



HAL
open science

Mobilité et biodisponibilité des contaminants présents dans les sols aux abords des infrastructures et impact sur la santé: utilisation de CALTOX pour la dispersion multimédia

Fabienne Marseille, Agathe Denot

► To cite this version:

Fabienne Marseille, Agathe Denot. Mobilité et biodisponibilité des contaminants présents dans les sols aux abords des infrastructures et impact sur la santé: utilisation de CALTOX pour la dispersion multimédia. [Rapport de recherche] Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU). 2007, 85 p., tableaux, illustrations, photos, graphiques, 11 références bibliographiques page 81. hal-02166979

HAL Id: hal-02166979

<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-02166979v1>

Submitted on 27 Jun 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Mobilité et biodisponibilité des contaminants présents dans les sols aux abords des infrastructures et impact sur la santé

*Utilisation de CALTOX
pour la dispersion multimédia*

RAPPORT INTERMÉDIAIRE

Certu

centre d'Études sur les réseaux,
les transports, l'urbanisme
et les constructions publiques
9, rue Juliette Récamier
69456 Lyon Cedex 06
téléphone: 04 72 74 58 00
télécopie: 04 72 74 59 00
www.certu.fr

Sétra

service d'Études techniques
des routes et des autoroutes
46, avenue Aristide Briand
B.P. 100
92225 Bagneux
téléphone: 01 46 11 31 31
télécopie: 01 46 11 31 69
www.setra.fr

Les collections du Certu

Collection Rapports d'étude : Cette collection se compose de publications proposant des informations inédites, analysant et explorant de nouveaux champs d'investigation. Cependant l'évolution des idées est susceptible de remettre en cause le contenu de ces rapports.

Collection Débats : Publications recueillant des contributions d'experts d'origines diverses, autour d'un thème spécifique. Les contributions présentées n'engagent que leurs auteurs.

Collection Dossiers : Ouvrages faisant le point sur un sujet précis assez limité, correspondant soit à une technique nouvelle, soit à un problème nouveau non traité dans la littérature courante. Le sujet de l'ouvrage s'adresse plutôt aux professionnels confirmés. Ils pourront y trouver des repères qui les aideront dans leur démarche. Mais le contenu présenté ne doit pas être considéré comme une recommandation à appliquer sans discernement, et des solutions différentes pourront être adoptées selon les circonstances.

Collection Références : Cette collection comporte les guides techniques, les ouvrages méthodologiques et les autres ouvrages qui, sur un champ donné, présentent de manière pédagogique ce que le professionnel doit savoir. Le Certu a suivi une démarche de validation du contenu et atteste que celui-ci reflète l'état de l'art. Il recommande au professionnel de ne pas s'écarter des solutions préconisées dans le document sans avoir pris l'avis d'experts reconnus.

Catalogue des publications disponible sur <http://www.certu.fr>

NOTICE ANALYTIQUE

n° procert: 52311 – 11

Organisme commanditaire : SETRA / CERTU		
Titre : Mobilité et biodisponibilité des contaminants présents dans les sols aux abords des infrastructures et impact sur la santé – Rapport intermédiaire.		
Sous-titre : Utilisation de CALTOX pour la dispersion multimédia	Date d'achèvement : mars 2007	Langue : Française
Organisme auteur : CETE de Lyon	Rédacteurs ou coordonnateurs : Fabienne Marseille (première partie) et Agathe Denot (seconde partie)	Relecteur assurance qualité : Cyril Bernagaud
<p>Résumé :</p> <p>Cette étude traite de l'ensemble de la chaîne de modélisation du risque par ingestion lié à un projet routier, du dépôt particulaire jusqu'à la dispersion dans les compartiments eau-sol-végétaux. Une première partie de ce travail est consacrée :</p> <ul style="list-style-type: none"> ● à l'étude bibliographique des paramètres qui interviennent dans le transfert des polluants dans les différents compartiments air-sol-végétaux. ● et au fonctionnement du logiciel CALTOX qui permet de modéliser ces transferts. L'influence de différents paramètres de transfert (Kps, Kd, ...) et d'exposition (quantité de fruits et légumes ingérée, durée d'exposition...) a été testée et discutée et il ressort de ce travail que CALTOX simplifie fortement le système. Seul un petit nombre de paramètres a une influence déterminante sur les résultats en sortie du modèle. <p>Une deuxième partie du travail a été consacrée à la mise en place d'une campagne de mesure afin de valider les résultats issus de la modélisation.</p> <p>Cette campagne de mesure a été réalisée au voisinage de l'A7. Elle a pour objectif d'une part d'évaluer les transferts de polluants dans les différents compartiments et pourra être utilisée d'autre part pour valider la modélisation de ces transferts.</p> <p>Cette campagne de mesure qui s'est déroulée en parallèle à la prise en main de CALTOX et aux premiers tests effectués sur le logiciel, est décrite en deuxième partie du document.</p> <p>Les résultats issus de la campagne de mesure sont assez contrastés. Le comportement des métaux dans les sols est fonction des éléments. Alors que pour l'arsenic et le mercure, aucune tendance significative n'est observable, pour le plomb, le zinc et le cadmium, une diminution des concentrations est notée en fonction de la distance à la chaussée.</p> <p>Les retombées de poussières insolubles sont bien corrélées avec la distance à la voie, mais la tendance n'est pas retrouvée au niveau des concentrations en métaux dans la fraction particulaire.</p> <p>Pour les végétaux, dans la zone de maraîchage, aucun enrichissement significatif en métaux n'est relevé sur les points de prélèvement les plus proches des voies.</p> <p>Au vu des résultats, cette campagne de mesure semble difficilement utilisable en l'état pour évaluer les résultats en sortie du modèle.</p>		
Remarques complémentaires éventuelles : Exploitation de la campagne de mesure pour évaluer le modèle CALTOX dans le cadre d'un projet routier		
Mots clés : dispersion multimédia caltox métaux HAP retombées particulaires infrastructures sol biodisponibilité contaminants		Diffusion : libre
Nombre de pages : 85	Confidentialité : non	Bibliographie : oui

Sommaire

Préambule.....	7
1. Contexte.....	8
2. Objectifs.....	9
3. Démarche.....	10
4. Test des principaux paramètres influençant les transferts sols – plantes.....	11
4.1. Principaux paramètres qui influencent la mobilité et la bio disponibilité des polluants dans les sols.....	11
4.2. Présentation de CALTOX.....	18
4.3. Feuilles de calcul à renseigner.....	19
4.4. Utilisation de CALTOX sur un cas concret.....	25
4.5. Évaluation de l'impact des paramètres d'entrée et de transferts introduits dans le modèle CALTOX sur le risque évalué.....	33
4.6. Conclusion.....	46
5. Mise en place et premiers résultats d'une campagne de mesure de la concentration en polluants dans la fraction particulaire, dans les sols et dans les végétaux pour évaluer le modèle.....	52
5.1. Campagne de mesures.....	52
5.2. Stratégie d'échantillonnage des différents milieux.....	59
5.3. Résultats.....	63
5.4. Conclusion	79
5.5. Perspectives.....	80
6. Bibliographie.....	81
Table des matières.....	82

Préambule

Cette étude a pour objectif de tester l'ensemble de la chaîne de modélisation du risque par ingestion lié à un projet routier.

Dans ce cadre une première partie de ce travail est consacrée à l'étude des paramètres qui interviennent dans le transfert des polluants dans les différents compartiments air-sol-végétaux et au fonctionnement du logiciel CALTOX qui peut modéliser ces transferts. Cette partie s'appuiera sur des résultats d'études déjà effectuées, même sil elles ne prennent en compte que partiellement la chaîne de modélisation.

Peu de documents existent dans le domaine et notamment de campagnes de mesures prenant en compte l'ensemble des compartiments impactés (air, sol, végétaux). A ce titre, une campagne de mesure visant à prendre en compte l'impact du trafic sur tous ces compartiments a été mise en place.

Cette campagne de mesure qui s'est déroulée en parallèle à la prise en main de CALTOX et aux premiers tests effectués sur le logiciel, est décrite en deuxième partie du document. La suite de ce travail, prévue en 2007, pourra s'appuyer sur les résultats obtenus et permettra de valider CALTOX sur un cas routier concret.

1. Contexte

L'évaluation des risques sanitaires par ingestion demande la prise en compte des transferts de polluants vers l'homme, par le biais du dépôt particulaire, via les sols, la chaîne alimentaire et éventuellement l'eau de consommation. Dans le cadre de projets routiers une attention particulière est portée aux deux premiers média de transferts : les sols et la chaîne alimentaire. L'exposition via l'eau de consommation n'est pas considérée ici, l'impact d'un projet routier sur les nappes faisant l'objet d'une étude à part entière qui alimente le volet eau de l'étude d'impact.

Les sols sont regardés comme milieu d'exposition pour les jeunes enfants ; on s'intéresse dans ce cas particulier aux aires de jeux pour jeunes enfants, les transferts pris en compte étant alors des transferts main-bouche.

Les sols sont également étudiés comme base de transfert vers la chaîne alimentaire. Dans le cadre de projets routiers, les principaux enjeux identifiés sont les transferts via des jardins potagers et des vergers privés. Les zones de maraîchages ainsi que les zones de pâtures peuvent également être prises en considération. Toutefois au vu des quantités de polluants déposées, il apparaît que le risque lié à des consommables qui vont être dispersés via leur commercialisation est assez faible.

En première approche nous focaliserons donc notre attention sur les sols et les transferts vers les fruits et légumes.

Depuis plusieurs années, l'INERIS¹ et l'ENSP² testent différents modèles multimédia d'exposition dans le cadre d'évaluation des risques sanitaires qu'ils réalisent sur diverses installations polluantes. De nombreuses études capitalisent ces expériences et seront utilisées dans le travail qui suit ainsi que les données d'évaluations des risques sanitaires déjà réalisées au sein du RST et notamment celles de l'A45, liaison autoroutière entre Lyon et Saint Étienne.

Au sein de ces travaux, le modèle CALTOX ressort par la fréquence de son utilisation. Il sera spécifiquement testé dans le cadre de cette étude. L'utilisation d'un modèle multimédia d'exposition tel que CALTOX pour l'évaluation des risques sanitaires nécessite de **connaître un certain nombre de paramètres afin de caractériser au mieux les différents milieux (fraction particulaire, eau, sols, végétaux).**

Toutes les données n'étant pas toujours disponibles il est souvent nécessaire d'utiliser des valeurs par défaut proposées par le modèle et issues de sites expérimentaux situés aux États-Unis, notamment au niveau de la caractérisation des sols, de la végétation et de l'exposition des populations.

Dans le cadre de projets routiers peu de résultats sont actuellement disponibles pour évaluer CALTOX. Les seules campagnes de mesure réalisées ne prennent pas en compte l'ensemble des média de transfert. La fraction particulaire n'a ainsi pas été mesurée dans le cadre d'évaluations des risques sanitaires liées aux projets routiers.

1 Ineris: Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques

2 ENSP : École Nationale de Santé Publique

2. Objectifs

Les objectifs de ce travail sont :

- d'étudier l'ensemble des paramètres qui influencent la mobilité des métaux dans les sols et leur biodisponibilité³ ;
- après une description du logiciel multimédia CALTOX :
 - de voir si les paramètres précédents sont directement demandés sous CALTOX, ou à travers quels autres paramètres ils vont être pris en compte. A titre d'exemple, nous verrons dans la suite de l'étude que le pH⁴ qui influence la mobilité et la biodisponibilité des métaux dans le sol est pris en compte à travers la valeur de Kd⁵,
 - d'évaluer les valeurs par défaut de ces paramètres introduites dans ce logiciel,
 - de proposer des valeurs ou des fourchettes de valeurs plus adaptées que celles fournies par le logiciel quand cela apparaît possible et d'évaluer l'impact de ces différentes valeurs sur la quantification des risques ; ceci afin d'identifier les paramètres présentant un enjeu fort sur les résultats et nécessitant d'être connus avec précision ainsi que les paramètres qui modifient peu le risque et qui peuvent être définis de manière plus sommaire,
 - d'évaluer la prise en compte par CALTOX du dépôt particulaire (possibilité d'entrer une concentration dans l'air et CALTOX modélise les retombées particulaires ou d'entrer directement un dépôt) ;
- Réaliser une campagne de mesure permettant l'évaluation du logiciel dans son intégralité, du dépôt particulaire jusqu'aux concentrations dans les végétaux.

3 Capacité d'un élément à être absorbé ou prélevé par un organisme vivant . Pour un système sol-plante, la biodisponibilité est l'aptitude d'un élément à être transféré du sol vers la racine de la plante. La biodisponibilité dépend de la spéciation de l'élément considéré, des conditions du milieu et de l'espèce microbienne ou végétale considérée.

4 PH : potentiel hydrogène, autrement dit mesure de l'acidité d'un sol

5 Kd : coefficient de partage du polluant entre la phase solide et la phase liquide dans le sol (ce paramètre est décrit dans la suite du document)

3. Démarche

Après une recherche bibliographique permettant de décrire les paramètres influençant la mobilité et la biodisponibilité des polluants dans les sols ainsi que leur transfert dans les différents compartiments environnementaux, une feuille de calcul CALTOX a été ouverte pour un polluant : le cadmium. L'ensemble des paramètres de calcul à intégrer dans la feuille a été discuté et les paramètres pouvant avoir une influence importante dans les processus de transferts de polluants spécifiques aux infrastructures routières ont fait l'objet de tests.

Ce travail s'appuie sur différentes études et campagnes de mesure afin de tester en conditions réelles les transferts entre les différents compartiments :

- A45, qui est l'une des premières études prenant en compte le risque par ingestion dans le cadre d'un projet routier (le dépôt particulaire est abordé uniquement à travers la modélisation, aucune mesure n'a été réalisée sur ce compartiment dans le cadre de cette étude) ;
- une étude bibliographique réalisée par Promeyrat en 2001 et qui mesure le dépôt particulaire, dû au trafic automobile, en bordure de l'autoroute A31 au voisinage de Metz ;
- une campagne de mesure mise en place en bordure de l'autoroute A6 et qui prend en compte les trois compartiments : dépôt particulaire, sol et végétaux. Cette campagne de mesure se fait sur plusieurs sites: une zone de maraîchage, une zone de pâture et une zone de verger.

Une description complète de la campagne de mesure et des résultats obtenus en 2006 est insérée en deuxième partie du document.

4. Test des principaux paramètres influençant les transferts sols – plantes

4.1. Principaux paramètres qui influencent la mobilité et la bio disponibilité des polluants dans les sols

4.1.1. Le pH

La mobilité et la biodisponibilité des métaux dans les sols sont directement concernées par le pH⁶. Toutefois ce paramètre ne fait pas partie des données d'entrées de la feuille de calcul. Son impact dans la chaîne de l'évaluation des risques sanitaires ne sera donc pas étudié.

Concernant le pH, on notera toutefois, de façon très générale, que lorsque les éléments sont chimiquement stables sous forme de cations (Cd, Ni, Pb, Cr(III)) leur solubilité augmente quand le pH diminue (acidification). Inversement pour les éléments stables sous forme anionique (Cr(VI) et As) leur solubilité augmente avec le pH c'est à dire pour des pH plus basiques.

Le pH des sols superficiels varie entre 4 et 8, notamment en fonction de la roche mère. La présence de carbonates (roches mères carbonatées) ou de silicates basiques (roches mères basaltiques), assure un tampon neutre à légèrement basique. En revanche, la présence de sulfates ou d'oxyhydroxyde de fer est plus propice à l'acidification des sols.

L'amplitude des variations de pH est largement pondérée par les constituants organiques ou minéraux du sol.

Une fourchette de pH des sols peut être proposée entre 4 et 8.

4.1.2. La teneur en matière organique des sols

Ce paramètre a également une influence importante sur la mobilité et la biodisponibilité des métaux dans les sols. Il est à intégrer dans la feuille de calcul CALTOX et sera donc testé dans la suite de l'étude.

Le rôle de la matière organique dans les processus de mobilisation-immobilisation des polluants métalliques dans les sols est assez complexe. La plupart des composés organiques ou minéraux du sol (matière organique, argiles, oxy-hydroxydes de fer) possède des charges positives ou négatives de surface qui peuvent jouer un rôle dans l'échange ou l'absorption d'ions. Le processus d'adsorption dépend du nombre de charges ou de sites d'adsorption présents à leur surface et de leur réactivité. Ces deux grandeurs sont dépendantes des propriétés intrinsèques du constituant qui sert de support et des conditions physico chimiques de la solution.

Globalement la matière organique des sols tend à immobiliser les polluants cationiques, adsorption sur les ligands organiques insolubles. Toutefois, lorsqu'elle passe en solution la matière organique augmente la solubilité de ces mêmes polluants et peut favoriser leur mobilisation. **Globalement il est à retenir que les sols très organiques tendent à immobiliser les polluants métalliques dans les sols.**

Des fourchettes de concentration pour la matière organique des sols peuvent être proposées⁷ :

Sols : 0.5 % - 10 %

Sols agricoles : 0.5 % - 3 %

6 Mobilité et transfert racinaire des éléments traces : influence des micro-organismes du sol/Sylvie Deneux-Mustin, Sylvie Roussel-Debet, Christian Mustin et al.; Pref. Elisabeth Leclerc-Cessac. Paris : Tec et Doc, 2003

7 Abrégé de pédologie- Duchaufour 1984 Ed Masson

4.1.3. La teneur en argile

Les sols très argileux immobilisent davantage les polluants que les sols sableux. Ce paramètre peut être pris en compte à travers la porosité. La porosité n'est toutefois pas demandée dans la version 2,3 de CALTOX, version actuellement utilisée par les bureaux d'études. Cette notion est introduite dans la version 4,0 de CALTOX, (version Béta), non encore validée. **Ce paramètre ne sera donc pas évoqué dans la présente étude.**

4.1.4. Le coefficient de partage ou Kd

Le Kd⁸ fait partie des paramètres à renseigner dans CALTOX. Le Kd est défini par le rapport à l'équilibre de l'élément (en l'occurrence le polluant métallique) dans la phase solide et dans la phase liquide ; plus précisément, par sa concentration dans la phase solide rapportée à celle dans la phase liquide du système sol/solution du sol.

Le coefficient de partage ou de distribution Kd est le paramètre le plus couramment utilisé pour caractériser le résultat des mécanismes de rétention d'un élément dans un sol.

Des variations importantes de Kd peuvent être observées en fonction du pH pour un grand nombre de sols et pour certains éléments. Schématiquement le Kd des espèces cationiques croît avec le pH du sol et inversement pour les espèces anioniques.

Les processus strictement physico-chimiques susceptibles d'influencer la biodisponibilité et le comportement chimique des éléments peuvent être divisés en deux groupes :

- Ceux favorisant l'immobilisation : adsorption par des ligands organiques insolubles, précipitation, échange ionique sur les minéraux argileux, agrégation de colloïdes et de particules ;
- Ceux favorisant globalement leur mobilité et leur dispersion : formation de complexes solubles (majoritairement organiques), dissolution acide ou oxydoréductrice de phases porteuses (argiles, oxyhydroxydes de fer de manganèse et d'aluminium, minéralisation des matières organiques).

Le tableau qui suit présente plusieurs valeurs de Kd issues de différentes sources bibliographiques. Les valeurs de l'US EPA sont spécifiques de valeurs de pH. Les données de Base et Coll ainsi que celles de Sauvé et Coll sont issues d'une recherche bibliographique plus large.

8 Mobilité et transfert racinaire des éléments traces : influence des micro-organismes du sol/Sylvie Deneux-Mustin, Sylvie Roussel-Debet, Christian Mustin et al.; Pref. Elisabeth Leclerc-Cessac. Paris : Tec et Doc, 2003

**Valeurs de K_D proposées pour les métaux par différentes sources bibliographiques
(extrait du rapport de l'institut national de santé publique du Québec concernant
la politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés⁹)**

Métal	Base et coll 1984	US EPA 1996 ¹		Sauvé et coll	
		PH =4.9	PH=6.8	Moyenne de K_d observée ²	Intervalle de K_d
Arsenic	200 ³	25	29	13119	1.6-530000
	3.3 (As III) ⁵				
	6.7 (As V) ⁵				
Cadmium	6.7 ⁶	15	75	2869	0.44-192000
Chrome	850 ³	1200 (Cr III)	1.8*10 ⁶ (Cr III)	14920	125-65609
		31 (Cr VI)	19 Cr Vi		
Cuivre	35 ⁶			4799	6.8-82850
Mercure	10 ³	0.04 (HgII)	52 (HgII)	8946	4286-16500
Nickel	150 ³	16	65	16761	8.9-256842
Plomb	900 ⁷			172214	60.56-2304732
	400 ⁶				
zinc	40 ⁷	16	62	11615	1.4-320000
	38 ⁶				

¹: valeur estimée pour une fraction de carbone organique de 0.2 %

²: calculé comme le ratio : concentration totale du métal dans l'eau du sol sur la concentration totale de métal dans le sol de surface.

³: valeur dérivée des facteurs de bioconcentration dans la partie végétative des plantes

⁵: valeur moyenne rapportée par Base et Sharp 1983

⁶: moyenne géométrique des valeurs observées dans la littérature pour des sols agricoles (pH moyen = 6.7 et 4.5 < pH < 9)

⁷: valeur par défaut retenues par Base et coll 1984

⁹ Validation des critères B et C de la politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés – protection de la santé humaine – Institut National de la Santé Publique du Québec (annexe 2)
http://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/381-Validation_Sols_Annexes.pdf

Quel que soit le polluant, les fourchettes de K_d proposées sont très larges.

Pour le cadmium, la synthèse bibliographique précédente conduit à proposer la fourchette suivante 0,44–192000. La valeur par défaut introduite dans CALTOX, 5.105 ne rentre toutefois pas dans cette fourchette. Nous évaluerons l'impact de ce paramètre dans le calcul des risques sanitaires par ingestion en testant la borne basse de la fourchette ainsi que la valeur par défaut donnée dans CALTOX.

4.1.5. Comportement par polluant

Les spécificités de comportement des différents polluants métalliques, énoncés dans la note méthodologique annexée à la circulaire du 25 février 2005, sont abordées ci-dessous. L'ensemble des éléments communiqués est issu de Deneux-Mustin et al, 2003¹⁰.

4.1.5.1. Arsenic

L'arsenic présente de multiples valences. Dans les sols, l'arsenic se trouve essentiellement sous forme d'arséniate AsO_4^{3-} et d'arsenite AsO_3^{3-} . En condition neutre, les formes solubles de l'arsenic s'adsorbent fortement aux oxyhydroxydes de fer et de manganèse mais peuvent être aussi adsorbées par les argiles, ce qui limite fortement leur mobilité. **La mobilité et la biodisponibilité de l'arsenic sont principalement influencées par les conditions d'oxydo réduction du milieu qui vont changer son degré d'oxydation.** De plus la solubilité de l'arsenic sous forme anionique stable augmente quand le pH augmente.

4.1.5.2. Cadmium

En solution, le cadmium se trouve essentiellement sous forme de cation Cd^{2+} . Le pH est le facteur qui régit la mobilité du cadmium dans les sols. Le pH de précipitation du cadmium est voisin de 6,7.

Les valeurs de K_d du cadmium montrent que cet élément est susceptible de migrer assez facilement dans les sols surtout dans les sols sableux et limoneux, moins riches en matière organique. En moyenne pour le cadmium, les coefficients de transferts sont compris entre 1 et 10. Cependant les différences entre végétaux sont importantes. Les légumes racines (carotte, pomme de terre), les légumes feuilles (salade, épinard) ont un transfert 3 à 5 fois plus important que les céréales.

4.1.5.3. Chrome

Dans les sols, le chrome est principalement présent sous les degrés d'oxydation III et VI. La mobilité du chrome III est faible alors que celle du Cr(VI) est élevée. Ces formes sont présentes en quantités variables en fonction du pH et surtout selon la teneur en oxyde de manganèse et matière organique. La réduction du Cr(VI) par la matière organique et autres donneurs d'électrons est favorisée par des pH inférieurs à 6. Les formes réduites et oxydées du chrome sont toutes les deux susceptibles d'être transférées au végétal. Actuellement, les études existantes sont parfois contradictoires et difficiles à interpréter en raison de la forte réactivité oxydo réductrice du chrome.

4.1.5.4. Nickel

Le nickel est présent en solution essentiellement sous forme Ni^{2+} . Le nickel est soluble à pH inférieur à 6-7.

Le comportement du nickel dans le système sol-plante est très variable selon son origine. Dans la plupart des sols, le nickel est un élément de mobilité moyenne et sa rétention dépend essentiellement du pH du sol et de sa teneur en matière organique.

Le transfert sol-plante est très variable selon les conditions d'aération du sol, son origine, sa concentration et le type de végétal étudié.

¹⁰ Mobilité et transfert racinaire des éléments traces : influence des micro-organismes du sol/Sylvie Deneux-Mustin, Sylvie Roussel-Debet, Christian Mustin et al.; Pref. Elisabeth Leclerc-Cessac. Paris : Tec et Doc, 2003

4.1.5.5. Plomb

Le plomb interagit fortement avec les constituants du sol et se trouve fortement associé à la matière organique. **Le plomb est un des éléments les moins mobiles des sols surtout ceux riches en matière organique.** Le pH joue un rôle dans la mobilité du plomb. Plus le pH est faible plus le plomb passe en solution.

En général les plantes accumulent peu le plomb, qui possède d'ailleurs des coefficients de transfert très faibles.

4.1.6. Influence de l'espèce végétale

Les transferts de polluants sols/plantes sont fonction de nombreux facteurs tels que les conditions environnementales. Par exemple, le transfert des polluants du sol vers les plantes est fonction :

- du type de sol (pH, teneurs en argile, en matières organiques, en oxydes de fer, en oxydes de manganèse) ;
- du niveau de contamination dans le sol.

La biodisponibilité des métaux est fortement liée à leur mobilité même si d'autres paramètres, spécifiques au végétal, interviennent comme par exemple : l'espèce, la variété végétale considérée, l'organe et de l'âge de la plante¹¹.

- **Espèces :** pour le cadmium, les concentrations dans les parties comestibles se classent par ordre décroissant : (épinard, laitues) > carotte > (pêche, pomme) ;
- **Variété :** au sein d'une même espèce, la concentration dans la plante varie selon la variété. Pour la laitue, par ordre décroissant : Summer Bibb > Belmay > Romaine ;
- **Âge :** en général, les concentrations en éléments traces sont plus fortes dans les jeunes pousses ;
- **Organe :** dans la plante les métaux se stockent dans les différents organes comme suit : concentrations en métaux décroissantes : racines > tiges > feuilles > graines > fruits et tubercules

Aussi, les valeurs reportées dans les sources bibliographiques pour ces différents facteurs peuvent être très différentes. Ces coefficients sont parfois exprimés sous la forme de fourchette qui peuvent couvrir plusieurs ordres de grandeur.

Teneurs naturelles des végétaux cultivés en éléments traces (en PPM¹²)

As 0 - 1,5	Cd 0 - 1	Cr 0 - 3	Hg 0 - 0,5	Ni 0,1 - 6	Pb 0,01 - 4	Se 0 - 1	Zn 10 - 50
Chou Luzerne Oignon	Épinard Salade Céleri branche Endive	Féтуque Poireau Pomme de terre	Pulpe de betterave Épinard Chou pommé	Chou frisé Persil	Féтуque Poireau	Cèpe Ail Chou blanc Poivron rouge	Son de blé Oignon Raifort Pissenlit

11 <http://www.acta.asso.fr/epuration/data/pages/f34.htm> Quelques essais au champ en France [extrait de la brochure ADEME à paraître : "Etat de l'art sur les transferts d'ET des sols vers les plantes cultivées à vocation alimentaire"]

12 PPM : Partie par million (mg/kg de sol par exemple)

4.1.7. Facteurs de transfert des polluants dans les végétaux

La contamination des végétaux peut se faire par plusieurs voies :

Trois principales sont retenues pour évaluer les transferts de polluants vers le végétal :

- les transferts sol/plante via l'absorption racinaire,
- les transferts air / plante via le dépôt particulaire sur les parties aériennes des végétaux
- et les éclaboussures de sols contaminés vers les parties aériennes des végétaux lors d'épisodes pluvieux.

À ces différents modes de transfert sont associés des coefficients, établis lors d'études expérimentales (mesure des concentrations en polluants de sols et de végétaux dans des milieux contrôlés, en serre par exemple pour éviter tout transfert par voie aérienne lors de mesure de coefficients de transferts racinaires, ou par culture hors sols en présence de retombées particulières pour évaluer les transferts air/plante) ou par modélisation.

Le transfert des métaux par absorption foliaire est considéré comme négligeable. Les transferts des polluants métalliques se réduisent donc à un transfert des polluants par retombées sur les feuilles (indépendant des polluants) ou les fruits et à un transfert racinaire.

La concentration dans les végétaux peut-être calculée à partir de deux équations reprises de la feuille Excel de CALTOX :

$$C_{\text{végétaux exposés}} = (C_{\text{air}} \times K_{\text{pa-part}}) + (C_{\text{sols superficiel}} \times \text{rainsplash}) + (C_{\text{sol racinaire}} \times K_{\text{ps}})$$

$C_{\text{végétaux exposés}}$: concentration en polluant dans les parties aériennes de la plante (végétal dont on consomme les parties aériennes et donc exposées aux retombées particulières) (mg/kg)

C_{air} : concentration du polluant dans l'air à l'état initial (mg/m³)

$C_{\text{sol superficiel}}$: concentration du polluant dans le sol superficiel (mg/kg sol Poids Sec (PS))

$C_{\text{sol racinaire}}$: concentration du polluant dans le sol racinaire (mg/kg sol PS)

$K_{\text{pa-part}}$: facteur de transfert des particules de l'air vers la plante (m³/kg Poids Frais (PF))

rainsplash : facteur d'éclaboussures du sol vers les plantes (mg.kg⁻¹ PF plante / mg.kg⁻¹ PS sol)

K_{ps} : facteur de transfert de polluant du sol vers la plante (mg.kg⁻¹ PF plante/mg.kg⁻¹ PS sol)

$$C_{\text{végétaux non exposés}} = C_{\text{sol racinaire}} \times K_{\text{ps_root}}$$

$C_{\text{végétaux non exposés}}$: concentration en polluant dans les parties racinaires de la plante (végétal dont on consomme les parties racinaire, racines, tubercules, et donc non exposées aux retombées particulières) (mg/kg)

$K_{\text{ps_root}}$ = facteur de transfert du sol vers les parties racinaires de la plante (ou légumes racines) (mg.kg⁻¹ PF plante/mg.kg PS sol)

NB : Ces équations correspondent au cas précis des polluants particuliers uniquement, en l'absence de nappe souterraine et sans autre source de pollution que les concentrations ubiquitaires dans l'environnement.

Gamme des facteurs de transfert des polluants métalliques du sol vers les végétaux issus des études de l'INERIS, des équations HHRAP¹³ ou éventuellement de CALTOX.

	Légumes-feuilles	Légumes-fruits	Fruits	Herbe	Légumes-racines
As	$3,35.10^{-4} - 8,00.10^{-2}$	$3,85.10^{-4} - 2,90.10^{-1}$	$3,85.10^{-4} - 2,90.10^{-1}$	$3,85.10^{-4} - 2,9.10^{-1}$	$1,44.10^{-3} - 8,00.10^{-2}$
Cd	$6,63.10^{-3} - 3,00.10^{-1}$	$1,05.10^{-2} - 3,00.10^{-1}$	$2,13.10^{-2} - 3,00.10^{-1}$	$7,28.10^{-2} - 3,00.10^{-1}$	$1,15.10^{-2} - 3,00.10^{-1}$
Cr	$2,59.10^{-4} - 5,20.10^{-3}$	$4,10.10^{-4} - 1,00.10^{-2}$	$8,30.10^{-4} - 1,00.10^{-2}$	$1,50.10^{-3} - 1,00.10^{-2}$	$8,10.10^{-4} - 3,90.10^{-3}$
Cu	$4,98.10^{-4} - 3,40.10^{-3}$	$7,48.10^{-4} - 3,40.10^{-3}$	$2,04.10^{-3} - 3,40.10^{-3}$	$3,20.10^{-3} - 3,40.10^{-3}$	$1,01.10^{-3} - 3,40.10^{-3}$
Ni	$4,93.10^{-4} - 1,0.10^{-2}$	$7,82.10^{-4} - 2,60.10^{-2}$	$1,58.10^{-3} - 2,60.10^{-2}$	$2,40.10^{-3} - 3,70.10^{-2}$	$1,44.10^{-3} - 1,00.10^{-2}$
Pb	$7,21.10^{-4} - 5,40.10^{-2}$	$1,14.10^{-3} - 1,10.10^{-2}$	$2,31.10^{-3} - 1,10.10^{-2}$	$6,00.10^{-3} - 4,40.10^{-1}$	$1,62.10^{-3} - 4,10.10^{-2}$
Zn	$1,70.10^{-3} - 9,16.10^{-2}$	$7,31.10^{-4} - 9,16.10^{-2}$	$2,04.10^{-3} - 9,16.10^{-2}$	$1,10.10^{-2} - 9,16.10^{-2}$	$2,52.10^{-3} - 9,16.10^{-2}$

Pour l'ensemble des polluants étudiés une synthèse bibliographique a permis d'établir des fourchettes pour ces coefficients de transfert sol/végétaux¹⁴. Pour l'ensemble des polluants les fourchettes énoncées sont assez larges avec un ordre de grandeur souvent compris entre 100 et 1000 entre la borne inférieure et la borne supérieure.

Gamme des facteurs de transfert du baryum et du B(a)P du sol vers les végétaux issus des études de l'INERIS, des équations HHRAP

	Légumes-feuilles	Légumes-fruits	Fruits	Herbe	Légumes-racines
Ba	$1,71.10^{-3}$	$2,70.10^{-3}$	$5,47.10^{-3}$	$3,00.10^{-2}$	$2,70.10^{-3}$
B(a)P	$2,80.10^{-3}$	$5,60.10^{-4}$	$5,60.10^{-4}$	$2,80.10^{-3}$	$5,50.10^{-4}$

Facteurs de transfert du baryum (Ba) et du benzo(a)pyrène (B(a)P) du sol vers les végétaux par défaut dans CALTOX

	Légumes-feuilles	Légumes-fruits	Fruits	Herbe	Légumes-racines
B(a)P	$7,71.10^{-4}$	$7,71.10^{-4}$	$7,71.10^{-4}$	$7,71.10^{-4}$	$7,71.10^{-4}$

13 HHRAP : US-EPA, Human Health Risk Assessment Protocol for hazardous waste combustion facilities (HHRAP), Peer review draft, Office of Solid Waste, EPA/530/0-98/001A, 1998

14 Étude bibliographique réalisée à partir des données de l'INERIS, de la méthodologie HHRAPet de CALTOX réalisée par Biomonitor dans le cadre de l'étude d'impact du projet A45 (CETE de Lyon, septembre 2005)

4.2. Présentation de CALTOX

CALTOX est un modèle multimédia d'exposition développé sous la forme d'une feuille de calcul Excel, par l'université de BERKELEY pour le compte de l'agence californienne de l'Environnemental Protection Agency. Il a été conçu pour aider à évaluer l'exposition humaine liée à des sites pollués et à définir des seuils de réhabilitation des sols. Suite à une modification de son code de calcul, il peut actuellement prendre en compte un flux continu de polluant comme terme source. Il a été testé par l'Ineris et l'École Nationale de Santé Publique plusieurs fois dans le cadre d'évaluation des risques sanitaires liés à des Usines d'Incinérations d'Ordures Ménagères. Ainsi pour l'Ineris, CALTOX apparaît comme un des modèles multimédia les plus intéressants à l'heure actuelle pour estimer les expositions à une échelle locale¹⁵.

Le logiciel CALTOX consiste en une feuille de calcul unique, nommée CALTOX.xls regroupant et permettant de visualiser l'ensemble :

- des paramètres d'entrée ;
- du code de calcul ;
- des résultats intermédiaires et finaux.

Le logiciel CALTOX peut être utilisé soit pour réaliser une évaluation des risques sanitaires complète et fournir un risque comme résultat final, soit pour obtenir des concentrations dans les différents milieux investigués après dispersion.

Diverses version du logiciel CALTOX existent. La version 2.3 est actuellement la seule validée. Une nouvelle version CALTOX 4 est parue mais elle reste pour le moment sous une version beta. Nous avons donc réalisé ce travail sous la version 2.3 de CALTOX.

Les données à intégrer au sein de la feuille de calcul sont classées en différents compartiments :

- le premier dédié aux propriétés physico-chimiques des polluants ;
- le second permet de caractériser les transferts entre différents compartiments en relation avec un site spécifique ;
- le dernier est consacré aux facteurs d'exposition des populations.

Le tableau qui suit, issu de la notice CALTOX, regroupe les différentes zones de la feuille de calcul.

¹⁵ Le logiciel de calcul CALTOX – Rapport final. Ministère du développement durable 7 juin 2004. INERIS DRC-04-45959-ERSA-RBnn°097/caltox3

Les différentes zones de la feuille de calcul CALTOX

Home page Inputs Entrées Outputs Sorties Page 1	Exposure histogram Histogramme présentant l'exposition des populations Page 7	Calculated properties Propriétés calculées Page 13
Chemical properties Propriétés chimiques des polluants Page 2	Exposure pathway on/off Toggles Sélection des voies d'expositions Page 8	Calculated properties, warnings, and error messages Propriétés calculées, messages d'avertissement et d'erreur Page 14
Chemical properties (continued) and Landscape properties Suite des propriétés chimiques des polluants et caractéristiques du site Page 3	Potential-dose matrix Doses potentielles dans les différents compartiments Page 9	Fugacities, compartment volumes, and fugacities capacities Page 15
Landscape properties (continued) Caractéristiques du site et facteurs d'expositions Page 5	Exposure-media concentration table Concentration d'exposition Page 10	Diffusion and advection rate constants Page 16
Landscape properties (continued) and Exposure factors Suite des caractéristiques du site et facteurs d'exposition Page 5	Table of time-dependent cumulative doses within the populations Page 11	Compartment gains and losses, residence times, inventories, and concentrations Page 17
Exposure factors (continued) Facteurs d'expositions Page 6	Information for offsite transfers Page 12	Time dependent compartment inventories in the soil layers Page 18

L'ensemble des tableaux concernant des données à renseigner dans la zone de calcul sont repris dans la suite du document. CALTOX évaluant le risque relatif polluant par polluant, le cadmium a été choisi. Les différents paramètres à renseigner concernent donc plus spécifiquement ce polluant dans un premier temps.

4.3. Feuilles de calcul à renseigner

L'ensemble des paramètres à renseigner a été traduit, en utilisant notamment le rapport de Pillebout (2003)¹⁶ (annexe 2). Tous ces paramètres ne seront pas à renseigner pour l'évaluation de risques sanitaires liés à la consommation de fruits, légumes et sols (pour les jeunes enfants) présents dans les zones exposées aux retombées de polluants émis par les infrastructures routières.

Dans la liste qui suit seuls les voies d'exposition renseignées avec un « 1 », seront pris en considération par le modèle.

¹⁶ Anne Pillebout 2003. CALTOX pour l'estimation des expositions liées aux rejets d'une grande installation. Mémoire de l'école nationale de la santé publique.

Les évaluations des risques sanitaires, jusqu'à présent conduites en liaison avec des projets routiers, n'ont pas été réalisées dans leur ensemble avec CALTOX. Le logiciel a été utilisé uniquement pour la dispersion multimédia, les données de consommations spécifiques à la France sont ensuite utilisées pour calculer les quantités d'aliments ingérées et par ce biais les quantités de polluants. Les données de sortie CALTOX utilisées sont donc les concentrations en métaux dans les sols et végétaux, c'est à dire des données intermédiaires.

Choix des voies d'exposition dans CALTOX

Exposure Pathway-Include-and-Exclude Toggles

All inhalation exposures indoors active	0	Contaminant transfer, air to plants surfaces	1
All inhalation exposures indoors resting	0	Contaminant transfer, ground soil to plant surfaces	1
Inhalation exposure in shower/bath	0	Contaminant transfer, root soil to plant tissues	1
Inhalation exposures outdoors active	0	On-site grazing of animals	0
Inhalation of air particles indoors	0		
Transfer of soil dust to indoor air	0	Ingestion of home-grown exposed produce	1
Transfer of soil vapors to indoor air	0	Ingestion of home-grown unexposed produce	1
On-site inhalation by animals	0	Ingestion of home-grown meat	0
		Ingestion of home-grown milk	0
Use of ground water as tap water	0	Ingestion of home-grown eggs	0
Use of surface water as tap water	0	Ingestion of locally caught fish	0
Ingestion of tap water	0	Direct soil ingestion	1
Use of ground water for irrigation	0	Soil contact exposure at home or at work	0
Use of surface water for irrigation	0	Dermal exposure during shower/bath	0
		Dermal & ingestion exposures while swimming	0
Use of ground water for feeding animals	0		
Use of surface water for feeding animals	0	Breast-milk ingestion by infants	1

4.3.1.1. Voies d'entrée du polluant

Les données d'entrées à renseigner dans le cadre de nos projets routiers sont les apports particuliers via l'atmosphère ou la concentration en particules dans l'air.

Nous considérons dans nos projet qu'il s'agit là des seuls apports possibles.

Les concentrations de fond en polluants mesurées dans les sols ne sont pas intégrées à ce niveau comme apport en continu. Dans l'étude A45, les concentrations de fond ont été directement intégrées dans la formule de calcul des concentrations dans différents milieux (cf annexe 3).

De nombreux paramètres ont été conservés par défaut, notamment l'ensemble des paramètres qui concernent les caractéristiques physico-chimiques de l'élément.

4.3.1.2. Paramètres à renseigner

L'ensemble des paramètres à renseigner est reproduit dans les tableaux qui suivent. Les paramètres qui ont fait l'objet d'une attention particulière sont également décrits, soit pour indiquer quelle valeur est prise ou conservée par défaut, soit pour signaler qu'ils ont été testés dans la suite du travail.

4.3.1.2.1. Les paramètres physico chimiques

Paramètres physico chimiques caractérisant le polluant

Molecular weight (g/mol)	MW
Octanol-water partition coefficient	Kow
Melting point (K)	Tm
Vapor Pressure in (Pa)	VP
Solubility in mol/m ³	S
Henry's law constant (Pa·m ³ /mol)	H -
Diffusion coefficient in pure air (m ² /d)	Dair
Diffusion coefficient; pure water (m ² /d)	Dwater
Organic carbon partition coefficient Koc	Koc -
Partition coefficient in ground/root soil layer	Kd_s -
Partition coefficient in vadose-zone soil layer	Kd_v -
Prtn cff. plnt(abv-grd)/sl (kg[s]/kg[pFM])	Kps -
Biotransfr fctr, plant/air (m ³ [a]/kg[pFM])	Kpa -

(L'ensemble de ces paramètres est traduit en annexe 2)

4.3.1.3. Les coefficients de partage ou de transferts entre différents milieux

L'impact des coefficients de partage Kd entre la phase liquide et la phase solide du sol et de bio transfert sol/plante Kps ou plante/air Kpa sur la dispersion des polluants dans les différents milieux d'exposition a été testé dans la suite du document en utilisant des fourchettes de coefficients issues de la bibliographie.

D'autres paramètres ont été laissés par défaut mais ne seront à priori pas utilisés car ne concernent pas les voies d'exposition à prendre en compte dans les études de risques liés aux projets routiers (exposition via les sédiments, la pêche, l'ingestion de produits animaux ou dérivés, œuf, lait, transfert cutané etc).

Des commentaires sur certains des paramètres à intégrer dans la feuille de calcul CALTOX sont énoncés en annexe du document.

Paramètres physico chimiques caractérisant le polluant (suite)

Partition coefficient in vadose-zone soil layer	Kd_v -
Partition coefficient in aquifer layer	Kd_q -
Partition coeffic. in surface wtr sediments	Kd_d -
Biotransfer factor; cattle-diet/milk (d/L)	Bk -
Biotransfer factor; cattle-diet/meat (d/L)	Bt -
Biotransfer factor; hen-diet/eggs (d/L)	Be -
Biotransfr fctr; brst mlk/mthr intake (d/kg)	Bbmk -
Bioconcentration factor; fish/water	BCF -
Skin permeability coefficient; cm/h	Kp_w -
Fraction dermal uptake from soil	dfct_sl-
Reaction half-life in air (d)	Thalf_a
Reaction half-life in surface soil (d)	Thalf_g
Reaction half-life in root-zone soil (d)	Thalf_s
Reaction half-life in vadose-zone soil (d)	Thalf_v
Reaction half-life in ground water (d)	Thalf_q
Reaction half-life in surface water (d)	Thalf_w
Reaction half-life in sediments (d)	Thalf_d

4.3.1.3.1. Les temps de demie vie

Les temps de demie vie (reaction half life) sont spécifiques d'une substance dans un milieu donné. Pour les isotopes ils dépendent de leur temps de désintégration, pour les polluants organiques ils dépendent de leur vitesse de décomposition, elle même dépendante de plusieurs facteurs, certains intrinsèques à la molécule plus ou moins stable et d'autres spécifiques au milieu dont l'activité microbienne. On peut donc considérer ces facteurs comme dépendants du site.

Pour les métaux pris sous leur forme élémentaire. Ce facteur n'est pas pris en compte. Les métaux ne se décomposent pas et ne se transforment pas.

4.3.1.3.2. Propriétés du site

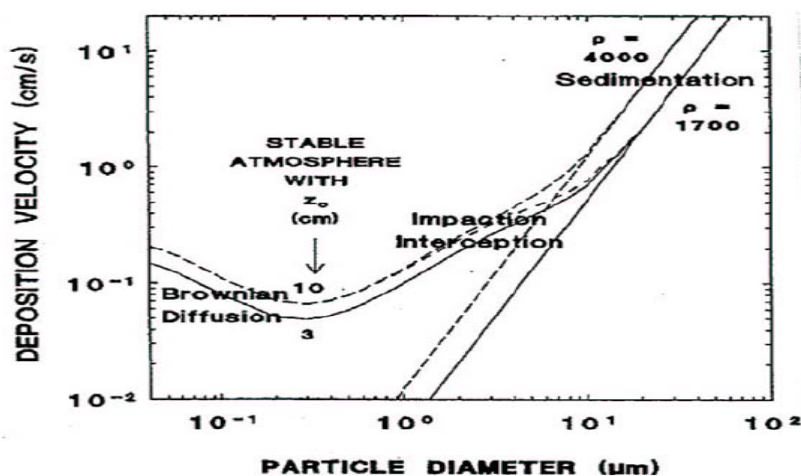
Au niveau des propriétés du site, la surface impactée est à prendre en considération. Des données météorologiques assez simples sont également à intégrer (vitesse du vent, pluviométrie, température moyenne annuelle).

4.3.1.3.3. Vitesse de déposition

Une vitesse de déposition des particules est également intégrée afin de calculer la quantité de polluants déposée à partir de la concentration en polluant sous forme particulaire dans l'air.

La vitesse de déposition intégrée de 690m/j se situe dans la gamme des vitesses de déposition énoncées dans la littérature 40 à 800 m/j pour des tailles de particules de l'ordre de 1 à 10 μ m.

Vitesse de déposition d'une particule en fonction de sa taille



L'impact de ce paramètre sur les concentrations modélisées dans les différents milieux d'exposition après dispersion a été testé.

La valeur de la charge en poussière de l'atmosphère (rhob_a) a également été conservée par défaut. Elle correspond en effet, aux valeurs classiquement mesurées par les AASQA¹⁷. L'épaisseur de la couche limite d'air au contact du sol a également été conservée par défaut, cette valeur correspondant à une valeur communément retrouvée dans la littérature.

Les autres paramètres sont gardés par défauts.

Paramètres caractéristiques du site

¹⁷ Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air

contaminated area in m ²	Area
annual average precipitation (m/d)	rain
atmospheric dust load (kg/m ³)	rhob_a
deposition velocity of air particles (m/d)	v_d
plant dry mass inventory (kg[DM]/m ²)	bio_inv
plant dry-mass fraction	bio_dm
plant fresh-mass density kg/m ³	rho_p
thickness of the ground soil layer (m)	d_g
soil particle density (kg/m ³)	rhos_s
water content in surface soil (vol fraction)	beta_g
air content in the surface soil (vol frctn)	alpha_g
erosion of surface soil (kg/m ² -d)	erosion_g
thickness of the root-zone soil (m)	d_s
water content of root-zone soil (vol. frctn.)	beta_s
air content of root-zone soil (vol. frctn.)	alpha_s
thickness of the vadose-zone soil (m)	d_v
water content; vadose-zone soil (vol. frctn.)	beta_v
air content of vadose-zone soil (vol. frctn.)	alpha_v
ambient environmental temperature (K)	Temp
organic carbon fraction in upper soil zone	foc_s
bdry lyr thickness in air above soil (m)	del_ag
yearly average wind speed (m/d)	v_w

Les paramètres qui suivent ont été laissés par défaut et n'ont fait l'objet d'aucune attention car ils ne sont pas pris en compte dans les processus de transfert intervenant dans le cadre de projets routiers (impact de la pollution sur les pièces d'eau, et la nappe non pris en compte).

4.3.1.3.4. Flux d'eau entrants et sortants du site

Les flux d'eau entrant et sortant du site et pouvant entraîner des flux de polluants par ce biais ont été considérés nuls. L'érosion du sol de surface pouvant entraîner une partie des polluants hors du site a également été prise égale à zéro.

4.3.1.3.5. Épaisseur de la zone de sol

L'épaisseur de la zone de sol de surface prise en compte est de 20 cm, ce qui représente l'épaisseur de la couche de labour à l'intérieur de laquelle on peut considérer une zone de sol de composition homogène.

Paramètres caractéristiques du site (suite)

flux; surface water into landscape (m/d)	inflow
land surface runoff (m/d)	runoff
ground-water recharge (m/d)	recharge
evaporation of water from surface wtr (m/d)	evaporate
thickness of the aquifer layer (m)	d_q
solid material density in aquifer (kg/m ³)	rhos_q
porosity of the aquifer zone	beta_q
fraction of land area in surface water	f_arw
average depth of surface waters (m)	d_w
suspended sedmnt in surface wtr (kg/m ³)	rhob_w
suspended sdmnt deposition (kg/m ² /d)	deposit
thickness of the sediment layer (m)	d_d
solid material density in sediment (kg/m ³)	rhos_d
porosity of the sediment zone	beta_d
sediment burial rate (m/d)	bury_d
Surface water current in m/d	current_w
organic carbon fraction in vadose zone	foc_v
organic carbon fraction in aquifer zone	foc_q
organic carbon fraction in sediments	foc_d
distance to first well (m)	d_well
Darcy velecocity (m/d)	v_darc
water dispersion coeff. (m ² /d)	D_T

Les paramètres d'exposition humains sont repris dans la suite de cet exposé pour les paramètres à renseigner dans le cadre de projets routiers et en annexe où ils ont été traduits. Certaines des valeurs données par défaut pour ces paramètres ont été testées. Au sein de la liste, les deux paramètres qui suivent et qui ne concernent pas spécifiquement l'«exposition humaine» font l'objet de tests comme évoqués précédemment dans le document.

Paramètres de biotransferts insérés dans la partie caractérisant l'exposition humaine

Plant-air prttn fctr, particles, m ³ /kg[FM]	Kpa_part
Rainsplash (mg/kg[plnt FM])/(mg/kg[soil])	rainsplash

Pour résumer, les paramètres suivants feront l'objet d'un test dans la suite de l'étude :

- **Donnée d'entrée du polluant : dépôt particulaire ou concentration en particules dans l'air ;**
- **Vitesse de déposition des particules ;**
- **Coefficients de transferts entre différents milieux : Kps, rainsplash, Kpa_part ;**
- **Coefficients de partage : Kd ;**
- **Pourcentage de matière organique ;**
- **paramètres d'exposition humaine : quantité de fruits et légumes ingérée, % auto-produits.**

4.4. Utilisation de CALTOX sur un cas concret

Afin de faciliter la prise en main de CALTOX et le test des différents paramètres influençant le transfert des polluants dans les compartiments, air/sol/végétaux, nous avons décidé de nous appuyer sur un cas concret, l'A45, projet qui a fait l'objet d'une évaluation des risques sanitaires par ingestion, et pour lequel nous possédons l'ensemble des données d'entrée nécessaires à l'utilisation de CALTOX.

4.4.1. Hypothèses et données d'entrées

Dans le cadre de nos projets, les données à intégrer en premier lieu sont les apports en polluants particuliers introduits dans le milieu par l'infrastructure. Ces données peuvent être introduites sous la forme de concentrations en polluants particuliers dans l'air **Ca** ou sous la forme d'une quantité de polluant déposée par unité de surface **Sa**.

L'Ineris préconise, en vue de prendre également en compte le risque lié à l'inhalation de ces composés, de rentrer cette donnée sous la forme d'une concentration. Dans le cadre de nos études nous nous focalisons sur le risque par ingestion et traitons le risque lié à l'inhalation dans une étude différente.

Ce paramètre fera l'objet d'un test : les concentrations en polluants et les dépôts particuliers à 10 m de la voie obtenus à partir du logiciel ADMS seront introduits successivement dans le modèle. La modélisation du dépôt particulaire à partir de concentrations dans l'air obtenue avec CALTOX sera comparée à celle obtenue avec ADMS.

4.4.1.1. Concentration en polluant particulaire dans l'air ou dépôt particulaire en bord de voie

Les données d'entrées correspondantes « concentration en cadmium particulaire dans l'air » et « dépôt en cadmium total » ont été calculées avec ADMS dans le cadre du projet A45. Ces données correspondent à des concentrations ou à un dépôt calculé à 5m de la voie, pour des particules de 10 µm. Ces valeurs ont été directement introduites dans CALTOX (valeurs sur lignées en jaune) après conversion dans l'unité adéquate (mol/m³).

Il est à noter que ces valeurs modélisées à 5 m de la voie tendent à surestimer le risque (aucun jardin potager ne se trouvant à une distance aussi faible de l'infrastructure) mais c'est ce qui avait été choisi dans le cadre du projet A45

Données d'entrée : concentration en cadmium particulaire : Ca

Continuous inputs			Time avrg. Conc. in on-site environmental media		
Fixed air concentration (mol/m ³)	1,0 E-12	Ca	Air	1,1 E-07	mg/m ³
Source term to ground-surface soil (mol/d)	0,0 E+00	Sg	Plants	2,7 E-04	mg/kg(FM)
Source term to root-zone soil (mol/d)	0,0 E+00	Ss	Grnd-surface soil	1,4 E+00	mg/kg(total)
Source term to surface water(mol/d)	0,0 E+00	Sw	Root-zone soil	2,7 E-05	mg/kg(total)

Données d'entrée : dépôt de cadmium particulaire : Sa

Continuous inputs			Time avrg. Conc. in on-site environmental media		
Source term to air (mol/d)	3,6 E-09	Sa	Air	3,7 E-08	mg/m ³
Source term to ground-surface soil (mol/d)	0,0 E+00	Sg	Plants	9,1 E-05	mg/kg(FM)
Source term to root-zone soil (mol/d)	0,0 E+00	Ss	Grnd-surface soil	3,4 E-01	mg/kg(total)

La quantité de cadmium déposée est définie pour une unité de surface. Elle correspond à la quantité totale de polluant déposée sur la surface de site impactée. En l'occurrence on a choisi de travailler avec une surface unitaire de 1 m². Cette surface fait partie des données d'entrée à renseigner sous CALTOX.

Concrètement, on peut introduire la donnée d'entrée sous l'une ou l'autre de ces deux formes en remplaçant le terme « **Ca** » par « **Sa** » et vice versa.

On peut observer, que les concentrations dans l'air (sur ligné rouge) recalculées pour l'une ou l'autre de ces entrées sont sensiblement différentes. Dans le cas d'une entrée sous forme de « dépôt particulaire », la concentration dans l'air recalculée correspond à la valeur remobilisée à partir du dépôt sur le sol.

Dans le cas de la donnée d'entrée « concentration dans l'air », la valeur du dépôt est calculée en introduisant une vitesse de déposition. Pour le dépôt les données d'entrées font partie des données évaluées. On testera ce paramètre comme expliqué dans le paragraphe suivant. Pour la suite des tests le paramètre d'entrée de la pollution particulaire issue de la route sera introduit sous la forme d'une concentration en cadmium particulaire dans l'air.

4.4.1.2. Paramètres physicochimiques du polluant et propriétés du site

Propriétés physico chimiques du cadmium

Chemical properties		0,00297	0,003	1	-3,7 E+ 01		
Compound name	Chemical name	Value used	Mean value	Coeff. Var.	Adjustment	Notes	
	Molecular weight (g/mol)	MW	1,12 E+ 02	1,12 E+ 02	0,000092	1	
	Octanol-water partition coefficient	Kow	0,00 E+ 00	0,00 E+ 00	1,2	1	
	Melting point (K)	Tm	5,94 E+ 02	5,94 E+ 02	0,0068	1	
	Vapor Pressure in (Pa)	VP	0,00 E+ 00	0,00 E+ 00	0,015	1	
	Solubility in mol/m ³	S	1,00 E+ 00	1,00 E+ 00	0,55	1	
	Henry's law constant (Pa·m ³ /mol)	H -	n/a	-99	0,25	1	
	Diffusion coefficient in pure air (m ² /d)	Dair	6,40 E-01	6,40 E-01	0,08	1	7,41 E-06
	Diffusion coefficient; pure water (m ² /d)	Dwater	1,30 E-04	1,30 E-04	0,25	1	1,50 E-09
	Organic carbon partition coefficient Koc	Koc -	n/a	-99	0,6	1	m ² /s
	Partition coefficient in ground/root soil layer	Kd_s -	5,00 E+ 05	500000	1,2	1	
	Partition coefficient in vadose-zone soil layer	Kd_v -	5,00 E+ 05	500000	1,2	1	
	Partition coefficient in aquifer layer	Kd_q -	5,00 E+ 05	500000	1,2	1	
	Partition coeff. in surface wtr sediments	Kd_d -	5,00 E+ 05	500000	1,2	1	
	Prtn cff. plnt(abv-grd)/sl (kg[s]/kg[pFM])	Kps -	3,00 E-01	3,00E-01	4	1	
	Biotransfr fctr, plant/air (m ³ [a]/kg[pFM])	Kpa -	3,30 E+ 03	-9,90E+ 01	14	1	
	Biotransfer factor; cattle-diet/milk (d/L)	Bk -	5,00 E-05	0,00005	11	1	
	Biotransfer factor; cattle-diet/meat (d/L)	Bt -	1,00 E-02	0,01	13	1	
	Biotransfer factor; hen-diet/eggs (d/L)	Be -	6,00 E-01	0,6	14	1	
	Biotransfr fctr; brst mlk/mthr intake (d/kg)	Bbmk -	1,00 E-03	0,001	10	1	
	Bioconcentration factor; fish/water	BCF -	3,00 E+ 03	3000	0,12	1	
	Skin permeability coefficient; cm/h	Kp_w -	1,00 E-03	0,001	2,4	1	
	Fraction dermal uptake from soil	dfct_sl-	2,01 E-01	0,2014375	0,27	1	
	Reaction half-life in air (d)	Thalf_a	n/a	n/a	0,94	1	
	Reaction half-life in surface soil (d)	Thalf_g	n/a	n/a	1,4	1	
	Reaction half-life in root-zone soil (d)	Thalf_s	n/a	n/a	1,4	1	
	Reaction half-life in vadose-zone soil (d)	Thalf_v	n/a	n/a	1,3	1	
	Reaction half-life in ground water (d)	Thalf_q	n/a	n/a	1,6	1	
	Reaction half-life in surface water (d)	Thalf_w	n/a	n/a	1,4	1	
	Reaction half-life in sediments (d)	Thalf_d	n/a	n/a	1,3	1	

Les paramètres concernant la chimie du cadmium proviennent de la version CALTOX 4 du logiciel ou ils sont renseignés par défaut (ainsi que pour tous les autres polluants à prendre en compte dans le cadre de la note méthodologique).

Ces valeurs sont reprises dans le tableau qui suit, sachant que tous les paramètres ne seront pas pris en compte dans la modélisation à réaliser pour un projet routier.

Pour l'ensemble des autres paramètres à renseigner, les valeurs par défaut introduites dans CALTOX 2.3 sont conservées.

4.4.1.3. Prise en compte des concentrations initiales mesurées dans l'environnement

Démarche mise en place dans le cadre du projet autoroutier A45

Des concentrations de fond ont été introduites pour les sols « root soil » et « ground soil » : 0,1 mg/kg de sol. Cette valeur, qui provient de l'état initial réalisé pour le projet A45, est une valeur moyenne, voire faible par rapport aux concentrations en cadmium habituellement rencontrées dans les sols, (cf tableau qui suit).

Une concentration de fond en particules dans l'air, de 0,7 µg/m³, a également été introduite, toujours issue de l'état initial réalisé pour le projet A45. Cette valeur provient de la campagne de mesure réalisée durant huit semaines par Coparly, AASQA qui officie sur l'agglomération lyonnaise.

Information sur les éléments traces dans les sols en France

	Cd¹⁸ concentrations exprimées en mg/kg
<i>(nb de valeurs)</i>	<i>(1063)</i>
Minimum	0,02
1 ^{er} décile	0,13
1 ^{er} quartile	0,18
médiane	0,25
<i>moyenne</i>	<i>0,41</i>
valeurs limites de la norme U44-041 *	2

Le logiciel Caltox a été élaboré pour prendre en compte le bruit de fond mesuré à l'état initial. Ce bruit de fond correspond à la concentration en l'élément considéré dans les sols qui selon l'INERIS est relativement constante dans un système à l'équilibre. Or, CALTOX modifie ces dernières lors des calculs de transfert dans l'environnement (transferts vers les nappes, végétaux...). Pour s'affranchir de ces transferts et considérer comme constantes ces concentrations, l'INERIS¹⁹ propose d'ajouter aux concentrations modélisées dans les compartiments environnementaux par le logiciel les concentrations de fond. Il s'agit donc de modifier les équations qui figurent dans les cellules O99 à T99 au niveau du tableau final de résultat des calculs de concentrations environnementales et celles des produits d'exposition (figure A-13). Dans le cas étudié, les cellules O99, P99, Q99 et R99 (numérotation des lignes et colonnes dans le tableau excel) ont été modifiées (tableau qui suit). Elles correspondent respectivement aux concentrations en polluants particuliers dans l'air, dans la couche de sol superficiel et dans la couche de sol racinaire. On prendra les mêmes concentrations maximales mesurées dans les échantillons de sol pour renseigner les cases concernant la couche de sol superficiel et racinaire.

18 Programme INRA-ASPITET : Éléments statistiques obtenus pour 1110 horizons de surface de sols cultivés français.

19 INERIS 2004 : Le logiciel de calcul CALTOX, rapport final, DRC-04-45959-ERSA-RBn°097/caltox

Concentrations en polluants dans les différents milieux d'exposition

Ces valeurs intègrent les pollutions de fond que l'on a choisies à partir de l'étude A45.

FIGURE A-13 : FENÊTRE CALTOX DES RÉSULTATS DES CONCENTRATIONS DANS L'ENVIRONNEMENT ET LES PRODUITS D'EXPOSITION.

Concentrations environnementales modélisées + concentrations initiales

ENVIRONMENTAL Media	Air (gasee) mg/m ³	Air (dust) mg/m ³	Ground soil mg/kg	Root soil mg/kg	Ground water mg/L	Surface water mg/L
CONCENTRATIONS	2,51 E-05	1,69 E-14	2,92 E-05	1,20 E-02	1,32 E-04	1,05 E-05

Non pris en compte

4.4.1.4. Les quantités de polluants ingérées

Pour chacun des agents, l'exposition par ingestion se traduit par une Dose Journalière d'Exposition (DJE), c'est-à-dire la concentration du polluant ingéré par l'individu. Le calcul des DJE est basé sur les concentrations en polluants dans les sols et la chaîne alimentaire (voir précédemment) et sur des scénarii majorants de consommation alimentaire, ainsi que le poids corporel des cibles. Il s'exprime par la relation suivante :

$$DJE_i = (C_i \times Q_j) \times \frac{F}{P} \times \frac{T}{T_m}$$

DJE_i : Dose Journalière d'Exposition (en mg/kg/j) : quantité de polluant i ingérée quotidiennement ramenée à 1 kg de poids corporel.

C_i : concentration en polluant i par kg d'aliment j consommé (mg/kg)

Q_j : quantité d'aliment j consommé quotidiennement et contaminé par le polluant i (en kg/j)

F : fréquence d'exposition = nombre de jours d'exposition par an / 365 (sans unité). Pour simplifier et faute d'informations en général sur le comportement des populations, on prendra F=1

P : poids corporel de la personne exposée (kg)

T : durée d'exposition (T = 20 années)

T_m : période de temps (années) sur laquelle l'exposition est moyennée (pour les substances cancérogènes, T_m = 70 ans, ce qui correspond à une exposition moyennée sur une vie entière);

Pour les toxiques non cancérogènes, ce n'est pas le cas : on a T = T_m.

Par conséquent :

- pour les substances non cancérogènes : DJE_i = C_i × Q_j/P
- pour les substances cancérogènes : DJE_i = 0,286 × C_i × Q_j/P

Ce tableau présente les quantités de polluants ingérées en mg/kg -j⁻¹ via les différents milieux d'exposition.

Seules les voies d'exposition surlignées en jaune sont prises en considération et concernent les sols et les végétaux ingérés, exposés aux retombées atmosphériques et les sols. Ces produits sont contaminés via trois compartiments : les retombées de poussières atmosphériques (gaz et particules en l'occurrence uniquement des particules), le sol de surface et le sol racinaire.

**MEDIA AND CORRESPONDING POTENTIAL DOSES IN mg/kg-d
(averaged over the exposure duration)**

PATHWAYS	Air (gases & particles)	Surface soil	Root-zone soil	Ground water	Surface water	Totals	%
INHALATION	4,07E-08	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,07E-08	0,01
INGESTION:						0,00E+00	
Water				0,00E+00	0,00E+00	0	0,00
Exposed produce	2,35E-05	1,36E-06	2,99E-05	0,00E+00	0,00E+00	5,47E-05	7,72
Unexposed produce			6,54E-04	0,00E+00	0,00E+00	6,54E-04	92,27
Meat	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00
Milk	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0	0,00
Eggs	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0	0,00
Fish					0,00E+00	0	0,00
Soil		7,03E-08	1,75E-08			8,78E-08	0,01
Total ingestion	2,35 E-05	1,43 E-06	6,84 E-04	0,00 E+00	0,00 E+00	7,1E-04	99,99
DERMAL UPTAKE		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00 E+00	0,00
Dose SUM	2,35E-05	1,43E-06	6,84E-04	0,00E+00	0,00E+00	7,1E-04	100,0

CALTOX calcule cette dose d'exposition journalière avec des données d'entrée d'exposition humaine basée sur des études réalisées aux États Unis. Pour des résultats plus valides il est préconisé d'utiliser des bases de données nationales.

Une évaluation de ces paramètres sera faite dans le cadre de ce travail. En effet l'intégration de données nationales et le calcul de risque à partir de ces données est une étape qui peut alourdir l'étude. Au vu des incertitudes qui pèsent sur les résultats de l'évaluation des risques sanitaires, il apparaît intéressant de quantifier l'erreur introduite par l'utilisation des données de consommation introduites par défaut dans CALTOX.

4.4.1.4.1. Données de consommation nationale

Le Centre de Recherche pour l'Étude et l'Observation des Conditions de vie (CREDOC) a réalisé en 1998-1999, une grande enquête individuelle sur les consommations alimentaires (INCA)²⁰ avec le soutien de la Direction Générale de l'Alimentation et de l'Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments (AFSSA). Elle est la deuxième grande enquête nationale sur les consommations alimentaires des adultes et des enfants en France après l'enquête ASPCC en 1994²¹. Elle porte sur les consommations alimentaires pendant une semaine de 3003 individus de 3 ans et plus, représentatifs de la population française. Cette étude permet de disposer des résultats d'enquête des ménages (comportements alimentaires et pratiques d'approvisionnement) et de résultats individuels pour les enfants et les adultes (attitudes, comportements et

20 CREDOC-AFSSA-DGAL, 1999, Enquête INCA, Enquête nationale sur les consommations alimentaires, Tech & Doc. Lavoisier, ISBN : 2-7430-0426-6.

21 Rigaud D., Giachetti I., Deheeger M., Borys J.-M., Volatier J.-L., Lemoine A. et Cassuto D., 1997, Enquête française de consommation alimentaire. I. Energie et macrotéléments, Cah. Nutr. Diét., 32, 379-59.

consommations alimentaires). Pour intégrer les effets de saisonnalité, la réalisation des enquêtes a été programmée sur une période de 11 mois. Certains résultats de cette enquête portent sur la répartition des consommations selon l'âge des individus. Les principaux résultats sont repris dans le tableau ci-dessous.

**Consommations alimentaires moyennes des adultes et des enfants selon l'âge
(en g/j) (source : CREDOC, enquête INCA)**

Produit (g/j)	Enfants				Adulte + 15 ans
	3 à 5 ans	6 à 8 ans	9 à 11 ans	12 à 14 ans	
Total légumes ^c	102	129	150	157	186
Total fruit ^d	82	100	106	89	145

^c Les quantités de légumes consommés ont été calculées sans additionner la rubrique «légumes secs».

^d Les rubriques «fruits» et «compotes et fruits cuits» ont été additionnés pour définir la quantité de fruits consommés.

○ L'autoconsommation

L'hypothèse simplificatrice a été faite que 100% des fruits et légumes consommés provenaient de la zone impactée par le dépôt particulaire (hypothèse très majorante).

Dans le cas où seule une partie de l'alimentation était supposée provenir de la bande d'étude une enquête alimentaire de l'INSEE²² de 1991 fournit des données régionales (région centre est par exemple pour la zone d'action du CETE de Lyon).

○ Consommation alimentaire par type de légumes

La nature et la part des légumes consommés varient tout au long de l'année. On mangera par exemple davantage de fruits et de légumes-fruits en été. Toutefois, il s'agit de fixer la part représentative des trois grandes catégories de légumes suivies dans cette étude, à savoir les légumes-racines, les légumes-fruits et les légumes-feuilles. Pour cela, on utilise la quantité totale de légumes consommés fournie par l'enquête INCA et les pourcentages de chacun de ces trois types de légumes dans la consommation globale. Ces pourcentages ont été calculés à partir de l'étude INSEE de 1991. Le **tableau qui suit** présente la part de chaque type de légumes qui sera pris en compte dans l'évaluation des risques sanitaires.

Pourcentage de consommation des légumes par catégorie

Type de légumes	Légumes utilisés pour le calcul des pourcentages	Pourcentage
Légumes-racines	Carottes, navets, radis, pommes de terre	49,6
Légumes-fruits	Tomates, petits-pois, haricots verts, courgettes	22,2
Légumes-feuilles	Poireaux, salades, choux	28,2

À partir de ces données et en simplifiant très fortement les hypothèses, le calcul suivant a été fait à partir des concentrations dans les milieux d'exposition (fruits et légumes consommés).

22 Bertrand, 1993, Enquête INSEE, Consommation et lieux d'achats des produits alimentaires en 1991, Série Consommation et modes de vie, n°54-55.

On peut, en croisant, les quantités d'aliments ingérées et les concentrations en cadmium modélisées dans ces aliments en déduire la quantité de cadmium ingérée.

Par exemple pour les enfants de 3 à 5 ans on considère qu'ils ingèrent environ 50 g de légumes feuilles + fruit (exposed produce) et 50 g de légumes racines (unexposed produce) + 150 mg/j de sol²³.

Attention il est à noter que toutes les hypothèses qui sont faites dans le présent document sont faites à titre indicatif et pour permettre la compréhension du calcul. Il sera de la responsabilité de chacun de choisir sa VTR, les classes d'âge, etc., qu'il met en avant dans l'étude .

4.4.2. Données en sortie du modèle

4.4.2.1. Concentrations en polluants dans les différents milieux environnementaux

Des concentrations en cadmium particulaire dans l'air (dust), dans le sol de surface (ground soil) et dans le sol racinaire (root soil) sont fournies en sortie de modèle. Ces concentrations sont constituée pour partie par les apports modélisés à partir des données d'entrée et pour partie par les concentrations de fond directement introduites à ce niveau (cf chapitre précédent).

Concentrations en métaux dans les milieux environnementaux

ENVIRONMENTAL Media	Air (gases) mg/m ³	Air (dust) mg/m ³	Ground soil mg/kg	Root soil mg/kg	Ground water mg/L	Surface water mg/L
CONCENTRATIONS	0,00 E+00	7,13 E-06	4,02 E-01	1,00 E-01	1,12 E-30	9,67 E-0

4.4.2.2. Les concentrations en polluants dans les milieux d'exposition

Seules les concentrations dans les milieu d'expositions, sols, légumes et fruits à prendre en compte dans les études liées aux projets routiers ont été considérées.

Concentrations en polluants dans les milieux d'exposition pour l'homme (fruits et légumes dans le cadre de l'ingestion)

EXPOSURE MEDIA CONCENTRATIONS (averaged over the exposure duration)						
EXPOSURE	Air (gases)	Air (dust)	Ground soil	Root soil	Ground water	Surface water
Exposed produce (mg/kg)	0	0,023	0,0013	0,03	0	0
Unexposed produce (mg/kg)				1,05	0	0

Concentrations en polluants dans les végétaux exposés : végétaux dont on consomme les parties aériennes et non exposés dont on consomme les parties souterraines. Les voies d'apports des polluants aux végétaux (particules du milieu air, sol de surface et sol racinaire) sont différenciées.

L'analyse de formules de la feuille de calcul CALTOX montre que :

- le transfert, via le sol de surface, concerne les processus d'éclaboussure des végétaux à partir des sols de surface contaminés ;
- le transfert via le sol racinaire concerne les processus de transfert sol/plante via l'absorption racinaire ;

²³ Valeur par défaut dans CALTOX

- les transferts via l'atmosphère concerne le dépôt de particules sur les parties aériennes des végétaux.

Ces transferts permettent de calculer les concentrations dans les milieux d'exposition à partir des concentrations dans les milieux environnementaux.

4.4.2.3. Les quantités de polluants ingérées

Seul le risque par ingestion est pris en considération dans ce travail. On s'intéresse de plus spécifiquement au risque lié à l'ingestion « d'exposed produce », de « Unexposed produce » et de « sol ».

Il est à noter que dans le cadre de nos projets, le risque lié à l'inhalation n'est jamais étudié par le biais de CALTOX.

Les quantités ingérées sont données en mg par poids de corps et par jour.

Dans CALTOX, ces quantités sont calculées par défaut pour un adulte de 62 kg, s'alimentant selon les hypothèses données par défaut dans CALTOX. Ces données font également l'objet d'un test et sont comparées à des données issues d'études de consommation française pour finir ce rapport.

Quantités de polluants ingérées via les différents milieux d'exposition

MEDIA AND CORRESPONDING POTENTIAL DOSES IN mg/kg-d (averaged over the exposure duration)						
PATHWAYS	Air (gases & particles)	Surface soil	Root-zone soil	Ground water	Surface water	Totals
INHALATION	4,05E-08	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,05E-08
INGESTION:	 	 	 	 	 	
Water				0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Exposed produce	2,34E-05	1,19E-06	2,99E-05	0,00E+00	0,00E+00	5,45E-05
Unexposed produce			6,54E-04	0,00E+00	0,00E+00	6,54E-04
Meat	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Milk	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Eggs	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Fish					0,00E+00	0,00E+00
Soil		6,15E-08	1,75E-08			7,90E-08
Total ingestion	2,34 E-05	1,25 E-06	6,84 E-04	0,00 E+00	0,00 E+00	7,09 E-04
DERMAL UPTAKE		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00 E+00
Dose SUM	2,34E-05	1,25E-06	6,84E-04	0,00E+00	0,00E+00	7,09E-04

Ces tableaux sont repris dans la suite de ce travail lors des tests des paramètres influant sur le transfert des métaux.

4.5. Évaluation de l'impact des paramètres d'entrée et de transferts introduits dans le modèle CALTOX sur le risque évalué

4.5.1. Méthode d'analyse

Pour les paramètres d'entrée, la concentration en Cd particulaire dans l'air, ou la quantité de Cd déposée en un même point (5 m de la voie) sur un même tronçon avec les mêmes hypothèses de météorologie et de trafic sont rentrées successivement.

Pour les paramètres de transfert qui peuvent avoir une influence sur le transfert de polluants via la chaîne alimentaire, les bornes des fourchettes de ces paramètres ont été entrées dans CALTOX.

Pour chacun de ces tests, les tableaux fournissent :

- les concentrations dans les différents milieux (air, sol, sol racinaire (sol directement en contact avec les racines)) après dispersion ;
- dans les produits d'exposition (fruits, légumes de surface pour les exposés et légumes dont on consomme la partie enterrée pour les non exposés) ;
- et la quantité de polluants ingérée à travers ces produits.

1.1.2 Test de la modélisation du dépôt particulaire à partir de la concentration particulaire dans l'air

Les tableaux qui suivent comparent les résultats en sortie du modèle en fonction de la manière d'introduire le dépôt particulaire. Ces données peuvent être introduites sous la forme de concentrations en polluants particuliers dans l'air **Ca** ou sous la forme d'une quantité de polluant déposée par unité de surface **Sa** (cf chapitre hypothèses et données d'entrée).

Impact de la donnée d'entrée : concentration en cadmium particulaire

Concentration du Cd particulaire dans l'air				
	Air dust mg/m ³	Ground soil mg/kg	Root soil mg/kg	
Environmental media concentration	8 .10 ⁻⁷	3,7.10 ⁻¹	0,1	
Exposition media concentration				
Exposed produce (mg/kg)	2,7 .10 ⁻³	2,7.10 ⁻³	0,03	
Unexposed produce(mg/kg)			1,05	
Ingestion en mg/kg/j				Total
Exposed produce (mg/kg)	2,2.10 ⁻⁶	1,3.10 ⁻⁶	2,9.10 ⁻⁵	3,4 .10 ⁻⁵
Unexposed produce(mg/kg)			6,5.10 ⁻⁴	6,5 .10 ⁻⁴
				6,8 .10⁻⁴

Impact de la donnée d'entrée : dépôt de cadmium particulaire

Dépôt particulaire en cadmium				
	Air dust mg/m ³	Ground soil mg/kg	Root soil mg/kg	
Environmental media concentration	7,4 .10 ⁻⁷	2,1.10 ⁻¹	1.10 ⁻¹	
Exposition media concentration				
Exposed produce (mg/kg)	2,4 .10 ⁻³	7,3.10 ⁻⁴	0,03	
Unexposed produce(mg/kg)			1,05	
Ingestion en mg/kg/j				Total
Exposed produce (mg/kg)	2,4 .10 ⁻⁶	7,3.10 ⁻⁷	2,9.10 ⁻⁵	3,4.10 ⁻⁵
Unexposed produce(mg/kg)			6,5.10 ⁻⁴	6,5.10 ⁻⁴
				6,8 .10⁻⁴

Même si les concentrations sont légèrement différentes au niveau du compartiment « air » la quantité de cadmium ingérée au final est la même car elle dépend essentiellement du transfert vers le végétal via les racines. Cette voie de transfert dépend de la concentration en cadmium dans le sol racinaire qui est plus liée à la concentration de fond en métaux dans les sols qu'au dépôt particulaire dû à l'infrastructure. Ce dernier n'est pas suffisamment important pour modifier de manière notable la concentration en cadmium dans le sol sur 20 cm de profondeur.

La concentration en cadmium dans le sol de surface est moins importante en intégrant comme donnée d'entrée un dépôt particulaire qu'une concentration en particule dans l'air. La quantité de polluant déposée directement sur les végétaux est également moins importante en intégrant un dépôt particulaire.

Le dépôt calculé par CALTOX à partir d'une concentration en particules dans l'air est moins important que le dépôt calculé par ADMS à partir de la même concentration.

L'INERIS préconise de travailler uniquement avec les concentrations en particules dans l'air et non en intégrant comme donnée d'entrée un dépôt. Ce dernier cas de figure conduirait à une sous estimation du risque au niveau du compartiment air. Toutefois dans le cadre de nos projets, le risque par inhalation de polluants est pris en compte à travers une étude différente. L'utilisation d'un dépôt particulaire devrait donc être possible.

Nous avons dans le paragraphe suivant évalué à travers le test de différentes vitesses de déposition la manière dont CALTOX calcule ce dépôt particulaire à travers une concentration dans l'air et l'impact de ce paramètre sur la quantité de polluant ingérée.

Impact du paramètre vitesse de déposition

Valeur par défaut sous CALTOX : 690 m/j

Fourchette sélectionnée : 40 – 800 m/j

Impact de la vitesse de déposition : valeur par défaut dans CALTOX

Vitesse de déposition	Valeur par défaut : 690 m/j			
	Air dust mg/m ³	Ground soil mg/kg	Root soil mg/kg	
Environmental media concentration	8. 10 ⁻⁷	3,7.10 ⁻¹	0,1	
Exposition media concentration				
Exposed produce (mg/kg)	2,7 .10 ⁻³	2,7.10 ⁻³	3. 10 ⁻²	
Unexposed produce(mg/kg)			1,05	
Ingestion en mg/kg/j				Total
Exposed produce (mg/kg)	2,2 .10 ⁻⁶	1,3.10 ⁻⁶	3 .10 ⁻⁵	3,3 .10 ⁻⁵
Unexposed produce(mg/kg)			6,5 .10 ⁻⁴	6,5 .10 ⁻⁴
Soil		6,5. 10 ⁻⁸	6,5.10 ⁻⁸	1,3 .10 ⁻⁷
				6,9 .10 ⁻⁴

Impact de la vitesse de déposition : fourchette basse

Vitesse de déposition	Valeur : 40 m/j			
	Air dust mg/m ³	Ground soil mg/kg	Root soil mg/kg	
Environmental media concentration	8. 10 ⁻⁷	1,7.10 ⁻¹	0,1	
Exposition media concentration				Total
Exposed produce (mg/kg)	2,7 .10 ⁻³	5,9.10 ⁻⁴	3. 10 ⁻²	
Unexposed produce(mg/kg)			1,05	
Ingestion en mg/kg/j				
Exposed produce (mg/kg)	2,2 .10 ⁻⁶	1,3.10 ⁻⁶	3 .10 ⁻⁵	3,2 .10 ⁻⁵
Unexposed produce(mg/kg)			6,5 .10 ⁻⁴	6,5 .10 ⁻⁴
Soil		6,5. 10 ⁻⁸	6,5.10 ⁻⁸	1,3 .10 ⁻⁷
				6,9 .10 ⁻⁴

Impact de la vitesse de déposition : fourchette haute

Vitesse de déposition	Valeur : 800 m/j			
	Air dust mg/m ³	Ground soil mg/kg	Root soil mg/kg	
Environmental media concentration	8. 10 ⁻⁷	4.10 ⁻¹	0,1	
Exposition media concentration				
Exposed produce (mg/kg)	2,7 .10 ⁻³	1,4.10 ⁻⁴	3. 10 ⁻²	
Unexposed produce (mg/kg)			1,05	
Ingestion en mg/kg/j				Total
Exposed produce (mg/kg)	2,2 .10 ⁻⁶	1,4.10 ⁻⁶	3 .10 ⁻⁵	3,2 .10 ⁻⁰⁵
Unexposed produce (mg/kg)			6,5 .10 ⁻⁴	6,5 .10 ⁻⁰⁴
Soil		6,5. 10 ⁻⁸	6,5.10 ⁻⁸	1,3 .10 ⁻⁰⁷
				6,9 .10⁻⁰⁴

La vitesse de déposition a un impact non négligeable sur la concentration en cadmium du sol de surface, ainsi que sur la quantité de polluants ingérée par ce biais. Toutefois, dans la configuration sélectionnée, cette voie n'est pas majoritaire par rapport aux transferts via les racines et le sol racinaire. Ce paramètre n'a donc que peu d'impact sur la quantité globale de cadmium ingérée.

Pour résumer, dans le cadre de nos projets, il est à noter que ce paramètre a peu d'influence sur la quantité de cadmium ingérée qui est gérée par les transferts sol racinaire / plante.

Dans la suite de ce travail, nous intégrerons le cadmium sous la forme d'une concentration en particules dans l'air.

Même si certains documents de l'INERIS préconisent d'affiner autant que possible la quantité de polluants déposée, au vu de nos résultats, la concentration de fond en cadmium dans le sol semble tirer la quantité de polluant ingérée.

Ce point sera toutefois à vérifier en fonction de la pollution de fond dans les sols intégrée dans le logiciel et la quantité de polluant déposée.

4.5.1.1. Test du coefficient de partage ou Kd

Fourchette de concentration testée : 0,5 - 5.10⁵

La valeur haute de la fourchette est la valeur par défaut introduite dans CALTOX.

Impact du paramètre Kd – introduction de la fourchette basse

Kd	Valeur : 0,5			Total
	Air dust mg/m ³	Ground soil mg/kg	Root soil mg/kg	
Environmental media concentration	8. 10 ⁻⁷	0,1	0,1	
Exposition media concentration				
Exposed produce (mg/kg)	2,7 .10 ⁻³	3,4 .10 ⁻⁴	3. 10 ⁻²	
Unexposed produce(mg/kg)			1,05	
Ingestion en mg/kg/j				
Exposed produce (mg/kg)	2,2 .10 ⁻⁶	3,4. 10 ⁻⁷	3 .10 ⁻⁵	3,2 .10 ⁻⁵
Unexposed produce(mg/kg)			6,5 .10 ⁻⁴	6,5 .10 ⁻⁴
Soil		1,7. 10 ⁻⁸	1,7.10 ⁻⁸	3,5 .10 ⁻⁸
				6,9 .10⁻⁴

Impact du paramètre Kd – introduction de la fourchette haute

Kd	Valeur par défaut : 5e⁵			
	Air dust mg/m ³	Ground soil mg/kg	Root soil mg/kg	
Environmental media concentration	8 .10 ⁻⁷	3,7.10 ⁻¹	0,1	
Exposition media concentration				
Exposed produce (mg/kg)	2,7.10 ⁻³	2,7.10 ⁻³	3.10 ⁻²	
Unexposed produce(mg/kg)			1,05	
Ingestion en mg/kg/j				
Exposed produce (mg/kg)	2,2 .10 ⁻⁶	1,2.10 ⁻⁶	2,9 10 ⁻⁵	3,6 .10 ⁻⁵
Unexposed produce(mg/kg)			6,5 10 ⁻⁴	6,5. 10 ⁻⁴
Soil		2,73.10 ⁻⁶	1,75.10 ⁻⁸	2,7. 10 ⁻⁶
				6,9 .10⁻⁴

La valeur de Kd intégrée n'influe que sur le partage du cadmium qui arrive au sol via l'infrastructure. Ce coefficient n'a pas d'influence sur le cadmium déjà présent dans les sols en concentration de fond.

4.5.1.2. Test du coefficient de transfert sol / parties aériennes des plantes ou rainsplash

Nous n'avons pas trouvé de fourchettes de rainsplash dans le cadre de transferts sols/plantes dans la littérature utilisée. Cette absence de donnée est confirmée par un rapport du CIRE Ouest²⁴ qui utilise également la valeur par défaut de CALTOX et qui pour tester la sensibilité du paramètre le fait varier d'un ordre 10 et teste les fourchettes $3,4 \cdot 10^{-2} - 3,4 \cdot 10^{-4}$.

Nous avons dans notre étude testé l'impact de cette valeur sur les résultats en la faisant varier d'un facteur cent en plus et en moins.

Les résultats montrent que cette valeur a peu d'impact sur la quantité de polluant ingérée. En effet les apports de polluant aux végétaux par le biais du rainsplash sont très nettement plus faibles que par les autres voies : dépôt particulaire sur les feuilles et transfert racinaire. En multipliant la valeur proposée par défaut par 100 on atteint l'ordre de grandeur du transfert par voie racinaire. La quantité totale de cadmium ingérée est alors multipliée par deux quand ce paramètre est multiplié par 100.

Impact du paramètre Rainsplash : valeur par défaut de CALTOX

Rainsplash	Valeur par défaut : $3,4 \cdot 10^{-3}$			
	Air dust mg/m ³	Ground soil mg/kg	Root soil mg/kg	
Environmental media concentration	$8 \cdot 10^{-7}$	$3,7 \cdot 10^{-1}$	0,1	
Exposition media concentration				
Exposed produce (mg/kg)	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	0,03	
Unexposed produce(mg/kg)			1,05	
Ingestion en mg/kg/j				Total
Exposed produce (mg/kg)	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$
Unexposed produce(mg/kg)			$6,5 \cdot 10^{-4}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$
				$7,1 \cdot 10^{-4}$

Impact du paramètre Rainsplash : fourchette basse

Rainsplash	Valeur : $3,4 \cdot 10^{-5}$			
	Air dust mg/m ³	Ground soil mg/kg	Root soil mg/kg	
Environmental media concentration	$8 \cdot 10^{-7}$	$3,7 \cdot 10^{-1}$	0,1	
Exposition media concentration				
Exposed produce (mg/kg)	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	0,03	
Unexposed produce(mg/kg)			1,05	
Ingestion en mg/kg/j				Total
Exposed produce (mg/kg)	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$5,3 \cdot 10^{-8}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$
Unexposed produce(mg/kg)			$6,5 \cdot 10^{-4}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$
				$6,8 \cdot 10^{-4}$

24 Glorennec P., Zmirou D., Peigner P. Impact sanitaire passé et actuel de l'Usine d'Incineration des Ordures Ménagères d'Angers. Cellule Inter Régionale d'Epidémiologie Ouest. Rapport. 52 pages + annexes. Rennes, 2001.

Impact du paramètre Rainsplash : fourchette haute

Rainsplash	Valeur : $3,3 \cdot 10^{-1}$			
	Air dust mg/m ³	Ground soil mg/kg	Root soil mg/kg	
Environmental media concentration	$8 \cdot 10^{-7}$	$3,7 \cdot 10^{-1}$	0,1	
Exposition media concentration				
Exposed produce (mg/kg)	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	0,03	
Unexposed produce(mg/kg)			1,05	
Ingestion en mg/kg/j				Total
Exposed produce (mg/kg)	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-04}$
Unexposed produce(mg/kg)			$6,5 \cdot 10^{-4}$	
				$8 \cdot 10^{-04}$

4.5.1.3. Test du coefficient air/plante ou Kpa-part

Nous n'avons pas trouvé de fourchettes de Kpa-Part dans la littérature, utilisées dans le cadre de transferts sols/plantes. Cette absence de donnée est comme dans le cas du rainsplash confirmée par un rapport du CIRE Ouest²⁵ qui utilise également la valeur par défaut de CALTOX et qui pour tester la sensibilité du paramètre le fait varier d'un ordre 10 et teste la fourchette $3,3 \cdot 10^2 - 3,3 \cdot 10^4$.

Impact du paramètre Kpa-part : valeur par défaut de CALTOX

Kpa-Part	Valeur par défaut : $3,3 \cdot 10^3$			
	Air dust mg/m ³	Ground soil mg/kg	Root soil mg/kg	
Environmental media concentration	$8,1 \cdot 10^{-7}$	$3,7 \cdot 10^{-1}$	0,1	
Exposition media concentration				
Exposed produce (mg/kg)	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	0,03	
Unexposed produce(mg/kg)			1,05	
Ingestion en mg/kg/j				Total
Exposed produce (mg/kg)	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-05}$
Unexposed produce(mg/kg)			$6,5 \cdot 10^{-4}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$
				$6,84 \cdot 10^{-04}$

25 : Glorennec P., Zmirou D., Peigner P. Impact sanitaire passé et actuel : de l'Usine d'Incinération des Ordures Ménagères d'Angers. Cellule Inter Régionale d'Epidémiologie Ouest. Rapport. 52 pages + annexes. Rennes, 2001.

Impact du paramètre Kpa-part : fourchette basse

Kpa-Part	Valeur 3,3.10¹			
	Air dust mg/m ³	Ground soil mg/kg	Root soil mg/kg	
Environmental media concentration	8,1.10 ⁻⁷	3,7.10 ⁻¹	0,1	
Exposition media concentration				
Exposed produce (mg/kg)	2,7 .10 ⁻⁵	2,7.10 ⁻³	0,03	
Unexposed produce(mg/kg)			1,05	
Ingestion en mg/kg/j				Total
Exposed produce (mg/kg)	2,2.10 ⁻⁸	1,3.10 ⁻⁶	2,9.10 ⁻⁵	3,4.10 ⁻⁰⁵
Unexposed produce(mg/kg)			6,5.10 ⁻⁴	6,5.10 ⁻⁴
				6,8.10 ⁻⁰⁴

Impact du paramètre Kpa-part : fourchette haute

Kpa-Part	Valeur : 3,3.10⁵			
	Air dust mg/m ³	Ground soil mg/kg	Root soil mg/kg	
Environmental media concentration	8,1.10 ⁻⁷	3,7.10 ⁻¹	0,1	
Exposition media concentration				
Exposed produce (mg/kg)	2,7.10 ⁻¹	2,7.10 ⁻³	0,03	
Unexposed produce(mg/kg)			1,05	
Ingestion en mg/kg/j				
Exposed produce (mg/kg)	2,2 .10 ⁻⁴	1,3.10 ⁻⁶	2,9.10 ⁻⁵	2,5 .10 ⁻⁴
Unexposed produce(mg/kg)			6,5.10 ⁻⁴	6,5 .10 ⁻⁴
				9 .10 ⁻⁰⁴

La quantité de polluant transférée via les parties aériennes du végétal, par dépôt particulaire est plus importante que par éclaboussure de sol contaminé. Elle est du même ordre de grandeur que la quantité de cadmium transférée dans les parties aériennes du végétal via le transfert racinaire. Toutefois, si on considère l'exposition totale d'individu par ingestion de fruits et de légumes cette voie est minoritaire par rapport à l'ingestion de légumes racines contaminés (unexposed produces).

4.5.1.4. Test du coefficient de transfert racinaire sol/plante ou Kps

Dans la littérature, ce paramètre est nettement plus renseigné que le Kpa-part et le rainsplash. Des valeurs assez différentes sont introduites en fonction des organes comestibles du légume ou du fruit. Les fourchettes présentées dans la littérature sont :

- 1,1.10⁻² – 3.10⁻¹ pour les légumes racines ;
- 6.10⁻³ – 3.10⁻¹ pour les légumes feuilles et les légumes fruits.

Dans une première approche une fourchette assez large a été testée. 6.10⁻³ – 3.10⁻¹

Impact du paramètre Kps : fourchette haute

Kps	Valeur par défaut : $3 \cdot 10^{-1}$			
	Air dust mg/m ³	Ground soil mg/kg	Root soil mg/kg	
Environmental media concentration	$8 \cdot 10^{-7}$	$3,7 \cdot 10^{-1}$	0,1	
Exposition media concentration				
Exposed produce (mg/kg)	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	0,03	
Unexposed produce(mg/kg)			1,05	
Ingestion en mg/kg/j				Total
Exposed produce (mg/kg)	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$
Unexposed produce(mg/kg)			$6,5 \cdot 10^{-4}$	$6,50 \cdot 10^{-04}$
				$6,85 \cdot 10^{-04}$

Impact du paramètre Kps : fourchette basse

Kps	Valeur : $6 \cdot 10^{-3}$			
	Air dust mg/m ³	Ground soil mg/kg	Root soil mg/kg	
Environmental media concentration	$8 \cdot 10^{-7}$	$3,7 \cdot 10^{-1}$	0,1	
Exposition media concentration				
Exposed produce (mg/kg)	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$	
Unexposed produce(mg/kg)			$2,1 \cdot 10^{-2}$	
Ingestion en mg/kg/j				Total
Exposed produce (mg/kg)	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-7}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$
Unexposed produce(mg/kg)			$1,3 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$
				$4,3 \cdot 10^{-5}$

La valeur du Kps a une importance notable sur la quantité de cadmium ingérée. Ce paramètre gère les transferts sol/parties aériennes du végétal (exposed produce) et les transferts sol/racines (pour les végétaux tels que les carottes, pommes de terre...). Pour les transferts vers les végétaux racines CALTOX utilise comme coefficient la valeur du Kps multipliée par 35. Cela explique les quantités de cadmium plus importantes retrouvées dans les « unexposed produce » par rapport aux « exposed produce » et de ce fait ingérées à travers cette dernière voie.

4.5.1.5. Test du pourcentage de matière organique

Ce paramètre demande à être renseigné sous CALTOX. Une valeur par défaut de 0,5% apparaît dans le modèle. Cette valeur est un peu faible au vu des teneurs données dans la littérature.

Une valeur de 5 % est testée afin de voir l'impact sur les concentrations dans les différents milieux et sur le risque en sortie de modèle. **L'introduction de cette nouvelle valeur n'a aucun impact sur la dispersion.**

Une étude plus poussée des formules intégrant ce paramètre montre qu'il est uniquement utilisé en l'absence de données concernant la valeur de Kds ou de coefficients de partage pour les

couches sol de surface sol racinaire. Le % de matière organique intervient alors dans le calcul de ces deux coefficients.

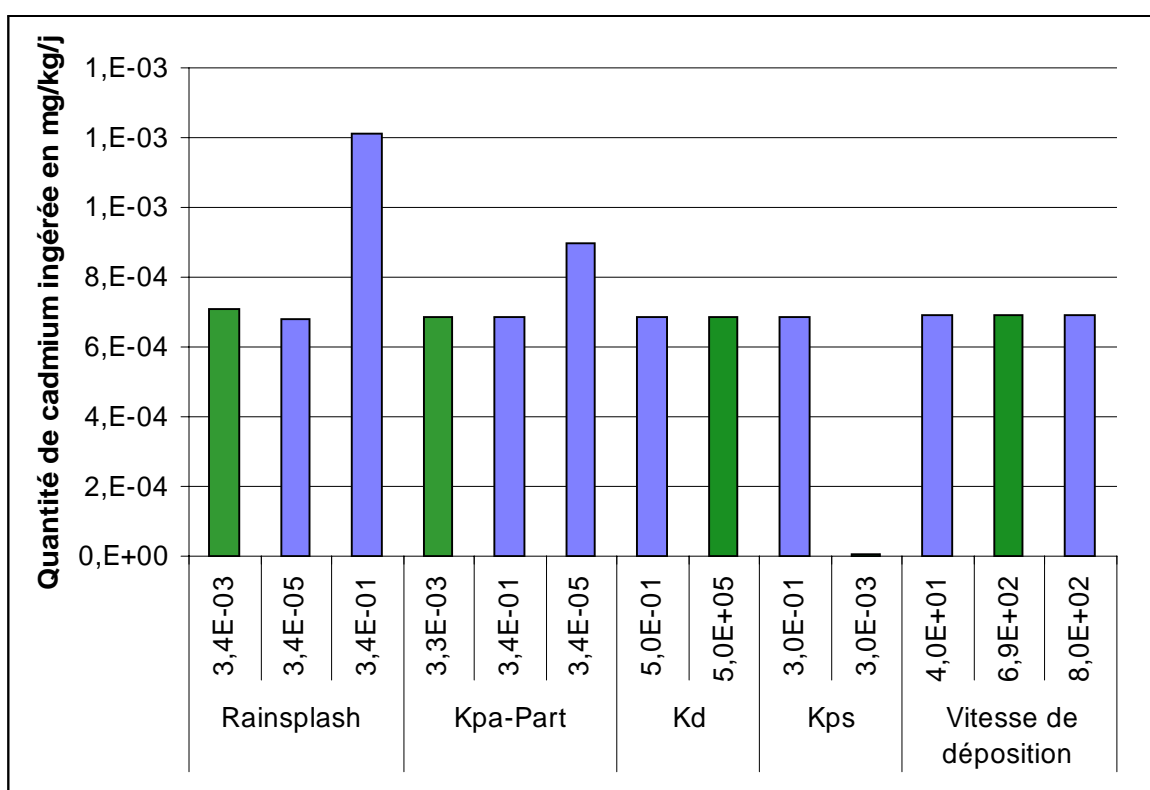
Dans une première approche nous considérerons les paramètres Kds renseignés et donc que le paramètre « % de matière organique » n'a aucun impact sur les résultats en sortie de CALTOX.

Le coefficient de partage du polluant dans le sol est calculé en croisant le coefficient de partage du polluant sur la matière organique et la teneur en matière organique.

4.5.1.6. Pour résumer

Les paramètres qui influent directement sur les concentrations dans les différents milieux ont été réunis dans le graphe qui suit. La teneur en matière organique, qui n'a pas d'influence directe sur les résultats en sortie de modèle n'a pas été reprise.

Impact des différents paramètres rainsplash, Kd, Kpa-part et Kps sur les quantités de cadmium ingérées (modélisation sous CALTOX)



En vert, les valeurs par défaut des paramètres dans CALTOX.

Seule une forte valeur de rainsplash (valeur par défaut multipliée par 100) et une faible valeur de Kps ont une influence significative sur les quantités de cadmium ingérées. Il n'existe aucune valeur par défaut de rainsplash dans la littérature pour ce genre d'application. Cependant, même si une variation de ce paramètre peut avoir un impact significatif sur les résultats en sortie du modèle, il apparaît qu'en l'absence de données la valeur par défaut semble la plus adaptée.

Concernant le Kps, son impact est également significatif sur la quantité de cadmium ingérée. Ce paramètre est beaucoup mieux renseigné et des valeurs peuvent être trouvées dans la littérature en fonction des végétaux. Il peut par ailleurs être l'objet de mesure dans le cadre d'études d'impact. Ainsi dans le cadre du projet A45, des Kps ont été calculés (concentration en Cadmium dans le végétal/ concentration en cadmium dans les sols) pour les végétaux les plus fréquem-

ment rencontrés dans la bande d'étude du projet. Les valeurs calculées dans le cadre du projet A45 ont globalement été plus proches des fourchettes basses que l'on retrouve dans la littérature, permettant ainsi de réduire la surestimation du risque due à l'emploi de modèles.

4.5.1.7. Conclusion

Parmi les paramètres investigués, seul le Kps semble devoir faire l'objet d'une attention particulière. Ce paramètre pourra être affiné au moyen d'une campagne de mesure des concentrations en polluants des sols et des légumes de consommation les plus représentés dans la bande d'étude.

Les Kd, paramètres difficiles à renseigner car intégrant de nombreux facteurs ont peu d'influence, sous CALTOX, sur les quantités de cadmium ingérées. Ils n'impactent en effet que le transfert de cadmium directement apporté par l'infrastructure. Dans la mesure où la concentration de fond en polluant intégrée dans la modélisation n'est pas impactée par ce paramètre, et que dans la configuration testée cette voie est prépondérante par rapport aux retombées particulières liées à l'infrastructure, ce paramètre a peu d'influence sur la modélisation.

4.5.2. Impact des paramètres d'exposition humaine

Au vu des voies d'exposition sélectionnées dans le cadre d'une évaluation des risques sanitaires liés aux infrastructures « ingestion de sols et végétaux contaminés par la pollution particulaire » seuls les paramètres décrits dans les tableaux suivants nous semblent à renseigner.

Les données qui suivent sont les données par défaut intégrées dans CALTOX.

Le poids moyen d'une personne (Body weight) est de 62 kg. La quantité de fruits et légumes ingérée ainsi que de sol est donnée par kg de poids de corps : soit pour un individu de 62 kg, une consommation d'environ 300 g de légumes par jour est équivalente à 4,9 g par kg de poids de corps et par jour.

Les fruits et légumes ingérés ne sont considérés que partiellement produits localement : 24 %

Une exposition de 14 années est prise en considération.

Body weight (kg)	BW	6,20 E+01	6,20 E+01
Fruit and vegetable intake (kg/kg-d)	Ifv	4,90 E-03	4,90 E-03
Soil ingestion (kg/kg-d)	Isl	3,50 E-07	3,50 E-07
Frctn frts & vgtbls that are exposed produce	fabv_grd_v	4,70 E-01	4,70 E-01
Fraction of fruits and vegetables local	flocal_v	2,40 E-01	2,40 E-01

Si l'on considère les données d'alimentation française précédemment décrites :

Body weight (kg)	BW	6,20 E+01	6,20 E+01
Fruit and vegetable intake (kg/kg-d)	Ifv	3,10 E-03	3,10 E-03
Soil ingestion (kg/kg-d)	Isl	3,50 E-07	3,50 E-07
Frctn frts & vgtbls that are exposed produce	fabv_grd_v	5,00 E-01	5,00 E-01
Fraction of fruits and vegetables local	flocal_v	1,00 E+00	1,00 E+00

On est parti de la même donnée de poids corporel, mais avec des quantités de fruits et légumes ingérées plus faibles, provenant à **100 % de la zone d'étude**. Cela conduit à une majoration du risque assez importante par rapport aux données CALTOX.

Données de consommation par défaut CALTOX				
	Air dust mg/m ³	Ground soil mg/kg	Root soil mg/kg	
Environmental media concentration	8 .10 ⁻⁷	3,7.10 ⁻¹	0,1	
Exposition media concentration				
Exposed produce (mg/kg)	2,7 .10 ⁻³	2,7.10 ⁻³	0,03	
Unexposed produce (mg/kg)			1,05	
Ingestion en mg/kg/j				Total
Exposed produce (mg/kg)	2,2 .10 ⁻⁶	1,3.10 ⁻⁶	2,9.10 ⁻⁵	3,4.10 ⁻⁰⁵
Unexposed produce (mg/kg)			6,5.10 ⁻⁴	6,5.10 ⁻⁴
				6,84E⁻⁰⁴

Données de consommation « françaises » avec 100 % des consommables qui proviennent de la zone d'étude				
	Air dust mg/m ³	Ground soil mg/kg	Root soil mg/kg	
Environmental media concentration	8 .10 ⁻⁷	3,7.10 ⁻¹	0,1	
Exposition media concentration				
Exposed produce (mg/kg)	2,7.10 ⁻³	2,7.10 ⁻³	0,03	
Unexposed produce (mg/kg)			1,05	
Ingestion en mg/kg/j				Total
Exposed produce (mg/kg)	2,2 .10 ⁻⁶	1,310 ⁻⁰⁵	5,99.10 ⁻⁰⁵	7,13.10 ⁻⁰⁵
Unexposed produce (mg/kg)			1,63.10 ⁻⁰³	1,63.10 ⁻⁰³
				1,70E⁻⁰³

Ces résultats montrent que malgré des hypothèses fortement majorantes (au niveau de l'exposition) la quantité de cadmium ingérée est seulement multipliée par 2,5.

Données de consommation « françaises » et 25 % de consommables qui proviennent de la zone d'étude				Total
	Air dust mg/m ³	Ground soil mg/kg	Root soil mg/kg	
Ingestion en mg/kg/j				
Exposed produce (mg/kg)	3,03.10 ⁻⁰⁷	1,3.10 ⁻⁰⁶	2,5.10 ⁻⁰⁵	2,9.10 ⁻⁰⁵
Unexposed produce(mg/kg)			4,07.10 ⁻⁰⁴	4,07.10 ⁻⁰⁴
				4,30.10⁻⁰⁴

Le paramètre « quantités de fruits et légumes ingérés » a un impact inférieur sur la quantité de polluant ingérée par rapport au paramètre « pourcentage de fruits et légumes issus de la zone d'étude ».

L'hypothèse de fruits et légumes provenant à 100% de la zone impactée par le projet routier est fortement majorante. De plus, certaines études françaises indiquent que la part des aliments « autoconsommés », issus de la production locale est comprise entre 1% et 35% pour les fruits et légumes (source : INSEE reproduite par Biomonitor dans le rapport d'étude A45). Cette valeur est assez proche de la valeur par défaut proposée par CALTOX (24%).

Si l'on considère l'hypothèse que 25% de la consommation de fruits et légumes provient de la zone impactée par le projet et dans le cas d'un adulte, l'écart entre les calculs effectués avec les valeurs par défaut CALTOX et les données françaises est de 50%. La valeur issue des données CALTOX majorant le risque.

Au vu de ces éléments il n'apparaît pas nécessaire dans une première approche de l'évaluation des risques sanitaires d'affiner considérablement les données de consommation dans un premier temps. Les données par défaut de CALTOX semblent pouvoir être utilisées dans un premier temps elles sont conservatrices. Ces données devront toutefois être affinées si le risque calculé est trop élevé (ratio de danger>1 ou seuil d'acceptabilité de dépassé).

4.6. Conclusion

Cette étude montre que le modèle CALTOX, utilisé dans le cadre d'un projet routier simplifie fortement le système et seul un jeu réduit de paramètres semble à prendre en compte dans un premier temps. Les paramètres introduits par défaut dans CALTOX sont tous majorants au regard du risque encouru par la population et vont dans le sens de la sécurité.

Au vu de ces résultats et des connaissances actuelles, le K_{ps} (coefficient de transfert sol / plante) est le principal paramètre à affiner. En effet, dans le cas de figure étudié, la quantité de cadmium ingérée est gérée par la concentration de fond en cadmium dans les sols et non par la quantité de cadmium déposée sur les sols et végétaux via les émissions de l'infrastructure.

La détermination de K_{ps} spécifiques de la zone étudiée peut être faite à travers une campagne de mesure des polluants dans les sols et les végétaux représentatifs du site impacté par le projet.

On pourra dans un deuxième temps affiner les paramètres liés à la consommation.

D'autres paramètres seront également à affiner mais n'ont pas été pris en compte dans l'étude : les durées d'exposition, et périodes à partir desquelles on choisit de faire démarrer l'exposition.

Annexe 1

Valeurs des paramètres chimiques utilisés par défaut pour le cadmium

Chemical properties	Cd	Value used	Mean value	Coeff. Var.	Adjustment
Molecular weight (g/mol)	MW	1,12 E+02	1,12 E+02	0,000092	1
Octanol-water partition coefficient	Kow	0,00 E+00	0,00 E+00	1,2	1
Melting point (K)	Tm	5,94 E+02	5,94 E+02	0,0068	1
Vapor Pressure in (Pa)	VP	0,00 E+00	0,00 E+00	0,015	1
Solubility in mol/m ³	S	1,00 E+00	1,00 E+00	0,55	1
Henry's law constant (Pa·m ³ /mol)	H -	n/a	-99	0,25	1
Diffusion coefficient in pure air (m ² /d)	Dair	6,40 E-01	6,40 E-01	0,08	1
Diffusion coefficient; pure water (m ² /d)	Dwater	1,30 E-04	1,30 E-04	0,25	1
Organic carbon partition coefficient Koc	Koc -	n/a	-99	0,6	1
Partition coefficient in ground/root soil layer	Kd_s -	5,00 E+05	500000	1,2	1
Partition coefficient in vadose-zone soil layer	Kd_v -	5,00 E+05	500000	1,2	1
Partition coefficient in aquifer layer	Kd_q -	5,00 E+05	500000	1,2	1
Partition coeff. in surface wtr sediments	Kd_d -	5,00 E+05	500000	1,2	1
Prtn cff. plnt(abv-grd)/sl (kg[s]/kg[pFM])	Kps -	3,00 E-01	3,00E-01	4	1
Biotransfr fctr, plant/air (m ³ [a]/kg[pFM])	Kpa -	3,00 E-03	-9,90E+01	14	1
Biotransfer factor; cattle-diet/milk (d/L)	Bk -	5,00 E-05	0,00005	11	1
Biotransfer factor; cattle-diet/meat (d/L)	Bt -	1,00 E-02	0,01	13	1
Biotransfer factor; hen-diet/eggs (d/L)	Be -	6,00 E-01	0,6	14	1
Biotransfr fctr; brst mlk/mthr intake (d/kg)	Bbmk -	1,00 E-03	0,001	10	1
Bioconcentration factor; fish/water	BCF -	3,00 E+03	3000	0,12	1
Skin permeability coefficient; cm/h	Kp_w -	1,00 E-03	0,001	2,4	1
Fraction dermal uptake from soil	dfct_sl-	2,01 E-01	0,2014375	0,27	1
Reaction half-life in air (d)	Thalf_a	n/a	n/a	0,94	1
Reaction half-life in surface soil (d)	Thalf_g	n/a	n/a	1,4	1
Reaction half-life in root-zone soil (d)	Thalf_s	n/a	n/a	1,4	1
Reaction half-life in vadose-zone soil (d)	Thalf_v	n/a	n/a	1,3	1
Reaction half-life in ground water (d)	Thalf_q	n/a	n/a	1,6	1
Reaction half-life in surface water (d)	Thalf_w	n/a	n/a	1,4	1
Reaction half-life in sediments (d)	Thalf_d	n/a	n/a	1,3	1

Annexe 2

Traduction de l'ensemble des paramètres à renseigner dans la feuille de calcul CALTOX.

Chemical properties	Propriétés chimiques	Symbole
Molecular weight (g/mol)	Masse molaire(g/mol)	MW
Octanol-water partition coefficient	Coefficient de partition octanol-eau	Kow
Melting point (K)	Température de fusion (K)	Tm
Vapor Pressure (Pa)	Pression de vapeur saturante (Pa)	VP
Solubility (mol/m ³)	Solubilité (mol/m ³)	S
Henry's law constant (Pa.m ³ /mol)	Constante de la loi de Henry (Pa.m ³ /mol)	H
Diffusion coefficient in pure air (m ² /d)	Coefficient de diffusion dans l'air pur (m ² /j)	Dair
Diffusion coefficient; pure water (m ² /d)	Coefficient de diffusion dans l'eau pure (m ² /j)	Dwater
Organic carbon partition coefficient Koc	Coefficient de partition du carbone organique	Koc
Octanol/air partition coefficient	Coefficient de partition octanol/air	Koa
Partition coefficient in ground/root soil layer	Coefficient de partition dans le sol superficiel et racinaire	Kd_s
Partition coefficient in vadose-zone soil layer	Coefficient de partition dans la zone vadose	Kd_v
Partition coefficient in aquifer layer	Coefficient de partition dans la zone aquifère	Kd_q
Partition coeff. in surface wtr sediments	Coefficient de partition des sédiments de l'eau de surface	Kd_d
Leaves/phlm wtr prtn cff. (wet kg/m ³ per wet kg/m ³)	Coefficient de partition feuilles/phloème	Kl_phl
Stem/xylem-fluid prtn cff (m ³ [xylem]/m ³ [stem])	Coefficient de partition tige/xylème	Ks_x
Transpiration stream concntrtn fctr (m ³ [wtr]/m ³ [ts])	Facteur de concentration du flux de transpiration	TSCF
Biotnsfr fctr, plant/air (m ³ [a]/kg[pFM])	Facteur de biotransfert plante/air	Kpa
Biotransfer factor; cattle-diet/milk (d/kg[milk])	Facteur de biotransfert vers le lait	Bk
Biotransfer factor; cattle-diet/meat (d/L)	Facteur de biotransfert vers la viande	Bt
Biotransfer fctr; hen-diet/eggs (d/kg[egg contents])	Facteur de biotransfert vers les oeufs	Be
Biotnsfr fctr; brst milk/mthr intake (d/kg)	Facteur de biotransfert vers le lait maternel	Bbmk
Bioconcentration factor; fish/water	Facteur de biotransfert vers le poisson	BCF
Particle scavenging ratio of rain drops	Fraction de récupération des particules, des gouttes d'eau	Psr_rain
Skin permeability coefficient; cm/h	Coefficient de perméabilité de la peau (cm/h)	Kp_w
Skin-water/soil partition coefficient (L/kg)	Coefficient de perméabilité de la peau (L/kg)	Km
Fraction dermal uptake from soil	Fraction de prélèvement cutané provenant du sol	dfct_sl
Reaction half-life in air (d)	Temps de demi-vie dans l'air (j)	Thalf_a
Reaction half-life in surface soil (d)	Temps de demi-vie dans la couche de sol superficielle (j)	Thalf_g
Reaction half-life in root-zone soil (d)	Temps de demi-vie dans la couche de sol racinaire (j)	Thalf_s
Reaction half-life in vadose-zone soil (d)	Temps de demi-vie dans la couche de sol non saturé (j)	Thalf_v
Reaction half-life in ground water (d)	Temps de demi-vie dans l'eau souterraine (j)	Thalf_q
Reaction half-life in surface water (d)	Temps de demi-vie dans l'eau de surface (j)	Thalf_w
Reaction half-life in sediments (d)	Temps de demi-vie dans les sédiments (j)	Thalf_d
Reaction half-life in the leaf surface (d)	Temps de demi-vie sur la surface foliaire(j)	Thalf_ls

Anne PILLEBOUT - Mémoire de l'École Nationale de la Santé Publique - 2003

Données issues du rapport Pillebout 2003²⁶.

²⁶ Anne Pillebout 2003. CALTOX pour l'estimation des expositions liées aux rejets d'une grande installation. Mémoire de l'école nationale de la santé publique.

Landscape properties	Propriétés du site	Symbole
Contaminated area in m ²	Surface du terrain (m ²)	Area
Annual average precipitation (m/d)	Moyenne annuelle des précipitations (m/j)	rain
Flux; surface water into landscape (m/d)	Flux d'apport d'eau sur le site (m/j)	inflow
Land surface runoff (m/d)	Ruissellement à la surface du terrain (m/j)	runoff
Atmospheric dust load (kg/m ³)	Charge en poussières de l'atmosphère (kg/m ³)	rhob_a
Dry deposition velocity, air particles (m/d)	Vitesse de dépôt des particules de l'air (m/j)	v_d
Aerosol organic fraction	Fraction d'aérosols organiques	foc_ap
Volume fraction of water in leaf	Fraction volumique d'eau dans les feuilles	beta_leaf
Volume fraction of air in leaf	Fraction volumique d'air dans les feuilles	alpha_leaf
Volume fraction of lipid in leaf	Fraction volumique de lipides dans les feuilles	lipid_leaf
Volume fraction of water in stem	Fraction volumique d'eau dans les tiges	beta_stem
Volume fraction of water in root	Fraction volumique d'eau dans les racines	beta_root
Primary production dry vegetation (kg/m ² /y)	Production primaire de végétation sèche(kg/m ² /a)	veg_prod
One-sided Leaf Area Index	Indice de surface foliaire, une seule face	LAI
Wet interception fraction	Fraction d'interception humide	IF_w
Average thickness of leaf surface (cuticle) (m)	Épaisseur moyenne de la surface des feuilles, cuticule (m)	d_cuticle
Stem wet density (kg/m ³)	Masse volumique des tiges (kg/m ³)	rho_stm
Leaf wet density (kg/m ³)	Masse volumique des feuilles (kg/m ³)	rho_leaf
Root wet density (kg/m ³)	Masse volumique fraîche des racines (kg/m ³)	rho_root
Vegetation attenuation factor, dry interception (m ² /kg)	Facteur d'atténuation végétale, interception sèche (m ² /kg)	atf_leaf
Stomata area fraction (area stomata/area leaf)	Rapport surface stomate/surface feuille	na_st
Effective pore depth	Épaisseur de porosité effective	del_st
Boundary layer thickness over leaves	Épaisseur de la couche limite au-dessus des feuilles	del_a
Leaf surface erosion half-life (d)	Temps de demi-vie érosion sur feuilles (j)	Thalf_le
Ground-water recharge (m/d)	Recharge des eaux souterraines (m/j)	recharge
Evaporation of water from surface water (m/d)	Évaporation de l'eau de surface (m/j)	evaporate
Thickness of the ground soil layer (m)	Épaisseur de la couche de sol superficielle (m)	d_g
Soil particle density (kg/m ³)	Densité de particules du sol (kg/m ³)	rhos_s
Water content in surface soil (vol fraction)	Fraction volumique de l'eau contenue dans la couche de sol superficielle	beta_g
Air content in the surface soil (vol frctn)	Fraction volumique de l'air contenu dans la couche de sol superficielle	alpha_g
Erosion of surface soil (kg/m ² -d)	Erosion de la couche de sol superficielle (kg/(m ² .j))	erosion_g
Bioturbation (m ² /d)	Bioturbation (m ² /j)	D_bio
Thickness of the root-zone soil (m)	Épaisseur de la couche de sol racinaire (m)	d_s
Water content of root-zone soil (vol. frctn.)	Fraction volumique de l'eau contenue dans la couche de sol racinaire	beta_s
Air content of root-zone soil (vol. frctn.)	Fraction volumique de l'air contenu dans la couche de sol racinaire	alpha_s
Thickness of the vadose-zone soil (m)	Épaisseur de la couche de sol non saturée (m)	d_v
Water content; vadose-zone soil (vol. frctn.)	Fraction volumique d'eau contenue dans la couche de sol non saturée	beta_v
Air content of vadose-zone soil (vol. frctn.)	Fraction volumique d'air contenu dans la couche de sol non saturée	alpha_v
Thickness of the aquifer layer (m)	Épaisseur de la zone aquifère (m)	d_q
Solid material density in aquifer (kg/m ³)	Densité des matières solides dans la zone aquifère (kg/m ³)	rhos_q
Porosity of the aquifer zone	Fraction d'air (porosité) de la zone aquifère	beta_q
Fraction of land area in surface water	Fraction du site recouvert par l'eau de surface	f_arw
Average depth of surface waters (m)	Profondeur moyenne des eaux de surface (m)	d_w
Suspended sediment in surface water (kg/m ³)	Sédiments en suspension dans l'eau de surface (kg/m ³)	rhob_w
Suspended sediment deposition (kg/m ² /d)	Dépôt des sédiments en suspension (kg/(m ² .j))	deposit
Thickness of the sediment layer (m)	Épaisseur de la couche de sédiments (m)	d_d
Solid material density in sediment (kg/m ³)	Densité des matières solides dans les sédiments (kg/m ³)	rhos_d
Porosity of the sediment zone	Porosité de la zone de sédiments	beta_d
Sediment burial rate (m/d)	Vitesse d'enfouissement des sédiments (m/j)	bury_d
Ambient environmental temperature (K)	Température ambiante (K)	Temp
Surface water current in m/d	Courant de l'eau surfacique (m/j)	current_w
Organic carbon fraction in upper soil zone	Fraction de carbone organique dans la couche de sol superficielle	foc_s
Organic carbon fraction in vadose zone	Fraction de carbone organique dans la couche de sol non saturée	foc_v
Organic carbon fraction in aquifer zone	Fraction de carbone organique dans la zone aquifère	foc_q
Organic carbon fraction in sediments	Fraction de carbone organique dans les sédiments	foc_d
Boundary layer thickness in air above soil (m)	Épaisseur de l'air au-dessus du sol (m)	del_ag
Yearly average wind speed (m/d)	Vitesse annuelle moyenne du vent (m/j)	v_w
Thickness of the vadose-zone soil (m)	Épaisseur de la couche de sol non saturée (m)	d_v
Water content; vadose-zone soil (vol. frctn.)	Fraction volumique d'eau contenue dans la couche de sol non saturée	beta_v
Air content of vadose-zone soil (vol. frctn.)	Fraction volumique d'air contenu dans la couche de sol non saturée	alpha_v
Thickness of the aquifer layer (m)	Épaisseur de la zone aquifère (m)	d_q
Solid material density in aquifer (kg/m ³)	Densité des matières solides dans la zone aquifère (kg/m ³)	rhos_q
Porosity of the aquifer zone	Fraction d'air (porosité) de la zone aquifère	beta_q
Fraction of land area in surface water	Fraction du site recouvert par l'eau de surface	f_arw
Average depth of surface waters (m)	Profondeur moyenne des eaux de surface (m)	d_w
Suspended sediment in surface water (kg/m ³)	Sédiments en suspension dans l'eau de surface (kg/m ³)	rhob_w
Suspended sediment deposition (kg/m ² /d)	Dépôt des sédiments en suspension (kg/(m ² .j))	deposit
Thickness of the sediment layer (m)	Épaisseur de la couche de sédiments (m)	d_d
Solid material density in sediment (kg/m ³)	Densité des matières solides dans les sédiments (kg/m ³)	rhos_d
Porosity of the sediment zone	Porosité de la zone de sédiments	beta_d
Sediment burial rate (m/d)	Vitesse d'enfouissement des sédiments (m/j)	bury_d
Ambient environmental temperature (K)	Température ambiante (K)	Temp
Surface water current in m/d	Courant de l'eau surfacique (m/j)	current_w
Organic carbon fraction in upper soil zone	Fraction de carbone organique dans la couche de sol superficielle	foc_s
Organic carbon fraction in vadose zone	Fraction de carbone organique dans la couche de sol non saturée	foc_v
Organic carbon fraction in aquifer zone	Fraction de carbone organique dans la zone aquifère	foc_q
Organic carbon fraction in sediments	Fraction de carbone organique dans les sédiments	foc_d
Boundary layer thickness in air above soil (m)	Épaisseur de l'air au-dessus du sol (m)	del_ag
Yearly average wind speed (m/d)	Vitesse annuelle moyenne du vent (m/j)	v_w

Annexe 3

Analyse des données utilisées par BIOMONITOR dans A45

Biomonitor a utilisé les valeurs par défaut fournies par le logiciel CALTOX pour les paramètres qui suivent :

- o La pression de vapeur,
- o La solubilité,
- o Le coefficient de partage Octanol –eau
- o Ainsi que les coefficients de partage des métaux au niveau des différentes couches de sols et de sédiments

Des données spécifiques au site ou des données issues d'études françaises ont été utilisées quand cela était possible. Il s'agit des paramètres suivant :

Paramètres météorologiques Valeurs spécifiques Source d'information

- o Précipitations : 0,0023 m/j (site Internet Météo France)
- o Température ambiante : 288 K (site Internet Météo France)
- o Paramètres du sol Valeurs spécifiques Source d'information
- o Densité de matière fraîche 1 300 kg/m³ (Etude CIRE Ouest)
- o Fraction d'air dans le sol superficiel 0,53 Etude CIRE Ouest
- o Epaisseur de la zone racinaire : 30 cm (INERIS)
- o Fraction d'air dans le sol racinaire : 0,53 (Étude CIRE Ouest)
- o Fraction de Carbone Organique dans le sol : 1,83 % (Analyses sol A45)
- o Fraction de matière sèche dans les légumes-feuilles : 0.053 (Analyses A45 (médiane))
- o Fraction de matière sèche dans les légumes-fruits : 0.084 (Analyses A45 (médiane))
- o Fraction de matière sèche dans les fruits : 0.17 (Analyses A45 (médiane))
- o Fraction de matière sèche dans l'herbe : 0.20 (Analyses A45 (médiane))
- o Fraction de matière sèche dans les légumes-racines : 0.12 (Analyses A45 (médiane))

Prise en compte des concentrations initiales mesurées dans l'environnement

Démarche mise en place par biomonitor dans le cadre du projet autoroutier A45.

Le logiciel Caltox a été élaboré pour prendre en compte le bruit de fond mesuré à l'état initial. Le problème, soulevé par l'INERIS est que les concentrations initiales considérées comme constantes dans le temps sont intégrées par Caltox dans les calculs de transfert dans l'environnement. Pour s'affranchir de ces transferts et considérer comme constantes ces concentrations, l'INERIS propose d'ajouter aux concentrations modélisées dans les compartiments environnementaux par le logiciel les concentrations initiales. Il s'agit donc de modifier les équations qui figurent dans les cellules O99 à T99 au niveau du tableau final de résultat des calculs de concentrations environnementales et celles des produits d'exposition (figure A-13). Dans le cas étudié, les cellules O99, P99, Q99 et R99 ont été modifiées. Elles correspondent respectivement aux concentrations en polluants particuliers dans l'air, dans la couche de sol superficiel et dans la couche de sol racinaire. On prendra les mêmes concentrations maximales mesurées dans les échantillons de sol pour renseigner les cases concernant la couche de sol superficiel et racinaire.

FIGURE A-13 : FENÊTRE CALTOX DES RÉSULTATS DES CONCENTRATIONS DANS L'ENVIRONNEMENT ET LES PRODUITS D'EXPOSITION.

Concentrations environnementales modélisées + concentrations initiales

ENVIRONMENTAL Media	Air (gases) mg/m ³	Air (dust) mg/m ³	Ground soil mg/kg	Root soil mg/kg	Ground water mg/L	Surface water mg/L
CONCENTRATIONS	2,51 E-05	1,69 E-14	2,92 E-05	1,20 E-02	1,92 E-04	1,05 E-05

5. Mise en place et premiers résultats d'une campagne de mesure de la concentration en polluants dans la fraction particulaire, dans les sols et dans les végétaux pour évaluer le modèle

L'utilisation d'un modèle multimédia d'exposition tel que CALTOX pour l'évaluation des risques sanitaires nécessite de connaître un certain nombre de paramètres afin de caractériser au mieux les différents milieux (eau, sols, végétaux). Toutes les données n'étant pas toujours disponibles, il est souvent nécessaire d'utiliser des valeurs par défaut, notamment à niveau de la caractérisation des sols, ce qui a un impact sur les transferts des polluants vers les eaux et les végétaux.

Dans un premier temps, notre objectif est de réaliser des investigations de terrain afin de caractériser les différents milieux (sols, végétaux, retombées atmosphériques).

Dans un deuxième temps, ces données seront indispensables afin de calibrer l'utilisation de modèle sanitaire (CALTOX).

Ce rapport présente les premiers résultats des investigations de terrain.

5.1. Campagne de mesures

5.1.1. Zone d'étude

La zone d'étude de retombées atmosphériques liées à la circulation routière se trouve au Nord de Lyon, en bordure de l'autoroute A6, entre l'échangeur « Porte de Lyon » et le péage de Villefranche sur Saône.

Une première visite de la zone (le 14 février 2006) a permis de pré sélectionner sept sites potentiels de part et d'autre de la voie routière, en fonction du trafic, de la topographie, de l'occupation des sols, des aménagements et de la végétation.

Ces différents sites sont localisés sur les cartes de la page suivante. Les photographies et les profils en travers qui suivent en donnent une représentation un peu plus précise ainsi que les caractéristiques topographiques essentielles.

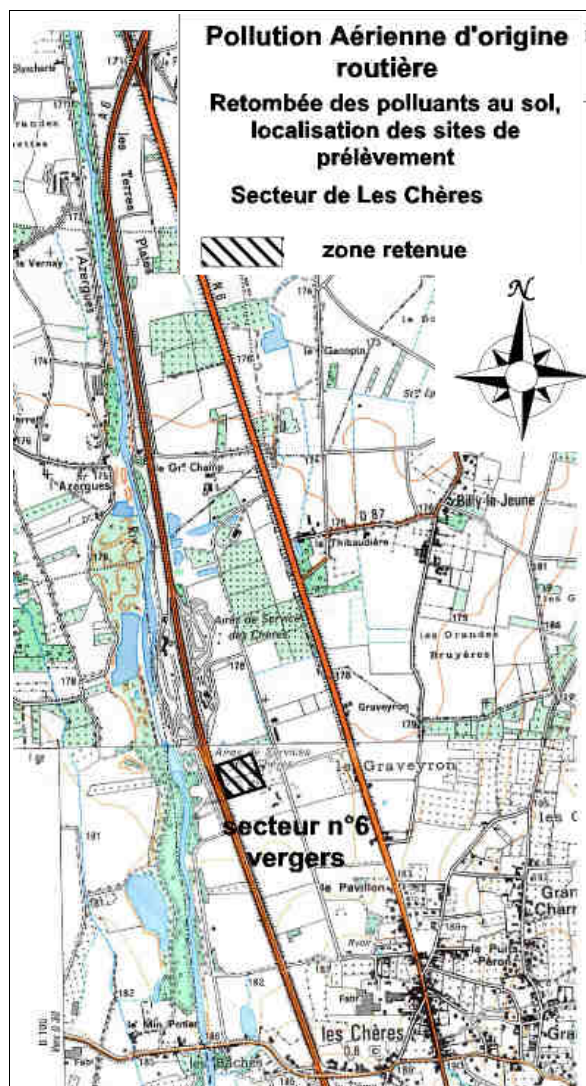
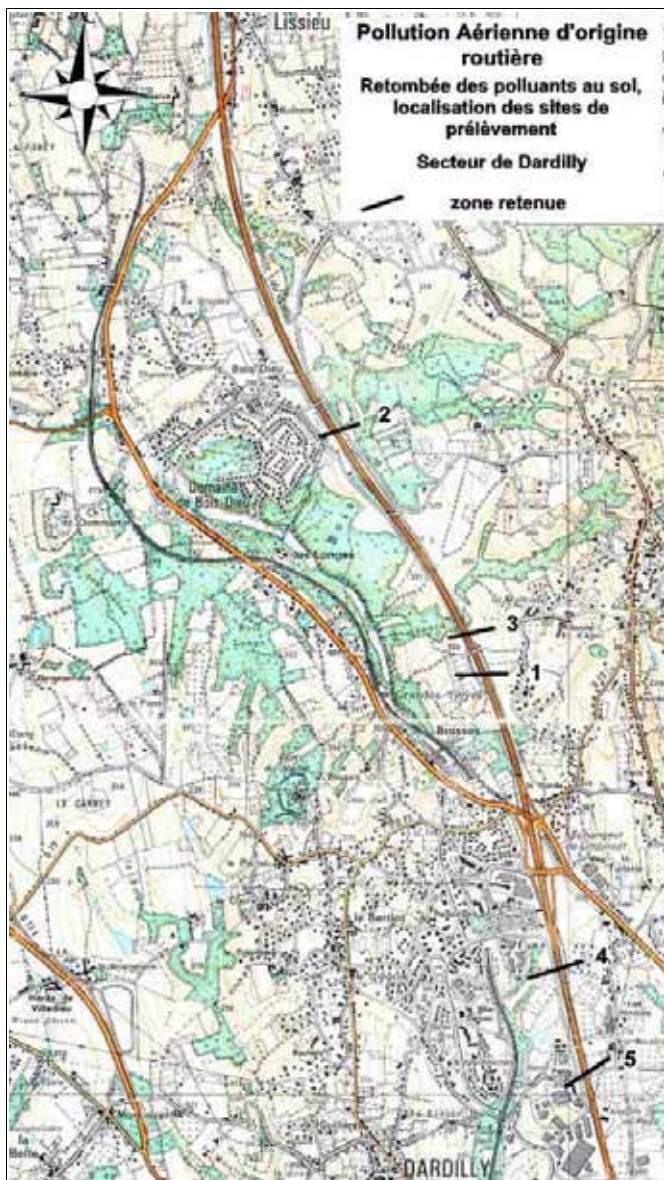
5.1.2. Choix des sites retenus pour des échantillonnages sols - végétaux

Après analyse détaillée des points ci-dessous :

- caractéristiques physiques des sites en tenant compte des possibilités de contamination des milieux par ruissellement des chaussées et des retombées atmosphériques
- définition du nombre d'analyses en fonction du budget alloué ;
- moyens matériels disponibles pour les prélèvements de poussière et conditions de sécurité pour le matériel devant rester à poste pendant un mois ;
- type de végétation ou cultures susceptibles de fixer des contaminants et d'intégrer de façon directe ou indirecte la chaîne alimentaire.

Seuls trois sites ont été retenus pour l'étude :

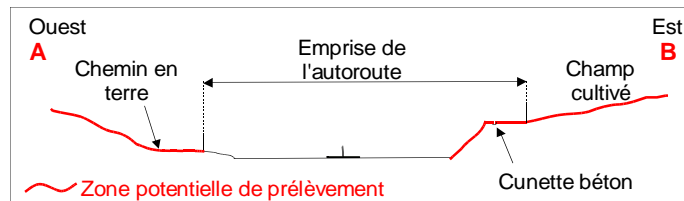
- Site n° 3 : transect dans une zone de pâturage ;
- Site n° 4 : transect dans une zone de verger ;
- Site n° 7 : zone de maraîchage.



Les photographies ainsi que les coupes des différents sites visités sont présentées ci-dessous :

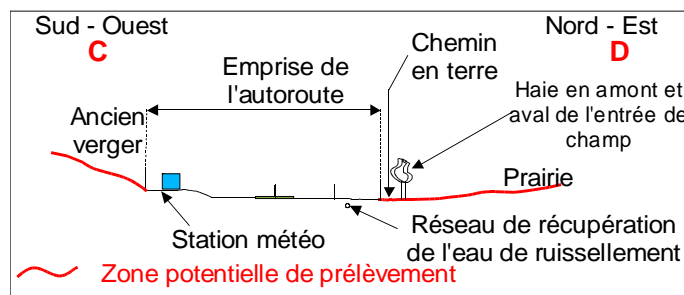
Site n°1 -A6 – Nord de la porte de Lyon

Trafic : 37000 véhicules/jour



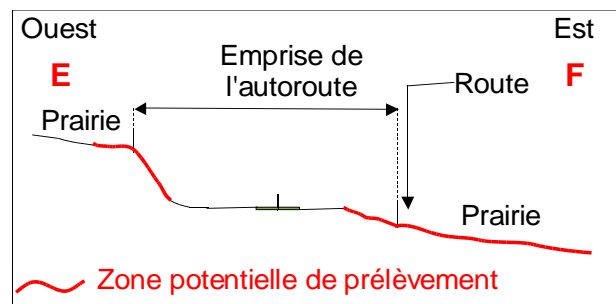
Site n°2 – A6 – au niveau de Bois Dieu

Trafic : 37000 véhicules/jour



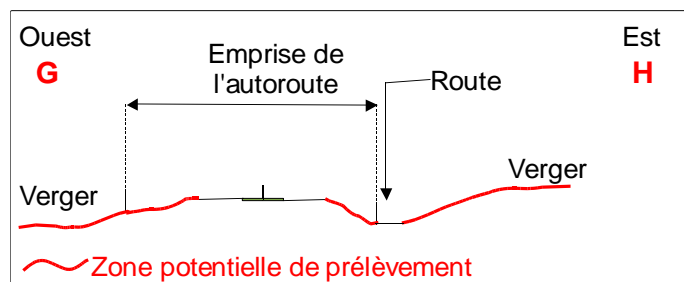
Site n°3 – A6 – Entre Bois Dieu et la RN6

Trafic : 37000 véhicules/jour



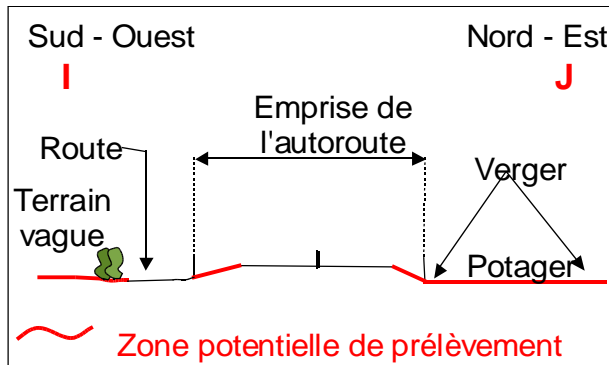
Site n°4 – A6 – au Sud du camping municipal

Trafic : 76000 véhicules/jour



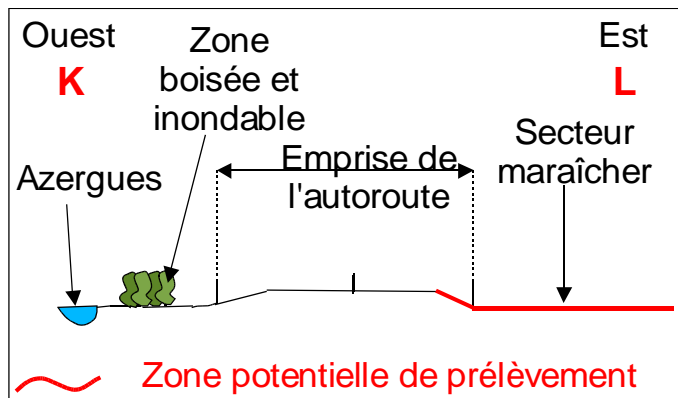
Site n°5 – A6 – au nord de l'aire de service de Passy

Trafic : 76000 véhicules/jour



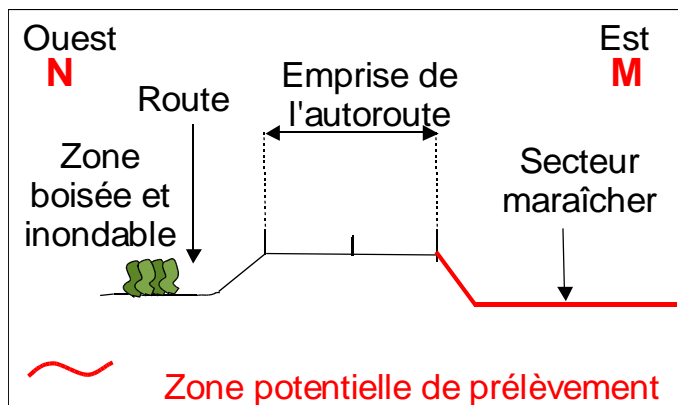
Site n°6 -A6 – Au niveau des Chères

Trafic : 37000 véhicules/jour



Site n°7 – A6 – Au niveau du péage de Villefranche

Trafic : 78000 véhicules/jour

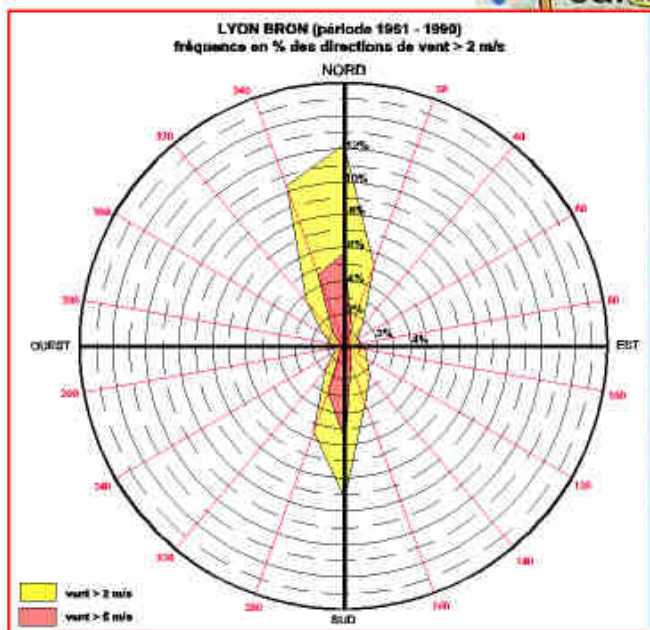
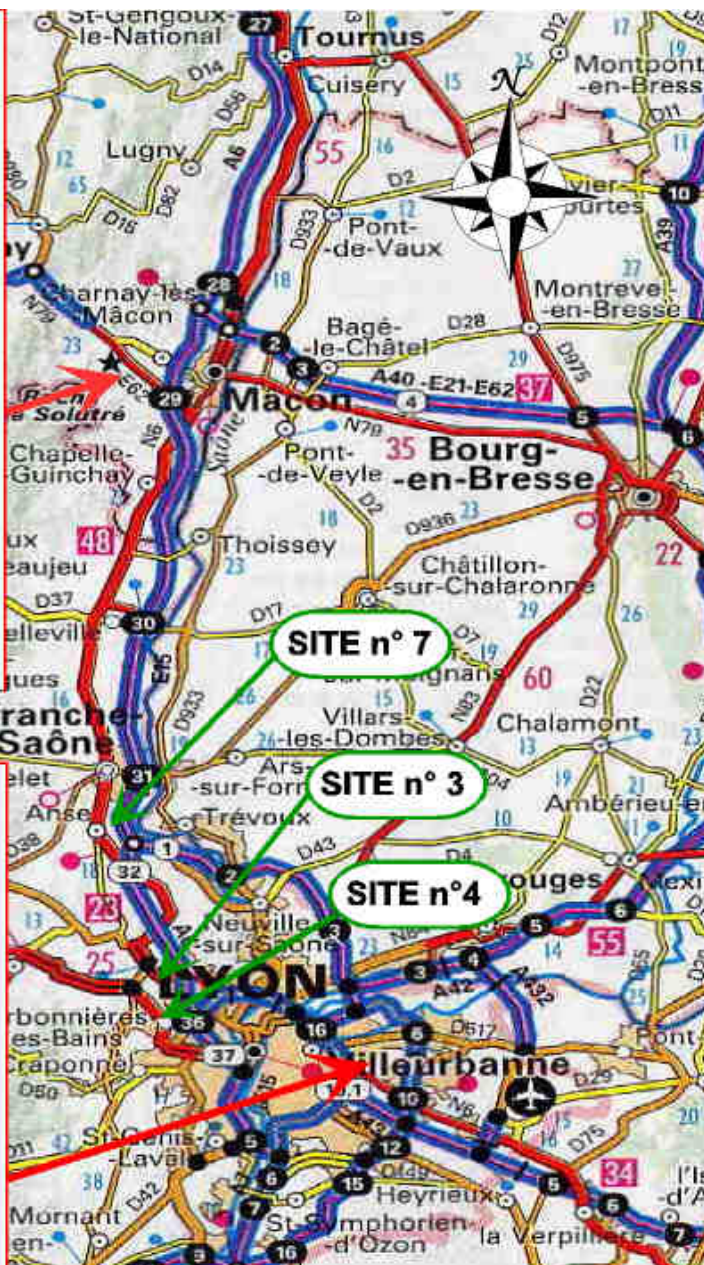
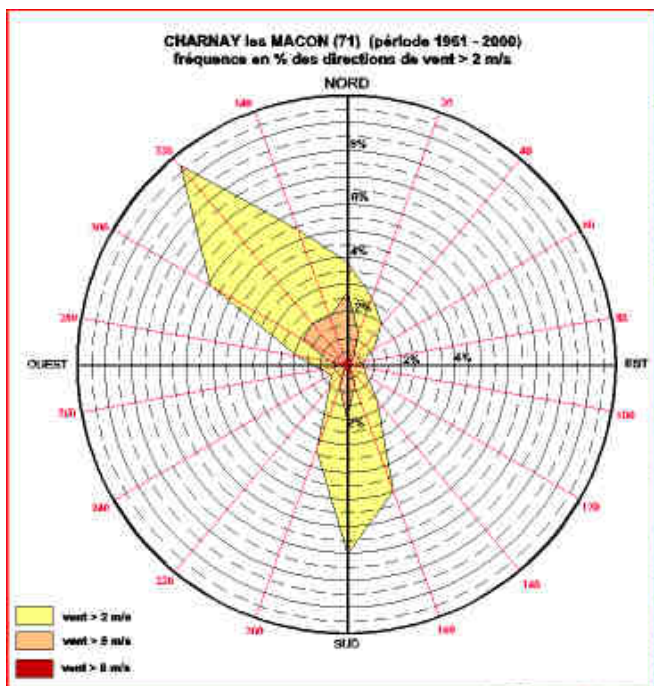


5.1.3. Caractéristiques des sites étudiés

5.1.3.1. Données météorologiques

Les deux stations météorologiques les plus proches, pour lesquelles nous disposons de données sont les centres départementaux de Lyon – Bron (pour le Rhône) et de Charnay les Macon (pour la Saône-et-Loire).

5.1.3.1.1. Les vents



Sur les trois sites choisis, compte tenu de la disposition des reliefs de bordure et de leur situation plutôt au centre de vallée, nous pouvons considérer que l'influence du vent sera semblable, et qu'il n'y a pas de vents transversaux dominants.

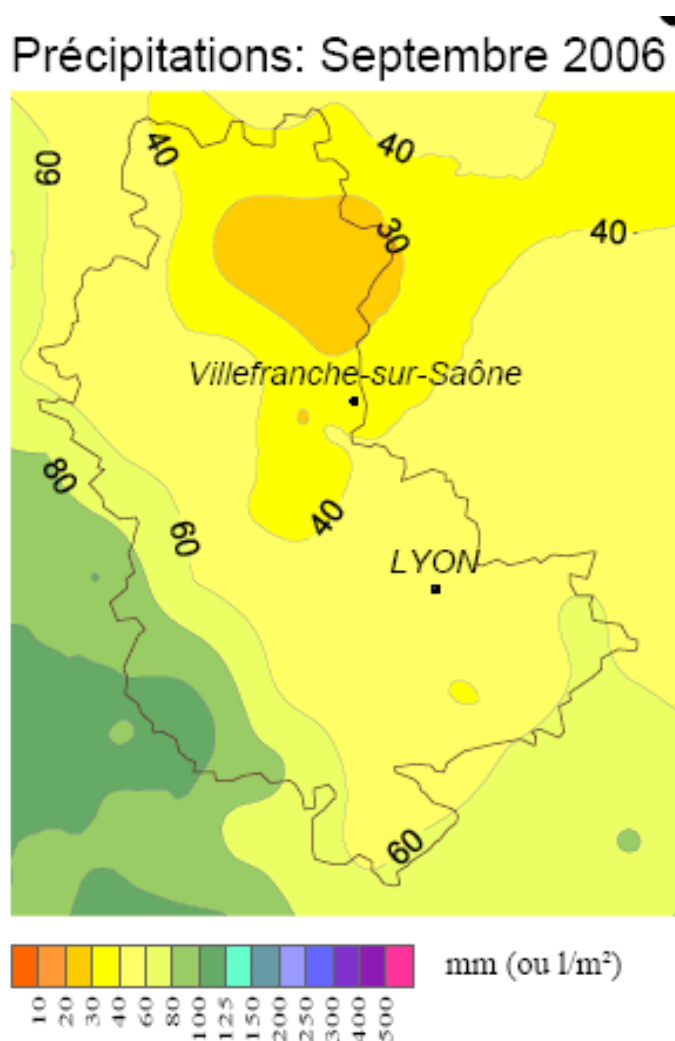
Il n'existe pas de mesures des vitesses de vent proches des sites étudiés, et on se basera sur les roses des vents de Bron (à environ 25 kilomètres au Sud - Est) et Charnay les Macon (à environ 40 kilomètres au Nord). La carte ci-après, qui présente ces données, montre une orientation globale des vents suivant un axe Nord – Sud, correspondant également à l'alignement des reliefs et à la vallée de la Saône qui ont une forte influence et guident les vents de basse altitude.

En ce qui concerne Charnay les Macon, l'aérodrome d'où proviennent les données météorologiques est situé sur la bordure Ouest de la vallée, dans un secteur où le relief est fortement entaillé par de large vallons transversaux, d'où l'importance des vents de Nord – Ouest qui représentent un cas particulier par rapport à l'axe de la vallée

En considérant la zone de prélèvements, Villefranche/Lyon, on peut admettre que les vents sont majoritairement dirigés nord – sud ou sud - nord, ce qui correspond sensiblement à la direction de l'autoroute A6.

5.1.3.1.2. La pluviométrie

La carte ci-dessous indique, pour le mois de septembre 2006 (période de collecte de dépôt particulaire), une hauteur de précipitation de 40 millimètres au voisinage du site n°7 et de 40 à 60 millimètres pour les deux autres sites.



5.1.3.2. Caractéristiques générales des sites retenus

Les différentes caractéristiques et opérations réalisées sur chaque site sont présentées dans les tableaux suivants :

N° du site	Trafic (véh./jour) données 2004	Nature du sol
7	78 000 dont 18 % PL	Substratum : alluvions Sol de surface : limons
3	37 000 dont 15 % PL	Substratum : ≈ granite (anatexite à biotite ou à 2 mica) Sol de surface : altération (arène)
4	76 000 dont 9 % PL	Substratum : ≈ granite (anatexite à biotite ou à 2 mica) Sol de surface : loess

N° site	Milieux étudiés	Type de végétation	Végétaux prélevés
7	Sols – végétaux – retombées particulières	maraîchage	Salades – poireaux - radis
3	Sols	prairie	aucun
4	Sols – végétaux	verger	graminées

En ce qui concerne le site n° 4, il était prévu de récolter des fruits, mais compte tenu du délai requis pour les analyses, on a préféré ne pas attendre qu'ils soient mûrs et prélever des graminées au pied des arbres.

5.1.3.3. Analyses réalisées

La tableau ci-dessous indique les substances recherchées pour chaque milieu

Compartment type	Éléments traces métalliques (ETM)	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)
Sol	Arsenic, Baryum, Cadmium, Chrome, Mercure, Nickel, Plomb et Zinc	15 : Naphtalène, Acénaphène, Fluorène, Phénanthrène, Anthracène, fluoranthène, Pyrène, Benzo(a)anthracène, Chrysène, Benzo(b)fluoranthène, Benzo(k)fluoranthène, Benzo(a)pyrène, Dibenzo(a,h) anthracène, Benzo(g,h,i)pérylène et indéno(1,2,3-cd)pyrène
Dépôt particulaire	Idem sol sauf Mercure (analyses sur les retombées insolubles et solubles)	
Végétaux	Idem sol sauf Mercure	16 : idem sol + acénaphylène

5.2. Stratégie d'échantillonnage des différents milieux

5.2.1. Sol

5.2.1.1. Échantillonnage

Les méthodes et normes d'échantillonnage utilisées et adaptées pour l'étude sont les suivantes :

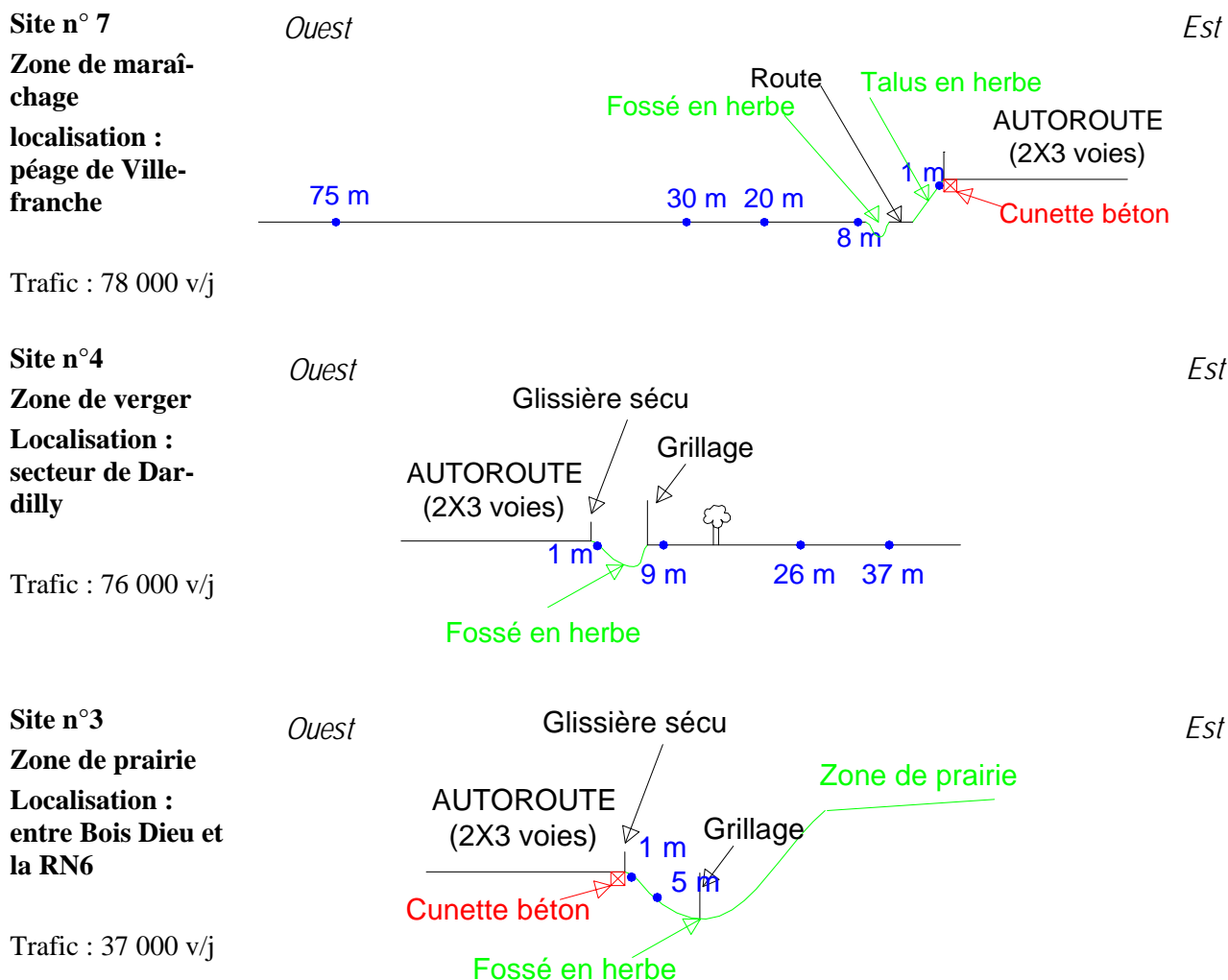
- NF X 31 100 : méthode de prélèvement d'échantillon de sols
- NF ISO 11 464 : prétraitement des échantillons pour analyses physico-chimiques

Les échantillons analysés sont constitués de 3 à 8 prélèvements unitaires, prélevés sur des lignes d'environ 20 mètres de longueur, parallèles à l'infrastructure routière et pour divers distances d'éloignement par rapport à la chaussée (distances comprises entre 1 et 75 mètres).

L'épaisseur de sol prélevé est d'environ 5 centimètres pour les zones de graminées (sol très compact) à 10 centimètres pour les zones de culture (sol agricole).

Les prélèvements unitaires de chaque ligne ont été débarrassés manuellement de leur végétation, homogénéisés, puis réduits par la méthode de quartage afin d'obtenir la quantité suffisante, représentative pour les analyses. L'échantillon final a ensuite été conditionné dans des bocaux en verre distincts pour les analyses des ETM ou des HAP.

Les différents points de prélèvement d'échantillons de sols pour les trois sites sont représentés sur les profils suivants :



Il faut noter la présence d'une cunette béton récupérant l'eau de ruissellement en bordure de chaussée pour les site n°7 et n° 3 (zone de maraîchage et zone de prairie), ce qui évite l'apport direct de contaminants sur les bas-cotés par les eaux provenant du lessivage de la chaussée.

Pour le site n° 4 (zone de verger), l'eau de ruissellement sur chaussée est récupérée directement dans un fossé enherbé placé derrière une glissière de sécurité. Les sols et la végétation des bas-cotés, entre chaussée et fond de fossé, peuvent donc être contaminés par les eaux de lessivage, ce qui est confirmé par l'observation au niveau de l'interface chaussée / herbe d'un dépôt apporté par les eaux de ruissellement.

5.2.1.2. Analyse sur les sols

Les analyses ont été réalisées par les organismes suivants et avec les modalités définies ci-après.

- **ETM** : Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Lille, selon la norme *NF EN ISO 11 466 – qualité des sols – extraction des éléments en traces solubles dans l'eau régale – juin 2005* ;
- **HAP** : Laboratoire Régional de l'Ouest Parisien, selon les normes :
 - *NF EN ISO 13 877 : Qualité du sol. Dosage des hydrocarbures aromatiques polycycliques. Méthode par chromatographie en phase liquide à haute performance,*
 - *XP X 33 012 et ISO 17 993 : 2004 : Qualité de l'eau. Dosage de 15 hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dans l'eau par HPLC avec détection par fluorescence après extraction liquide-liquide.*

5.2.2. Dépôt particulaire

Le nombre de préleveurs disponibles, prêtés par le Laboratoire Régional de Lille, étant limité, un seul transect a été équipé.



5.2.2.1. Échantillonnage

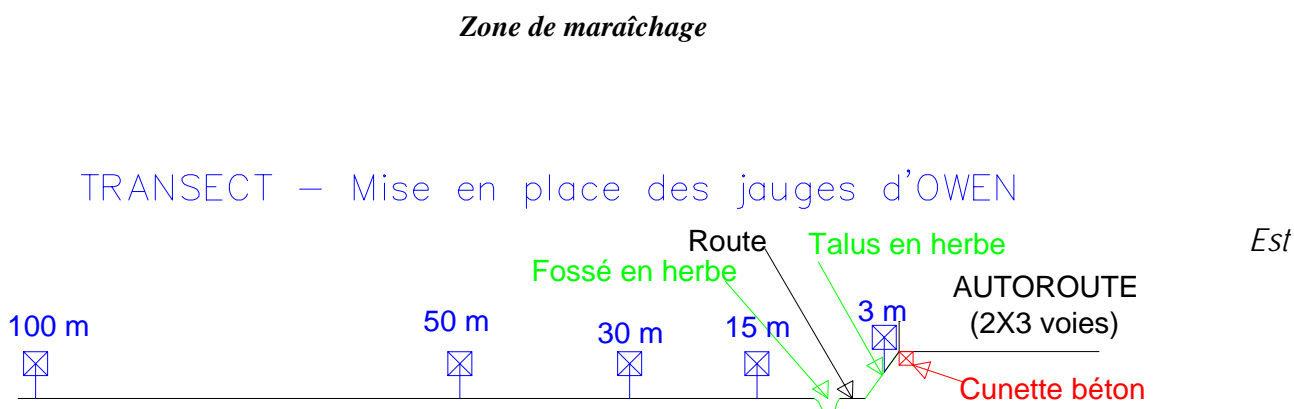
Le site n°7, zone de maraîchage, a été choisi pour l'implantation de la station de prélèvement pour les raisons suivantes :

- cette zone est dégagée et plate, il n'y a pas d'obstacles naturels ou artificiels pouvant interférer dans la dispersion des polluants atmosphériques provenant de l'autoroute ;
- le propriétaire a donné son accord pour l'occupation temporaire et accepté les contraintes ;
- une sécurité minimale était assurée par la présence très fréquente de personnes sur le site (période de récolte) ;
- il n'y a pas de risque de renversement des jauges par les animaux comme dans une prairie.

Le collecteur utilisé, de type jauge d'OWEN, est constitué d'un récipient de collecte d'une capacité de plusieurs litres au goulot duquel est raccordé de façon étanche un collecteur en forme d'entonnoir (ces deux éléments sont en verre). L'ensemble est maintenu à distance du sol par un support métallique tripode avec une hauteur entre le sol et le bord du collecteur d'environ 2 mètres.

Dans le cas de l'étude, cinq jauges d'OWEN ont été placées sur un transect perpendiculaire à la chaussée, à 3, 15, 30, 50 et 100 mètres de la bordure de l'autoroute, pour une durée d'un mois (du 30 août au 29 septembre 2006). La pluviométrie pendant cette période se situe entre 40 et 50 mm. L'autoroute est en remblai d'environ 3 mètres de haut et la jauge située à 3 mètres de la voie est placée dans la pente à mi-talus, alors que les autres jauges sont placées en contrebas de l'autoroute et toutes quasi à la même altitude.

Le schéma ci-dessous visualise l'implantation des jauges d'Owen :



5.2.2.2. Analyses

Les analyses ont été effectuées par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussée de Lille selon la **norme NF X 43 014** : *qualité de l'air - Air ambiant – détermination des retombées atmosphériques totales – échantillonnage -préparation des échantillons avant analyses – novembre 2003*.

Le protocole est le suivant :

- sur le terrain, lors de la récupération du matériel, rinçage de l'entonnoir avec de l'eau distillée en quantité aussi faible que possible pour transférer les éventuelles poussières dans le flacon, fermeture étanche du récipient ;
- conservation des jauges en chambre froide (5°C) en attendant le transport au laboratoire de Lille ;
- à l'arrivée au laboratoire, les échantillons sont pesés afin d'évaluer la masse des retombées recueillies (eau + « poussières »). Après une première vidange de leur contenu, les jauges sont rincées plusieurs fois avec de petites quantités d'eau. Ces eaux de rinçage sont centrifugées, et le culot (constitué des poussières non récupérées lors de la première vidange) est ensuite intégré à l'échantillon initial avec un minimum d'eau. Toutes les analyses sont effectuées sur cet échantillon « d'eau brute ».

La détermination des retombées insolubles (RI) est réalisée selon la **norme NF EN 872** : *qualité de l'eau – dosage des matières en suspension – méthode par filtration sur filtre en fibre de verre – juin 2005*.

La porosité des filtres est de 2µm. La prise d'essai est filtrée sous vide. Le filtrat est recueilli pour analyses (**norme NF ISO 11 466** et **norme ISO 11 885**) et le « gâteau » de filtration est rincé puis séché à 105°C jusqu'à poids constant. Le rapport masse/volume permet de déterminer la teneur en RI.

La teneur en ETM dans les retombées totales est réalisée par minéralisation au micro-onde d'une prise d'essai de 40 ml d'eau brute suivant les prescription de la **norme NF ISO 11 466** (extraction par 5 ml d'eau régale pour un volume total de 50 ml). Après rinçage et filtration, les minéralisats sont récupérés en fiole jaugée de 50 ml, puis dosés suivant la **norme ISO 11 885**.

5.2.3. Végétaux

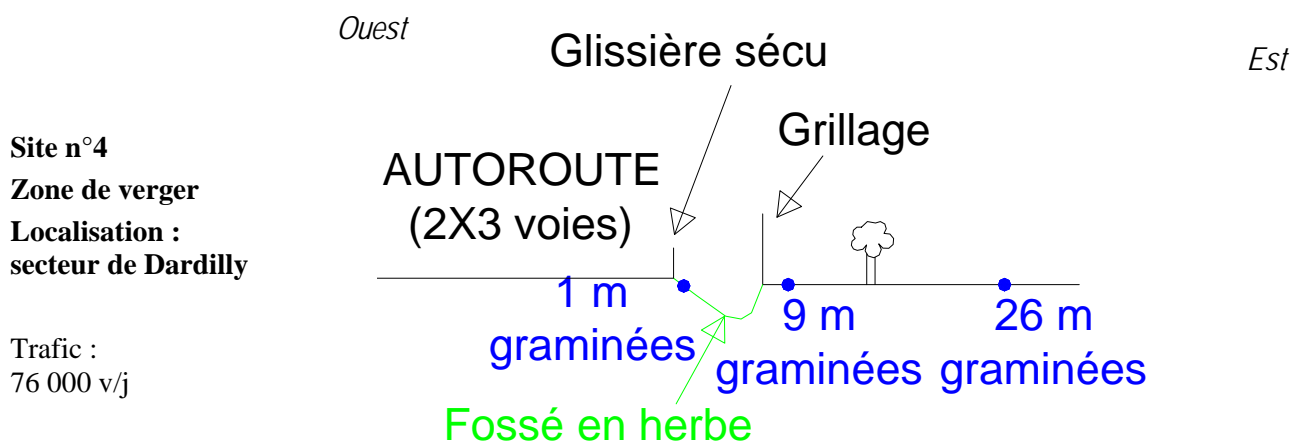
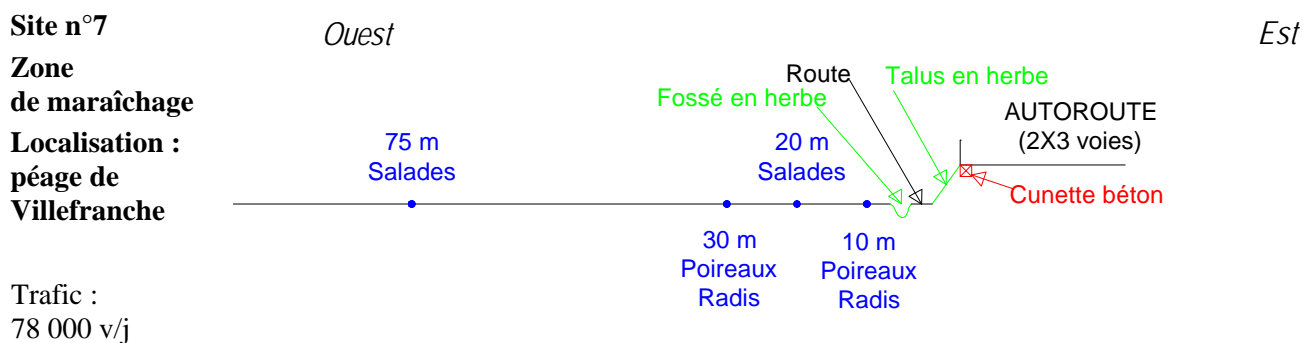
5.2.3.1. Prélèvements

Les espèces de végétaux suivantes ont été prélevées :

Espèces prélevées	Zones de prélèvement	Site	Dates de prélèvement
Salades	Maraîchage	7	11 juillet et 29 septembre 2006
Poireaux	Maraîchage	7	11 juillet 2006
Radis	Maraîchage	7	11 juillet 2006
Graminées	Verger	4	11 juillet et 30 août 2006

Il faut noter que, lors de nos prélèvements, les fruits présents dans la zone de verger n'étaient pas mûrs. Nous n'avons donc prélevé que les graminées aux pieds des arbres fruitiers.

Les points de prélèvements de végétaux sont localisés sur les schémas ci-après :



5.2.3.2. Analyses

Les analyses en métaux ont été effectuées par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussée de Lille selon la norme NF EN ISO 11 466.

Le protocole pour le dosage des végétaux est le suivant :

Préparation des échantillons

Les parties mortes ou abîmées ainsi que la zone racinaire sont préalablement retirées. La quasi-totalité de l'échantillon brut est lavée à l'eau courante puis rincée plusieurs fois à l'eau ultrapure jusqu'à disparition des traces de sols et enfin « essorée ». Après séchage jusqu'à poids constant à 105°C, l'échantillon est analysé.

Dosage des ETM

Les concentrations en ETM sont déterminées après mise en solution d'une prise d'essai de 2g de végétaux broyés à 500 µm et calcinés à 450°C pendant 3 h selon la **norme NF ISO 14 869-1**. Les cendres sont minéralisées à l'eau régale selon la **norme NF ISO 11466**, puis après filtration et rinçage, les minéralisats sont jaugés à 100 ml. Les ETM sont dosés suivant la **norme ISO 11 885** (ICP).

Les analyses en HAP ont été effectuées par la société Micropolluants Technologie S.A. De Thionville selon une méthode interne.

5.3. Résultats

Les tableaux de résultats sont consultables en annexe.

5.3.1. Les teneurs en ETM dans les sols

5.3.1.1. Mercure

Zone maraîchère et prairie (sites 7 et 3) : tous les prélèvements ont des teneurs en mercure inférieures au seuil de détection analytique (0,2 mg/kg).

Zone de verger (site 4) : les teneurs mesurées sont égales au seuil de détection qui est de 0,2 mg/kg.

L'infrastructure routière et son exploitation n'engendrent pas d'impact mesurable en mercure au niveau du sol.

5.3.1.2. Arsenic

On ne constate pas d'enrichissement significatif du sol en arsenic, les teneurs étant regroupées entre 12 et 15 mg/kg et indépendantes de l'éloignement à la chaussée. Ceci laisse supposer que ces concentrations correspondent au fond géochimique naturel. La moyenne est de 14 mg/kg, avec un écart type de 2,7 mg/kg.

Sur la prairie (site n°3), une valeur est supérieure (21,6 mg/kg à 1 m de la chaussée). Cette zone a un relativement faible trafic par rapport aux autres zones d'étude et n'est pas influencée par les eaux de ruissellement (présence d'une cunette béton en bordure de chaussée). Il est donc peu probable que cette teneur provienne de la route.

	Maraîchage	Verger	Prairie
Trafic (véh./jour)	77 000	76 000	37 000
Moyenne (mg/kg)	13,70	12,25	18,30
Maximum (mg/kg)	15,1	13,8	21,6
Minimum (mg/kg)	12,4	11,8	15
Écart type(mg/kg)	0,95	1,11	4,67

Le tableau ci-dessus montre que les teneurs des sols en arsenic sont plus élevées sur la zone de prairie, ce qui est à relier à l'origine cristalline du sol (zone d'altération du granite : arène).

5.3.1.3. Cadmium / Plomb / Zinc

Pour ces trois éléments, nous observons la même tendance à la décroissance des valeurs en fonction de l'éloignement par rapport à la chaussée. La tendance est bien visualisée par les courbes de corrélation, d'allure assez proche et dont le coefficient a une valeur admissible (cf. graphiques présentés dans les pages suivantes).

Au niveau du verger, on peut noter les points particuliers suivants :

- la teneur en cadmium, plomb, et zinc, obtenue sur le prélèvement situé à 1 mètre de la chaussée et donnant des valeurs très supérieures aux autres zones, n'a pas été représentée sur les différents graphiques. En effet, les observations de terrain indiquent que ce prélèvement, situé entre la chaussée et le fossé, est influencé par les eaux de ruissellement de la chaussée.

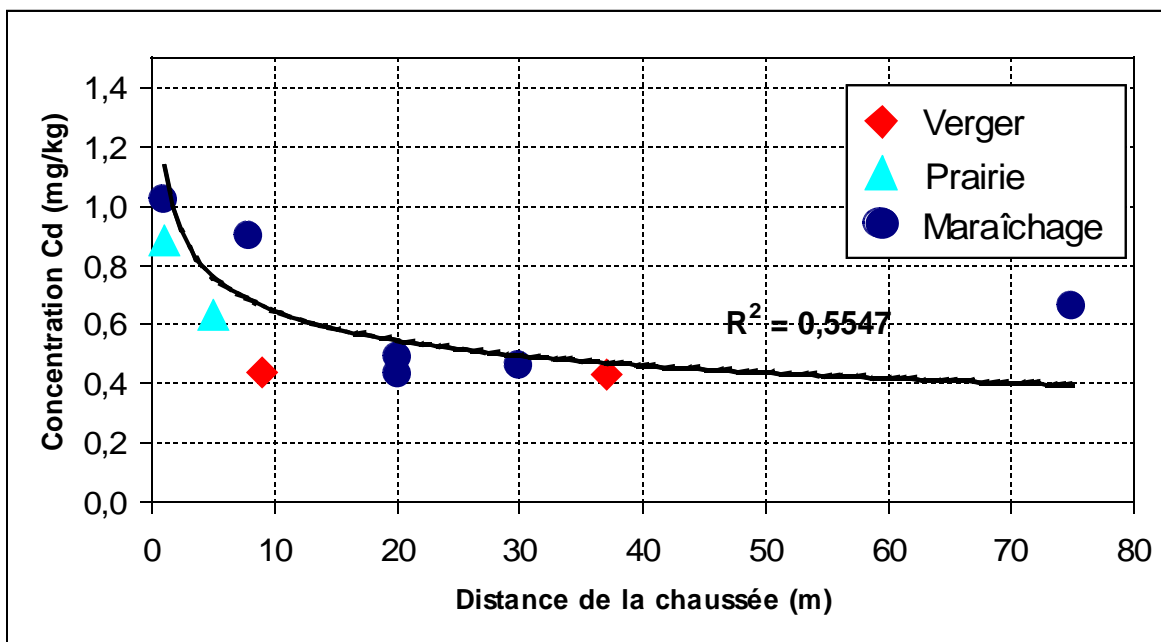
Le tableau ci-dessous indique les valeurs obtenues pour ce prélèvement.

	Distance à la route (m)	Zn (mg/kg)	Plomb (mg/kg)	Cadmium (mg/kg)
Verger	1	1678	1032	2,2

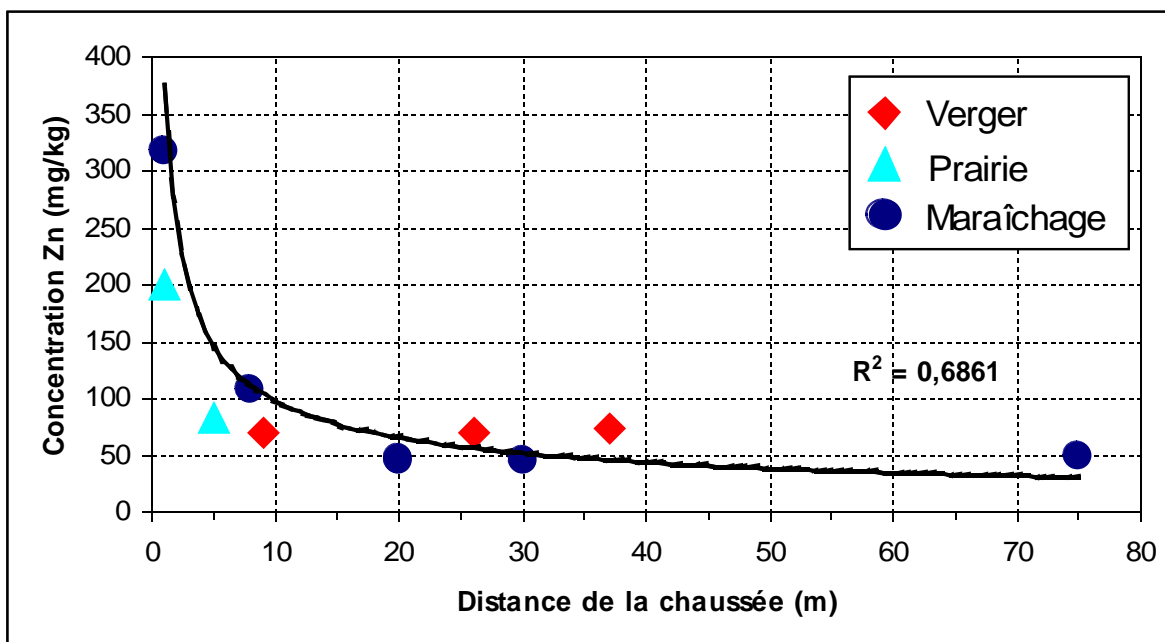
- l'analyse en cadmium, du prélèvement situé à 26 mètres de la chaussée, est inférieure au seuil de détection analytique (< 0,40 mg/kg).

Les trois graphiques qui suivent présentent, pour le cadmium, le plomb et le zinc, les variations de la concentration de l'élément dans les sols en fonction de la distance à la chaussée :

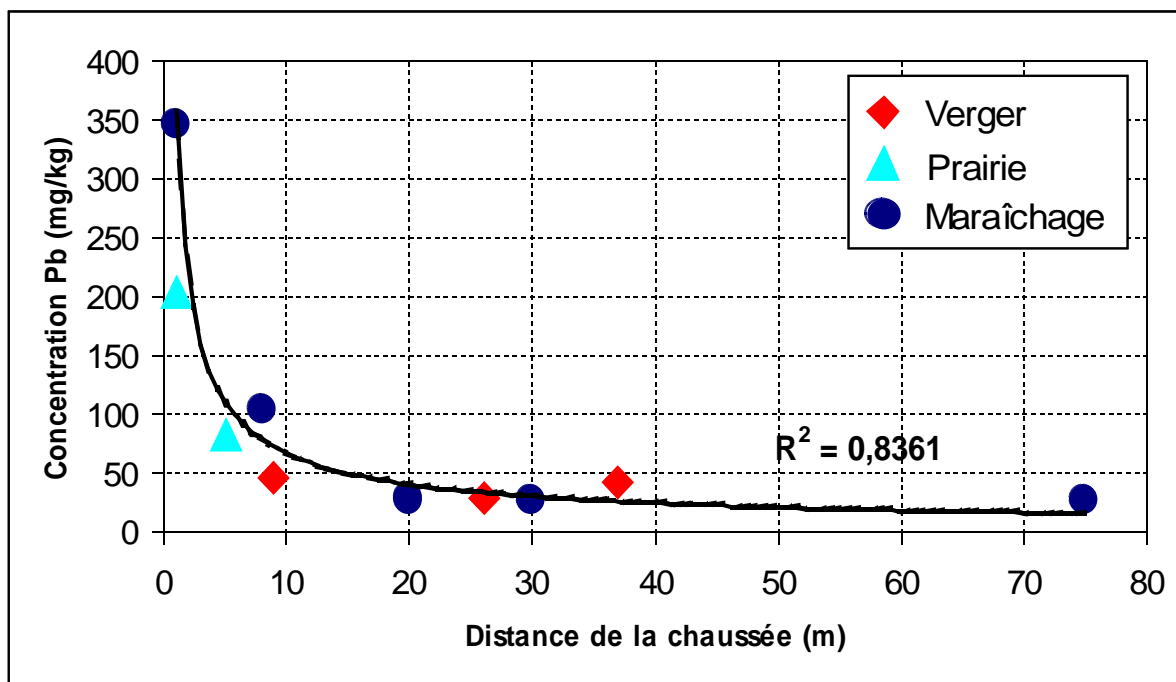
Cadmium



Zinc



Plomb



Pour ces trois paramètres, nous pouvons remarquer :

- une teneur élevée en bordure immédiate de chaussée, directement liée à l'influence du dépôt de MES d'eau de ruissellement de chaussée, ;
- des teneurs en décroissance rapide avec l'éloignement, le bruit de fond géologique (teneur stable) est atteint en moins de 10 mètres.

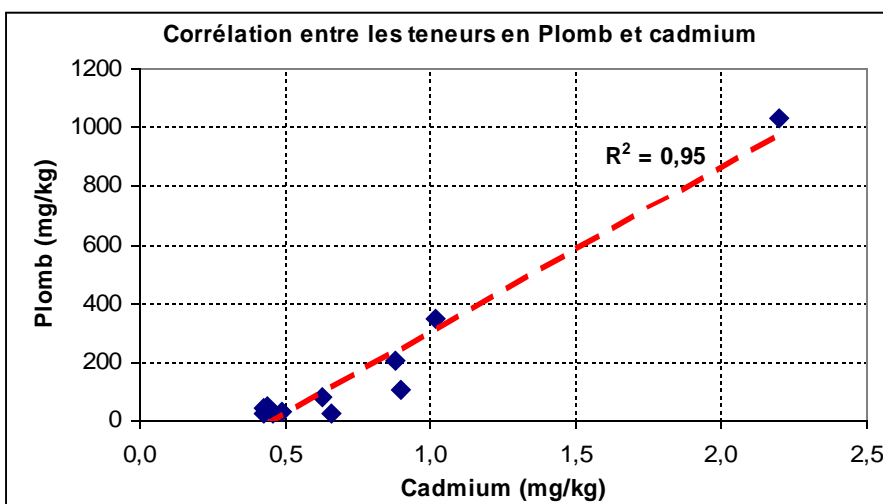
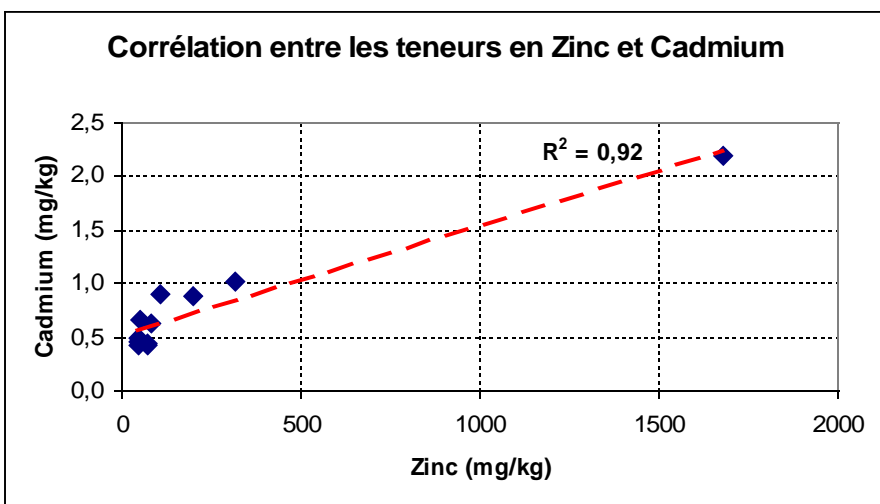
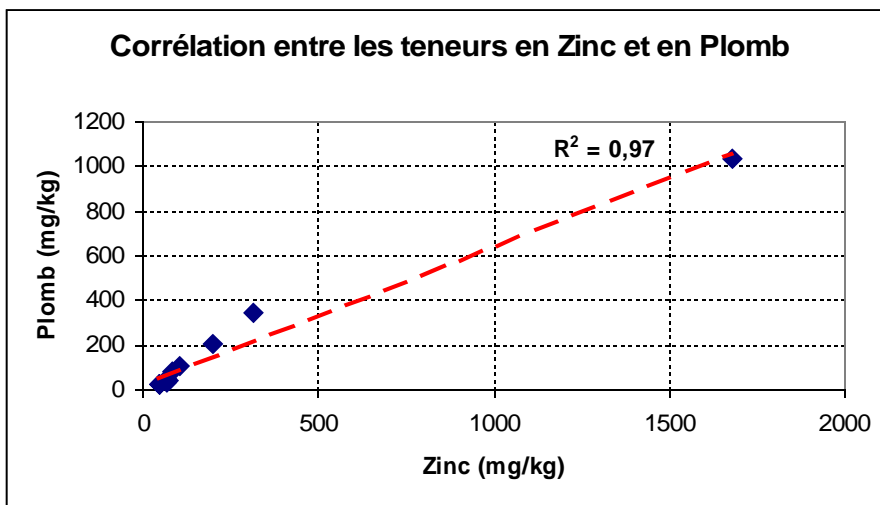
Si on s'intéresse au rapport des teneurs entre ces éléments pris deux à deux on obtient les résultats suivants :

Distance chaussée	Rapport Zn/Pb	Rapport Zn/Cd	Rapport Pb/Cd
1 à 9 m	< 1	> 100	> 100
> 10 m	> 1,5	< 100	< 100

Cela confirme bien l'existence de deux zones différentes avec une limite vers 10 mètres.

- une influence du trafic sur les teneurs en métaux (Cd, Zn, Pb) pour les prélèvements proche de la chaussée (les teneurs obtenues, pour ces 3 ETM, au niveau de la prairie dont le trafic est de 37 000 véhicules/jour, sont inférieures aux zones de verger et maraîchage dont le trafic est supérieur à 76 000 véhicules/jour),
- si nous considérons les teneurs du prélèvement situé à 75 mètres de la route comme représentatives du terrain naturel, l'influence de l'infrastructure routière pour ces trois métaux est notable sur les 10 premiers mètres,
- Même comportement pour les 3 ETM.

Les graphiques ci-dessous indiquent une corrélation possible entre les différents paramètres. Le comportement et l'origine de ces métaux dans le sol en bordures de chaussées (Cd, Zn et Pb) semblent donc être les même sur les sites investigués (tous prélèvements de sols confondus):



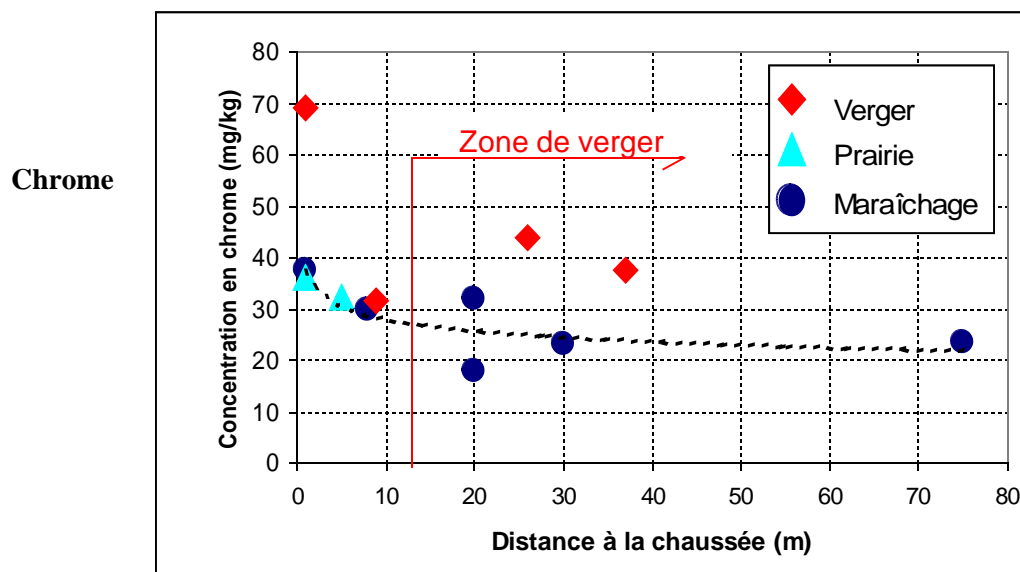
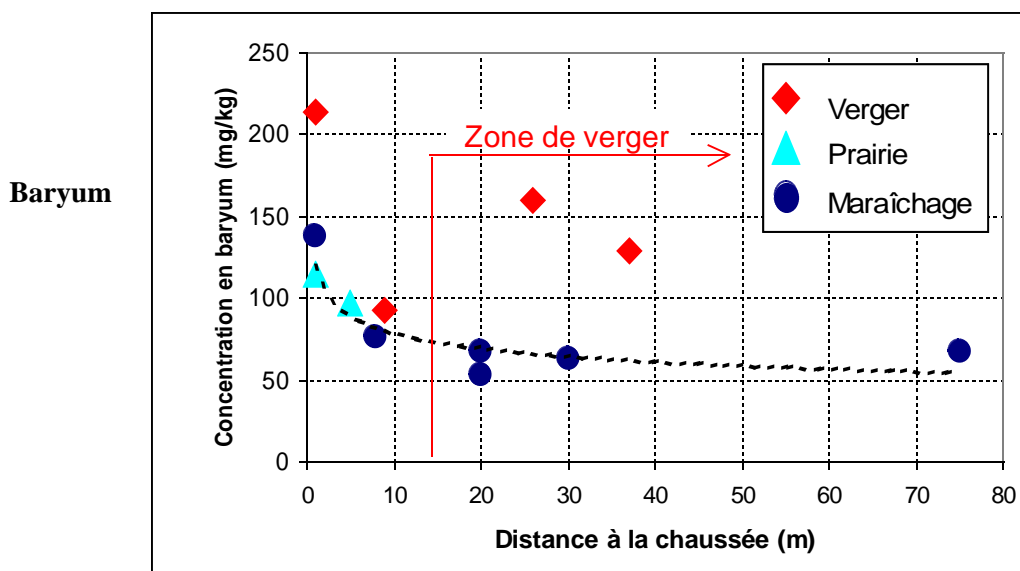
Ces observations indiquent que ces trois éléments sont liés par une origine commune et représentent bien la contamination des sols due au trafic routier. L'enrichissement des sols en Cd, Zn et Pb est lié aux retombées atmosphérique sèches et humides.

5.3.1.4. Baryum / Chrome / Nickel

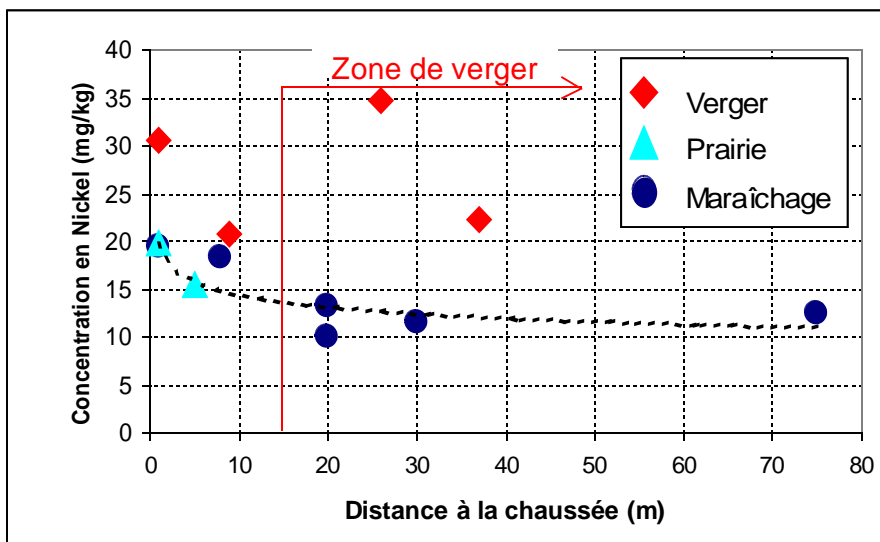
Pour ces trois paramètres, il existe une similitude de comportement des courbes entre elles (voir courbes) :

- même décroissance des concentrations des sols de la prairie et de la zone maraîchère en fonction de l'éloignement par rapport à la chaussée ;
- augmentation des valeurs à partir de 26 mètres dans la zone de verger, non visible dans les autres zones ;
- influence du trafic peu marquée (quel que soit le trafic, les concentrations obtenues pour ces trois éléments sont du même ordre de grandeur pour une même distance d'éloignement à la chaussée).

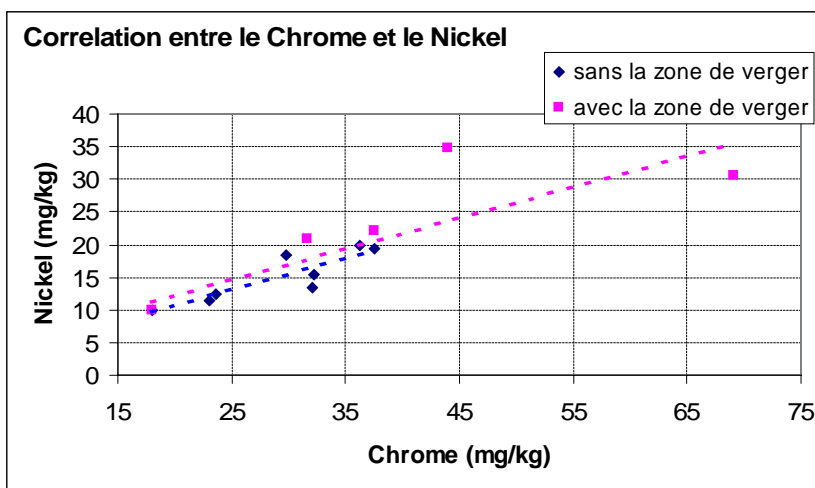
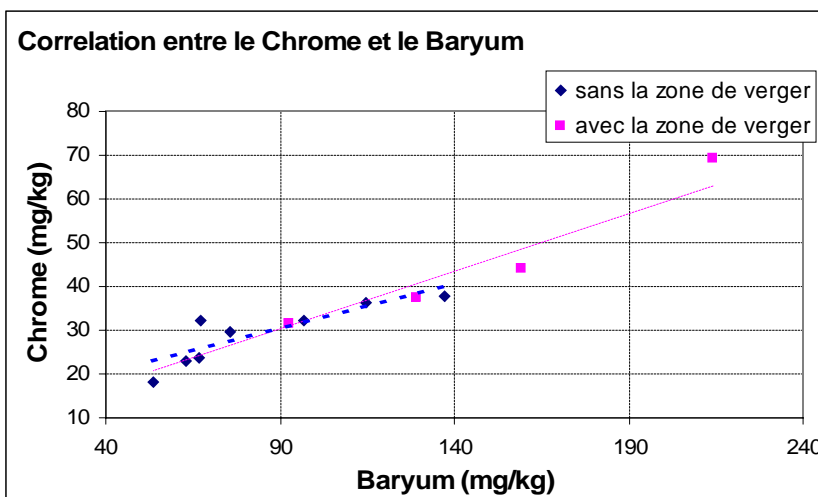
Les différentes courbes de tendance ont été dessinées en excluant les points de la zone de verger

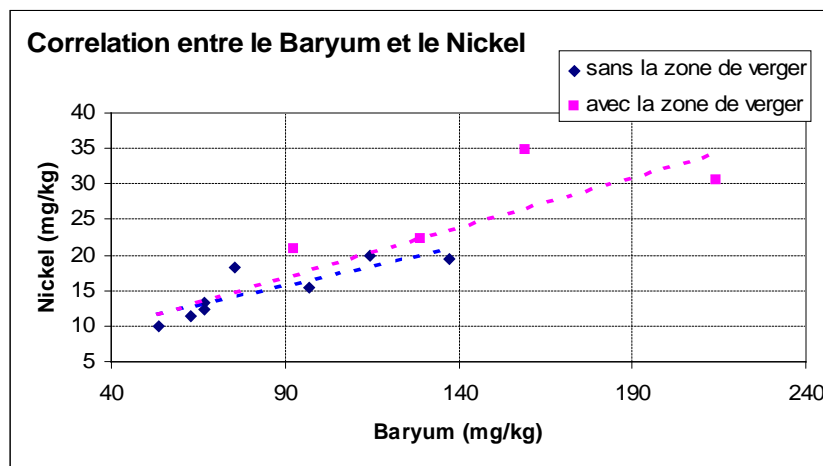


Nickel



Les différents graphes de corrélation entre les paramètres (baryum, nickel, chrome) sont présentés ci-après :





Il semble exister une certaine corrélation entre les paramètres baryum, chrome et nickel. Cependant, l'interprétation nécessite des investigations supplémentaires :

- connaissance des produits de traitement utilisés dans la zone de verger pour expliquer le décalage des valeurs ;
- les points de mesure dans la zone de prairie sont peu nombreux. Des prélèvements supplémentaires sur des distances plus éloignées de l'axe sont nécessaires pour vérifier si la corrélation observée dans la zone de prairie se maintient avec la zone de maraîchage.

5.3.2. Métaux contenus dans les poussières

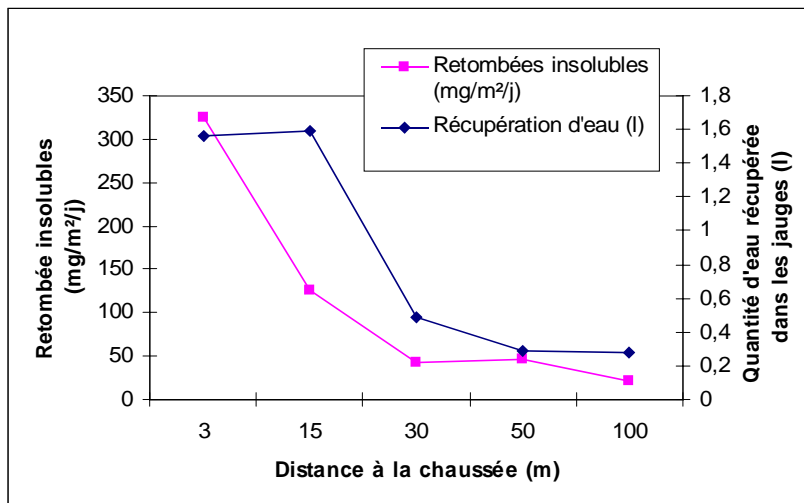
Les poussières ont été recueillies par des jauges d'Owen placées sur la zone de maraîchage.

L'autoroute est en remblai par rapport au secteur d'étude. Les jauges sont placées en contrebas de la voie (exceptée la première jauge située sur le talus).

Le vent est majoritairement d'orientation nord / sud ou sud / nord, donc dans l'axe de l'autoroute.

Les entonnoirs et les jauges ayant été rincés au moment de leur enlèvement, la masse d'eau recueillie dépend pour partie des retombées atmosphérique, pour partie du rinçage du dispositif de prélèvement. L'écart entre les quantités prélevées sur les deux premiers points à proximité de la voie et les trois suivants donne une idée de l'impact des éclaboussures de la route.

Le graphe ci-après indique la quantité d'eau recueillie ainsi que les retombées insolubles en fonction de l'éloignement à la chaussée :



Les deux courbes qui présentent la même tendance semblent indiquer que les éclaboussures, vecteur d'apport des retombées insolubles, atteignent les jauges situées à 15 mètres (cette distance paraît toutefois très importante).

La surface des entonnoirs servant à collecter les retombées atmosphériques est de 0.0491 m² soit un diamètre de 25 cm.

Distance à la chaussée (m)	Récupération d'eau (l)	Hauteur d'eau (mm)
3	1,566	32
15	1,592	32
30	0,484	10
50	0,288	6
100	0,275	6

Les précipitations du mois de septembre (40 mm) sont du même ordre de grandeur que les hauteurs d'eau calculées pour les jauges situées à 3 et 15 mètres de la chaussée mais il n'y a pas de corrélation avec les autres jauges (sans doute à cause de l'évaporation, les prélèvements ont été effectués durant une période assez clémente).

5.3.2.1. Arsenic et cadmium

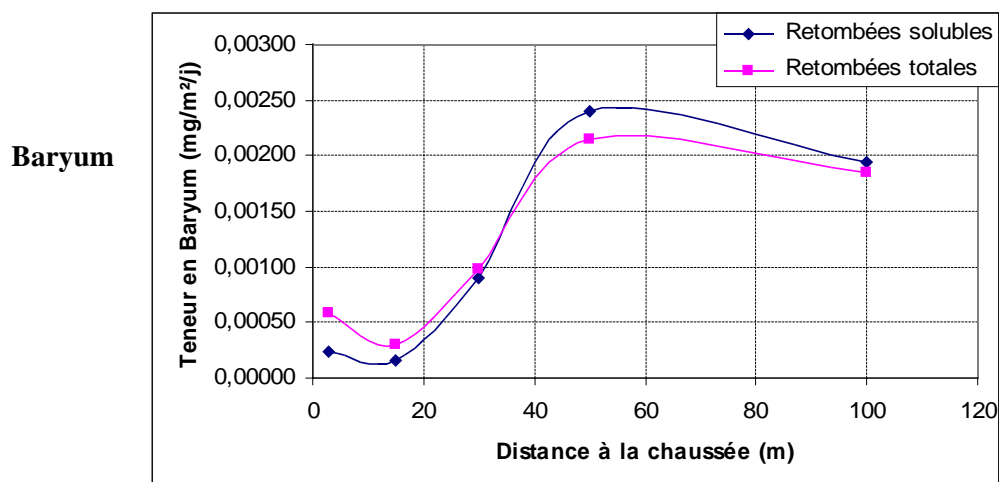
Ces deux paramètres sont inférieurs au seuil de détection analytique (0,00025 mg/m²/jour pour l'arsenic et 0,00001 mg/m²/jour pour le cadmium).

5.3.2.2. Retombées totales et retombées solubles

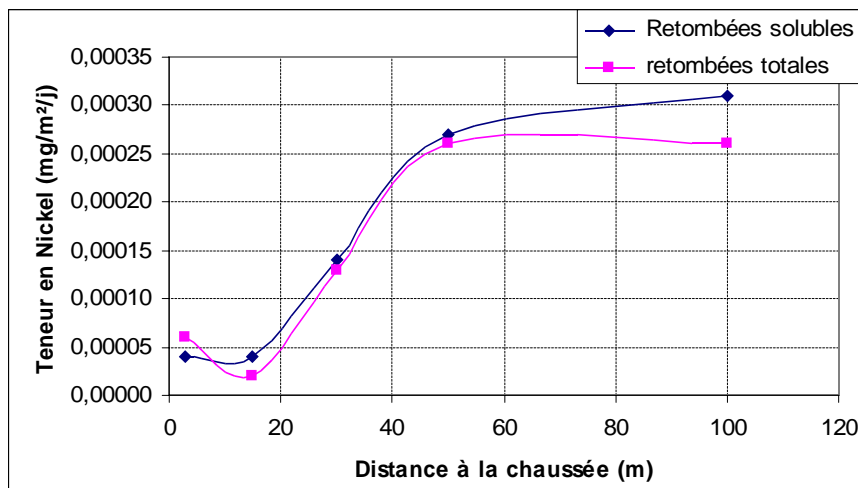
Les graphes ci-dessous indiquent les résultats obtenus pour les éléments baryum, plomb, nickel, chrome et zinc :

Baryum et nickel :

- ces deux éléments sont en grande majorité présents à l'état dissous dans l'eau ;
- faible influence dans les 20 premiers mètres à partir de la chaussée ;
- influence plus marquée après 20 mètres ;



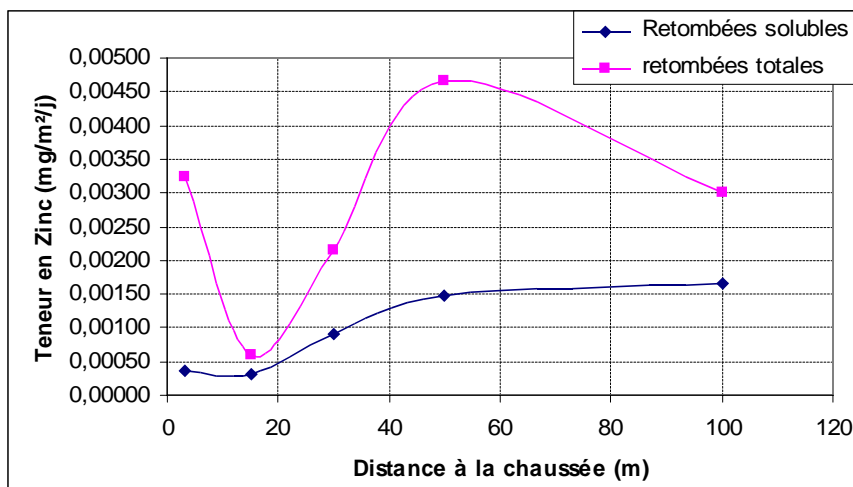
Nickel



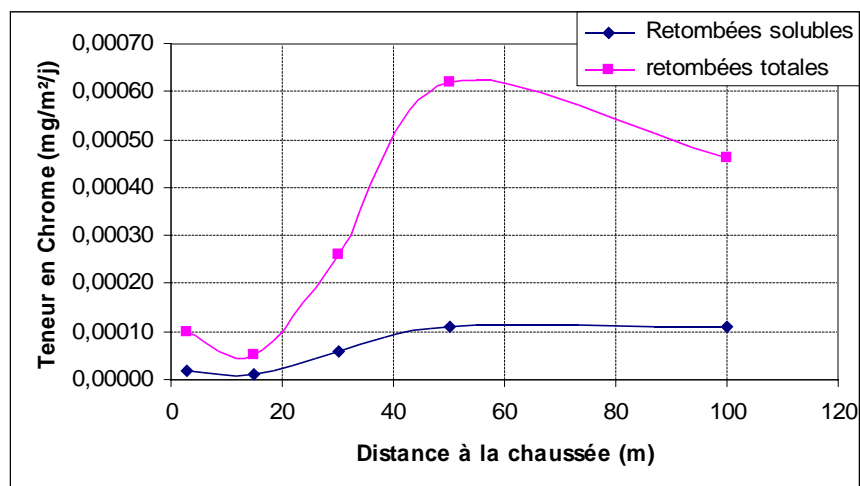
Chrome, zinc et plomb :

- une moins grande quantité de ces éléments est en solution, par rapport à la phase solide ;
- minimum obtenu pour le point situé à 15 mètres de la voie (très marqué pour le plomb et le zinc) ;
- retombées plus importantes à 50 mètres.

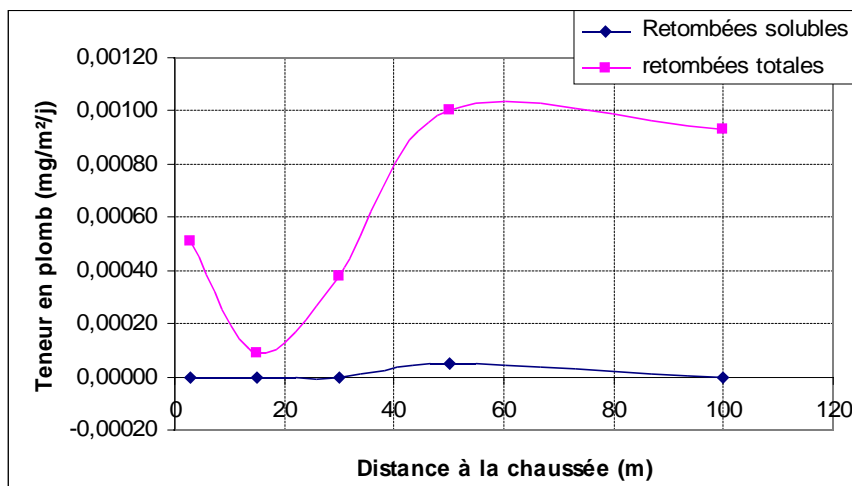
Chrome



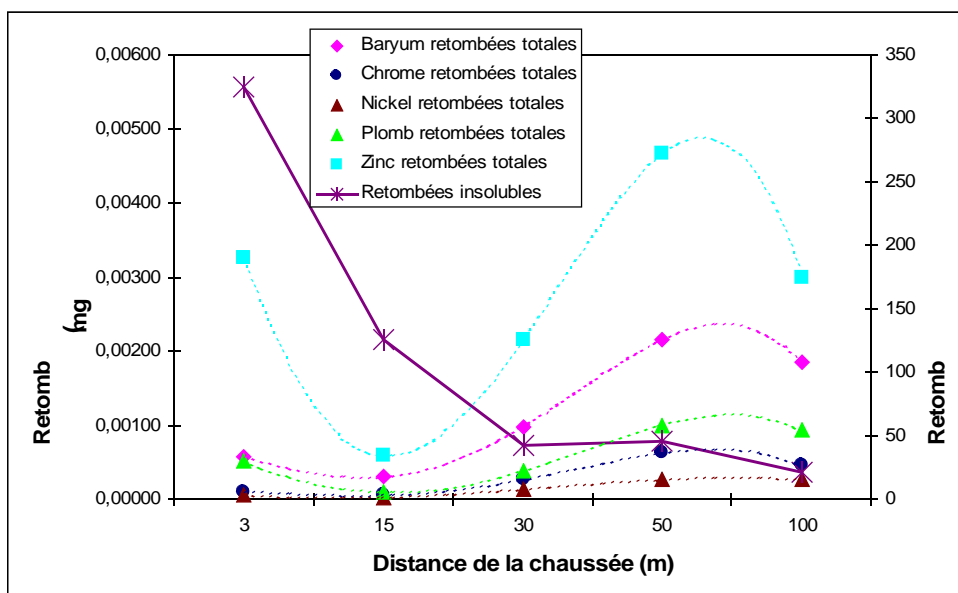
Zinc



Plomb



Les retombées totales du baryum, chrome, nickel, plomb, et zinc ainsi que les retombées insolubles sont présentées ci-dessous :



L'analyse des différents graphiques indique :

- les teneurs les plus élevées se situent à 50 mètres de la voie, quels que soient les éléments. Ce qui indique leur origine commune ;
- au niveau des retombées insolubles : décroissance des valeurs en fonction de l'éloignement par rapport à la chaussée. Cette influence de la voie ne se retrouve pas au niveau des analyses par élément . La composition des retombées particulières ne paraît pas constante avec l'éloignement à la voie. Ce phénomène est peut être dû à une évolution de la concentration en métaux de la fraction particulaire en fonction de la granulométrie. Une analyse par granulométrie laser sur la totalité des poussières recueillies dans les jauges permettrait éventuellement de relier les teneurs en ETM avec la taille des particules. Le pic de pollution à 50 mètres est peut-être dû au transport des particules

légères, source de contamination par le Pb, Zn, Cr, à cette distance. Les travaux mis en place avec le CEREAS sur la modélisation de la dispersion de la fraction particulaire, pour des infrastructures dans des configurations différentes, pourront contribuer à l'éclairage de ce point ;

- le deuxième point de mesure, situé à 15 mètres, donne les valeurs les plus faibles, peut être dû à l'effet du pied de talus. Les valeurs mesurées à 100 mètres sont plus élevées ;
- ces résultats posent la question de l'origine des polluants. **Les polluants mesurés dans les échantillons prélevés à 50 m de la voie proviennent ils du trafic automobile où une autre source peut elle être mise en cause?** Des analyses supplémentaires, au delà de 100 mètres, seraient nécessaires afin de retrouver une zone non-influencée par le trafic routier ;
- les rapports entre les valeurs minimales (15 m) et maximales (50 m) et à 100 m sont indiqués dans le tableau ci-dessous :

Retombées totales	Rapport entre l'analyse à 15 mètres (mini) et l'analyse à 50 mètres (maxi)	Rapport entre l'analyse à 15 mètres (mini) et l'analyse à 100 mètres
Baryum	7	6
Chrome	12	9
Nickel	13	13
Plomb	11	10
Zinc	8	5

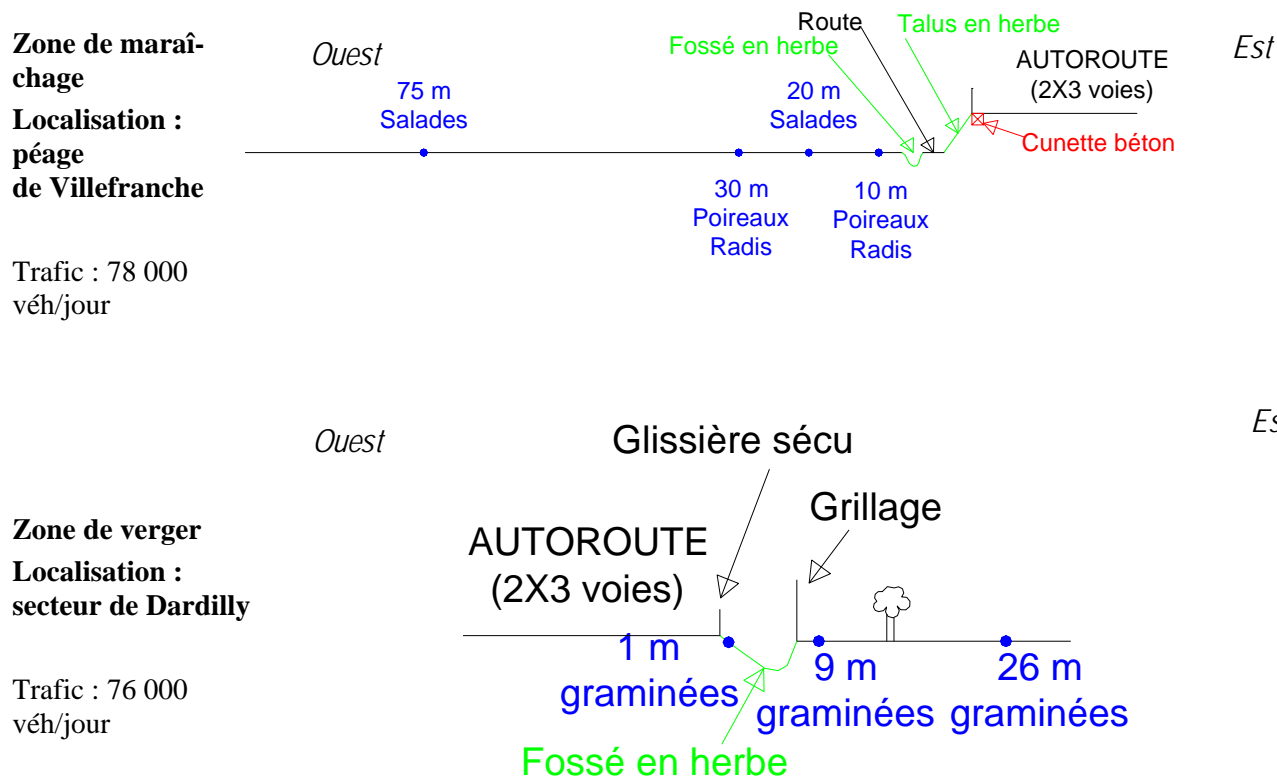
Retombées solubles	Rapport entre l'analyse à 15 mètres (mini) et l'analyse à 50 mètres (maxi)	Rapport entre l'analyse à 15 mètres (mini) et l'analyse à 100 mètres
Baryum	15	12
Chrome	11	11
Nickel	7	8
Plomb	-	-
Zinc	5	5

Les différentes interprétations sur les retombées de poussières seront à confirmer par des investigations supplémentaires :

- connaissances des traitements éventuels effectués sur la zone pendant l'installation des jauges ;
- nouveau transect, avec des mesures au-delà de 100 mètres, sur d'autres configurations.

5.3.3. Métaux contenus dans les végétaux

Les différents prélèvements sont rappelés dans le tableau suivant :



5.3.3.1. Arsenic

Sur les 10 mesures effectuées, seules 4 mesures sont supérieures au seuil de détection analytique de 0,25 mg/kg. En exceptant l'échantillon du verger, à 1 mètre de la chaussée, qui peut être impacté par les eaux de ruissellement de chaussée, seul les échantillons de poireaux et radis donnent des valeurs mesurables.

Zone	Nature du prélèvement	Distance par rapport à la chaussée (m)	Arsenic (mg/kg)
Maraîchage	Poireaux	10	0,32
Maraîchage	Radis	10	0,40
Maraîchage	Radis	30	0,45
Verger	Graminées	1	0,33

Moyenne : 0,37 mg/kg

Écart type : 0,06 mg/kg

Sur ces quelques points, aucun enrichissement des végétaux en arsenic ne peut être observé en liaison avec la distance à la voie.

5.3.3.2. Cadmium

Pour le cadmium, l'impact de la voie n'est pas observable :

- pour le verger, seul le prélèvement de graminée à 1 mètre de la chaussée, influencé par les eaux de ruissellement, donne une valeur supérieure au seuil de détection analytique de 0,10 mg/kg .
- **pour la zone maraîchère, toutes les valeurs sont du même ordre de grandeur, quelque soit l'éloignement à la route.**

Moyenne	0,25 mg/kg
Écart type	0,08 mg/kg

5.3.3.3. Plomb / zinc

Dans la zone de verger, des concentrations en plomb et zinc plus importantes sont observées pour le prélèvement le plus proche de la voie. Les autres prélèvements donnent des teneurs du même ordre de grandeur.

Zone	Nature du prélèvement	Distance par rapport à la chaussée (m)	Plomb (mg/kg)	Zinc (mg/kg)
Verger	Graminées	1	9,58	146,53

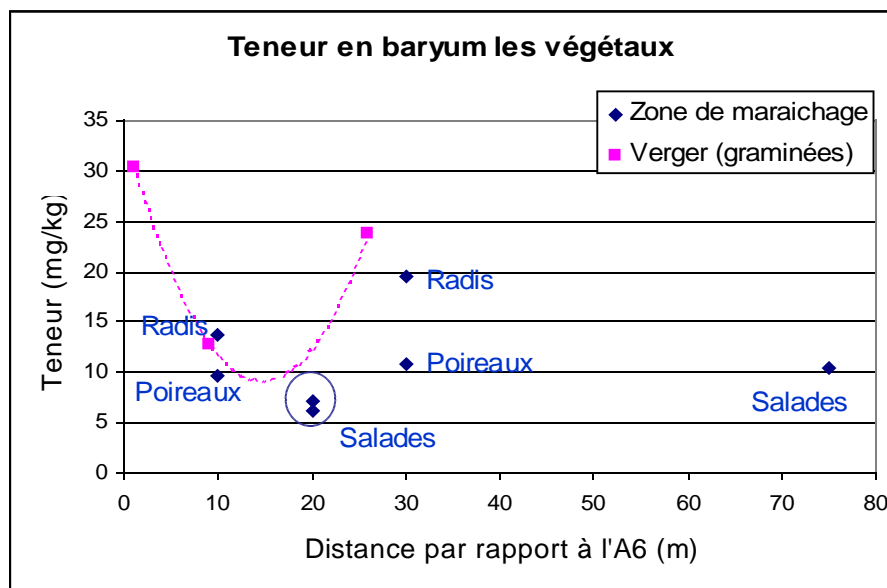
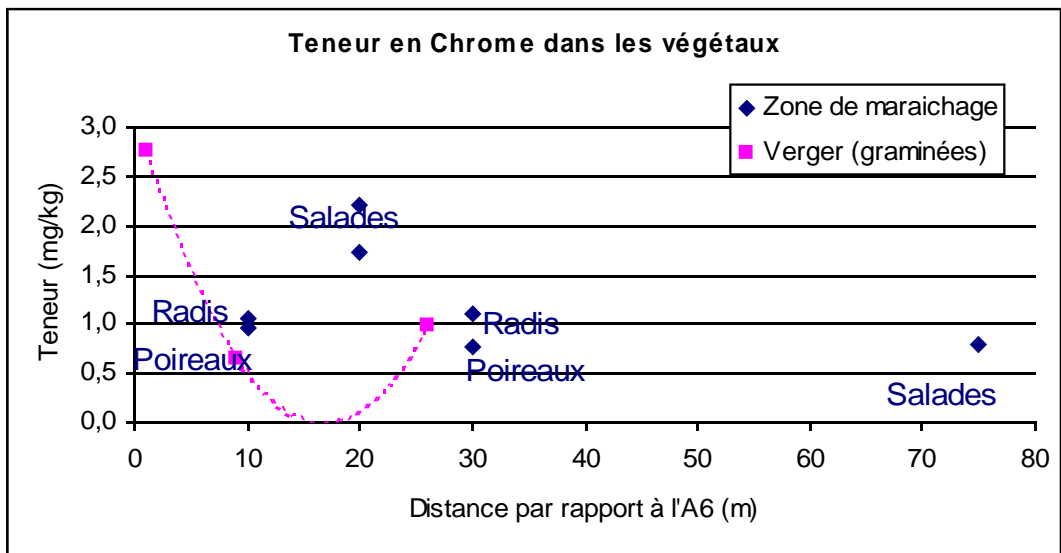
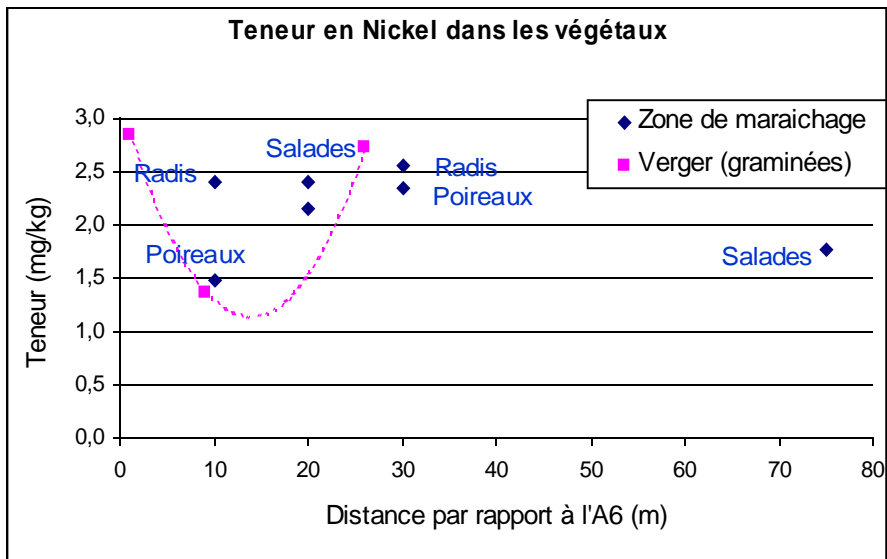
Zone	Nature du prélèvement	Distance par rapport à la chaussée (m)	Plomb (mg/kg)	Zinc (mg/kg)
Verger	Graminées	9	0,63	58,03
Maraîchage	Poireaux	10	0,93	39,45
Maraîchage	Radis	10	0,90	45,30
Maraîchage	Salade romaine	20	0,58	43,55
Maraîchage	Salade scarole	20	0,53	40,28
Verger	Graminées	26	0,70	41,40
Maraîchage	Poireaux	30	0,80	42,55
Maraîchage	Radis	30	1,00	45,35
Maraîchage	Salade	75	0,65	46,50

Moyenne (mg/kg)	0,74	44,71
Écart type (mg/kg)	0,17	5,54

5.3.3.4. Baryum / chrome / Nickel

Pour ces trois paramètres, il n'y a pas d'influence.

Il faut toutefois noter que, pour le verger, comme dans les analyses de sols pour lesquelles nous observons une augmentation des teneurs de ces 3 paramètres à 26 mètres de la voie, au niveau des végétaux, cet enrichissement est également notable.



5.3.4. HAP

5.3.4.1. HAP dans les sols

Les prélèvements ont été effectués dans la zone de maraîchage.

Les teneurs en Fluorène, Anthracène, Fluoranthène, Pyrène, Benzo(a) anthracène, Benzo(b) anthracène, benzo(k) fluoranthène, benzo(a) pyrène, dibenzo(ah)anthracène, indeno(1,2,3-cd)pyrène et benzo(g,h,i)perylène sont toutes inférieures au seuil de détection analytique.

Les teneurs en Phénanthrène et Chrysène sont présentées dans le tableau ci-après :

Distance par rapport à l'A6	Phénanthrène (mg/kg)	Chrysène (mg/kg)
1 m (graminées)	0,037	< 0,02
8 m (graminées)	0,024	< 0,02
20 m (sol non cultivé)	0,025	0,055
20 m (Poireaux + radis)	< 0,02	0,037
30 m (Poireaux + radis)	0,02	< 0,02
75 m (salade)	0,024	0,048

5.3.4.2. HAP dans les végétaux

Les résultats des analyses sont présentés dans le tableau ci-dessous :

	Vergers						
	maraîchage						Salades
	Graminées	Poireaux	Radis	Salades	Poireaux	Radis	
Distance par rapport à route (en mètres)							
	1	10	10	20	30	30	75
Naphtalène (µg/kg)	6,0	3,0	5,7	2,0	4,0	< 0,2	<0,5
Acénaphthylène (µg/kg)	3,0	< 0,5	< 0,5	< 1	< 1	< 0,2	0,6
Acénaphthène (µg/kg)	< 2	< 0,5	< 0,5	< 1	< 1	0,3	4,9
Fluorène (µg/kg)	4,0	< 0,5	< 0,5	2,0	1,0	0,3	7,2
Phénanthrène (µg/kg)	8,0	5,6	4,2	3,0	10,0	2,7	0,9
Anthracène (µg/kg)	< 2	0,8	0,7	< 1	2,0	0,4	< 0,5
Fluoranthène (µg/kg)	5,0	1,2	0,8	2,0	2,0	0,5	< 0,5
Pyrène (µg/kg)	7,0	2,0	1,6	2,0	4,0	1,0	< 0,5
Benzo(a) anthracène (µg/kg)	< 2	< 0,5	0,6	< 1	< 1	0,3	< 0,5
Chrysène (µg/kg)	< 2	0,6	1,6	< 1	1,0	0,4	< 0,5
Benzo(b) anthracène (µg/kg)	2,0	1,6	0,7	< 1	3,0	< 0,2	< 0,5
Benzo(k) fluoranthène (µg/kg)	< 2	< 0,5	< 0,5	< 1	< 1	< 0,2	< 0,5
Benzo(a) pyrène (µg/kg)	< 2	< 0,5	< 0,5	< 1	< 1	< 0,2	< 0,5
Dibenzo(ah)anthracène (µg/kg)	< 2	< 0,5	< 0,5	< 1	< 1	< 0,2	< 0,5
Indeno(1,2,3-cd)pyrène (µg/kg)	< 2	< 0,5	< 0,5	< 1	< 1	< 0,2	< 0,5
Benzo(g,h,i)perylène (µg/kg)	5,0	< 0,5	< 0,5	< 1	< 1	< 0,2	< 0,5

Il est difficile d'interpréter ces résultats (seuils de détection analytique différents pour un même paramètre, valeurs hétérogènes).

L'interprétation des résultats demande une connaissance approfondie des produits utilisés pour le traitement des différentes cultures et des conditions analytiques. Un questionnaire sera adressé à l'agriculteur possédant la zone de maraîchage afin de connaître les traitements effectués.

5.4. Conclusion

Les principales conclusions sont reprises, selon les différents milieux étudiés.

5.4.1. Sols

Pas d'enrichissement significatif du sol en arsenic et mercure.

Plomb, zinc, cadmium :

- diminution des concentrations dans les sols en fonction de la distance à la chaussée. Le comportement et l'origine des métaux dans le sol semble être les mêmes. L'influence de la voie est notable sur les 10 premiers mètres ;
- influence du trafic : les concentrations sont supérieures pour un trafic plus élevé ;
- teneurs importantes pour le prélèvement situé à 1 mètre de la voie, dans la zone de verger. Ce point semble être influencé par les eaux de ruissellement de chaussée.

Baryum, chrome, nickel :

- similitude de comportement ;
- sur la zone de verger : augmentation des concentrations après 26 mètres ;
- influence du trafic peu marquée.

HAP : pas d'enrichissement significatif du sol.

5.4.2. Poussières

Les retombées insolubles sont bien corrélées avec la distance à la voie.

Pour les métaux cette corrélation n'est pas retrouvée.

Pas de corrélation entre les précipitations de la zone pendant la période de prélèvement et les hauteurs d'eau récupérée; augmentation des concentrations en métaux après 20 mètres (minimum à 15 mètres et maximum à 50 mètres). Le talus a-t-il une influence sur la composition des poussières?

Arsenic et cadmium : les teneurs sont inférieures au seuil de détection analytique.

Pour les autres ETM (baryum, nickel, plomb, chrome et zinc) : solubilité des éléments : baryum et nickel présents à l'état dissous, contrairement aux autres éléments qui sont présents sous forme insoluble.

5.4.3. Végétaux

Aucun enrichissement significatif en ETM. Nous pouvons noter :

- pour la zone de verger, comme pour les analyses effectuées dans les sols que les concentrations en baryum, chrome et nickel augmentent à 26 mètres ;
- teneurs en zinc et plomb importantes pour le prélèvement situé à 1 mètre de la voie, pour la zone de verger qui est influencée par les eaux de ruissellement de chaussée

HAP : résultats difficilement interprétables (seuils de détection analytique différents pour un même paramètre, résultats hétérogènes).

5.5. Perspectives

5.5.1. Sols

Des investigations supplémentaires sont nécessaires :

- connaissances précises des traitements apportés sur les terrains ;
- autres profils d'étude pour comparer ces résultats à des trafics plus ou moins importants ;
- augmentation de la densité des prélèvements, dans les 10 premiers mètres de l'infrastructure afin de connaître plus précisément l'enrichissement des sols en bordure de chaussée par les ETM.

5.5.2. Poussières

Afin de compléter les données recueillies et de confirmer les différentes hypothèses, un nouveau TRANSECT devra être mis en place afin de :

- connaître plus précises sur les différents transports de particules en effectuant une granulométrie laser sur les différentes poussières recueillies ;
- compléter les analyses avec des distances supérieures à 100 mètres de l'infrastructure ;
- recueillir des informations météorologiques, pendant la durée de prélèvement.

5.5.3. Végétaux

D'autres végétaux peuvent être pris en considération (fruits, etc.).

Les données recueillies sur les HAP devront être étudiées plus précisément (méthodologie d'analyses, appareils utilisés, seuils de détection) et cibler les paramètres présentant un intérêt afin de poursuivre l'étude.

Pour les différents milieux, les éléments analysés seront les mêmes afin de pouvoir caractériser et corréler les transferts existants entre ces milieux.

Toutes les données recueillies en 2006 et les prochaines investigations serviront de base aux différentes modélisations, notamment par le modèle CALTOX.

6. Bibliographie

ADEME à paraître : *Quelques essais au champ en France : État de l'art sur les transferts d'ET des sols vers les plantes cultivées à vocation alimentaire*

<http://www.acta.asso.fr/epuration/data/pages/f34.htm>

Bertrand, 1993, Enquête INSEE, Consommation et lieux d'achats des produits alimentaires en 1991, Série Consommation et modes de vie, n°54-55.

CREDOC-AFSSA-DGAL, 1999, *Enquête INCA, Enquête nationale sur les consommations alimentaires*, Tech & Doc. Lavoisier, ISBN : 2-7430-0426-6.

Deneux-Mustin S., Roussel-Debet S., Mustin C. et al., 2003. *Mobilité et transfert racinaire des éléments traces : influence des micro-organismes du sol*; Pref. Elisabeth Leclerc-Cessac. Paris : Tec et Doc.

Duchauffour. 1984 *Abrégé de pédologie*- Ed Masson

Fouchécourt M. O., Beausoleil M., Lefebvre L., Valcke M., Belles-Isles J. C., Trépanier M., 2005. Validation des critères B et C de la politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés – protection de la santé humaine – Institut National de la Santé Publique du Québec (annexe 2) réf : ISBN imprimé : 2-550-44462-0. http://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/380-ValidationSols_Rapport.pdf

Glorennec P., Zmirou D., Peigner P. *Impact sanitaire passé et actuel de l'Usine d'Incinération des Ordures Ménagères d'Angers*. Cellule Inter Régionale d'Epidémiologie Ouest. Rapport. 52 pages + annexes. Rennes, 2001.

Bonard, 2004. Le logiciel de calcul CALTOX, rapport final. Rapport INERIS : DRC-04-45959-ERSA-RBn°097

Pillebout 2003. *CALTOX pour l'estimation des expositions liées aux rejets d'une grande installation*. Mémoire de l'école nationale de la santé publique d'ingénieur du Génie sanitaire. Réf BDSP : 292918

Rigaud D., Giachetti I., Deheeger M., Borys J.-M., Volatier J.-L., Lemoine A. et Cassuto D., 1997, *Enquête française de consommation alimentaire*. I. Energie et macrotruniments, Cah. Nutr. Diét., 32, 379-59.

US EPA 1998. HHRAP : US-EPA, *Human Health Risk Assessment Protocol for hazardous waste combustion facilities (HHRAP)*, Peer review draft, Office of Solid Waste, EPA/530/0-98/001A, 1998

Table des matières

Préambule.....	7
1. Contexte.....	8
2. Objectifs.....	9
3. Démarche.....	10
4. Test des principaux paramètres influençant les transferts sols – plantes.....	11
4.1. Principaux paramètres qui influencent la mobilité et la bio disponibilité des polluants dans les sols.....	11
4.1.1. Le pH.....	11
4.1.2. La teneur en matière organique des sols.....	11
4.1.3. La teneur en argile.....	12
4.1.4. Le coefficient de partage ou Kd.....	12
4.1.5. Comportement par polluant.....	14
4.1.5.1. Arsenic.....	14
4.1.5.2. Cadmium.....	14
4.1.5.3. Chrome.....	14
4.1.5.4. Nickel.....	14
4.1.5.5. Plomb.....	15
4.1.6. Influence de l'espèce végétale.....	15
4.1.7. Facteurs de transfert des polluants dans les végétaux.....	16
4.2. Présentation de CALTOX.....	18
4.3. Feuilles de calcul à renseigner.....	19
4.3.1.1. Voies d'entrée du polluant.....	20
4.3.1.2. Paramètres à renseigner.....	20
4.3.1.2.1. Les paramètres physico chimiques.....	21
4.3.1.3. Les coefficients de partage ou de transferts entre différents milieux.....	21
4.3.1.3.1. Les temps de demie vie.....	22
4.3.1.3.2. Propriétés du site.....	22
4.3.1.3.3. Vitesse de déposition.....	22
4.3.1.3.4. Flux d'eau entrants et sortants du site	23
4.3.1.3.5. Épaisseur de la zone de sol.....	23
4.4. Utilisation de CALTOX sur un cas concret.....	25
4.4.1. Hypothèses et données d'entrées	25
4.4.1.1. Concentration en polluant particulaire dans l'air ou dépôt particulaire en bord de voie.....	25
4.4.1.2. Paramètres physicochimiques du polluant et propriétés du site.....	26

4.4.1.3. Prise en compte des concentrations initiales mesurées dans l'environnement.....	27
4.4.1.4. Les quantités de polluants ingérées.....	28
4.4.1.4.1. Données de consommation nationale	29
4.4.2. Données en sortie du modèle.....	31
4.4.2.1. Concentrations en polluants dans les différents milieux environnementaux...31	
4.4.2.2. Les concentrations en polluants dans les milieux d'exposition.....	31
4.4.2.3. Les quantités de polluants ingérées.....	32
4.5. Évaluation de l'impact des paramètres d'entrée et de transferts introduits dans le modèle CALTOX sur le risque évalué.....	33
4.5.1. Méthode d'analyse.....	33
4.5.1.1. Test du coefficient de partage ou Kd.....	36
4.5.1.2. Test du coefficient de transfert sol / parties aériennes des plantes ou rainsplash.....	38
4.5.1.3. Test du coefficient air/plante ou Kpa-part.....	39
4.5.1.4. Test du coefficient de transfert racinaire sol/plante ou Kps.....	40
4.5.1.5. Test du pourcentage de matière organique.....	41
4.5.1.6. Pour résumer.....	42
4.5.1.7. Conclusion.....	43
4.5.2. Impact des paramètres d'exposition humaine.....	43
4.6. Conclusion.....	46

5. Mise en place et premiers résultats d'une campagne de mesure de la concentration en polluants dans la fraction particulaire, dans les sols et dans les végétaux pour évaluer le modèle.....52

5.1. Campagne de mesures.....	52
5.1.1. Zone d'étude.....	52
5.1.2. Choix des sites retenus pour des échantillonnages sols - végétaux.....	52
5.1.3. Caractéristiques des sites étudiés.....	56
5.1.3.1. Données météorologiques.....	56
5.1.3.1.1. Les vents.....	56
5.1.3.1.2. La pluviométrie.....	57
5.1.3.2. Caractéristiques générales des sites retenus.....	58
5.1.3.3. Analyses réalisées.....	58
5.2. Stratégie d'échantillonnage des différents milieux.....	59
5.2.1. Sol.....	59
5.2.1.1. Échantillonnage.....	59
5.2.1.2. Analyse sur les sols.....	60
5.2.2. Dépôt particulaire.....	60
5.2.2.1. Échantillonnage.....	60
5.2.2.2. Analyses.....	61
5.2.3. Végétaux.....	62
5.2.3.1. Prélèvements.....	62

5.2.3.2. Analyses.....	63
5.3. Résultats.....	63
5.3.1. Les teneurs en ETM dans les sols.....	63
5.3.1.1. Mercure.....	63
5.3.1.2. Arsenic.....	63
5.3.1.3. Cadmium / Plomb / Zinc.....	64
5.3.1.4. Baryum / Chrome / Nickel.....	68
5.3.2. Métaux contenus dans les poussières.....	70
5.3.2.1. Arsenic et cadmium.....	71
5.3.2.2. Retombées totales et retombées solubles.....	71
5.3.3. Métaux contenus dans les végétaux.....	75
5.3.3.1. Arsenic.....	75
5.3.3.2. Cadmium.....	76
5.3.3.3. Plomb / zinc.....	76
5.3.3.4. Baryum / chrome / Nickel.....	76
5.3.4. HAP.....	78
5.3.4.1. HAP dans les sols.....	78
5.3.4.2. HAP dans les végétaux.....	78
5.4. Conclusion	79
5.4.1. Sols.....	79
5.4.2. Poussières.....	79
5.4.3. Végétaux.....	79
5.5. Perspectives.....	80
5.5.1.1. Sols.....	80
5.5.2. Poussières.....	80
5.5.3. Végétaux.....	80
6. Bibliographie.....	81

© ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables
centre d'Études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques

Crédits : CALTOX est un logiciel de calcul élaboré par l'Université de Berkeley pour le compte de l'agence californienne de l'Environmental Protection Agency (Cal-EPA). Il s'agit d'un modèle multimédia d'exposition et libre de droits, développé sous EXCEL, qui a été conçu pour aider à évaluer les expositions humaines liées à des sites pollués et à définir des seuils de réhabilitation des sols. Il est téléchargeable à l'adresse suivante
http://www.dtsc.ca.gov/AssessingRisk/ctox_dwn.cfm

Tous les tableaux, schémas et illustrations de cet ouvrage proviennent de ce site.

Toute reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement de Certu est illicite (loi du 11 mars 1957).

Cette reproduction par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

Dépôt légal : 4^e trimestre 2007

ISSN : 1263-2570

ISRN : Certu/RE--07-21--FR

Certu

9, rue Juliette-Récamier

69456 Lyon cedex 06

☎ (+33) (0) 4 72 74 59 59

Internet www.certu.fr