^2=1,9$).

6.10.1. Analyse croisée Exposition cutanée totale et Imprégnation

L'étude des corrélations entre les données d'exposition cutanée totale (corps et mains) et urinaire a été menée. La conclusion suivante a été portée :

- **une relation statistiquement significative entre les niveaux d'expositions cutanées totaux (corps et mains) assujettis d'un coefficient de pénétration cutanée et les niveaux d'imprégnation urinaire a été définie.**

Pour les substances phytopharmaceutiques appliquées pour lesquelles un biomarqueur d'exposition a été défini, un coefficient d'absorption cutanée spécifique à chacune d'elles a été appliqué aux données d'exposition cutanée totale (corps et mains).

6.11. PRECONISATIONS

Les mesures de prévention majeures à mettre en œuvre lors de l'usage de produits phytopharmaceutiques sont indiquées dans la fiche « technique chimique » en annexe 14 du rapport final « Étude des risques et de l'organisation du travail, préconisations » accessible sur <http://www.compamed.fr/>.