



INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES

Les modèles multimédia pour l'évaluation des expositions liées aux émissions atmosphériques des installations classées

Rapport [final](#)

MINISTERE DE L'AMENAGEMENT DU
TERRITOIRE ET DE L'ENVIRONNEMENT

R. BONNARD

*Unité Evaluation des Risques Sanitaires
Direction des Risques Chroniques*

20 décembre 2001

Les modèles multimédia pour l'évaluation des expositions liées aux émissions atmosphériques des installations classées

Rapport [final](#)

MINISTERE DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE
ET DE L'ENVIRONNEMENT

23 janvier 2002

Ce document comporte 28 pages (hors couverture et annexes).

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	R. BONNARD	A. CIOLELLA	E. VINDIMIAN
Qualité	Ingénieur à l'unité d'Evaluation des Risques Sanitaires	Responsable de l'unité d'Evaluation des Risques Sanitaires	Responsable de la Direction des Risques Chroniques
Visa			

TABLE DES MATIERES

1. RÉSUMÉ	3
2. INTRODUCTION	4
3. RAPPEL DES BESOINS	5
4. ETAT DES LIEUX CONCERNANT LES OUTILS MULTIMÉDIA	7
5. POURQUOI LES LOGICIELS UTILISÉS POUR L'ÉVALUATION DES RISQUES LIÉS AUX SOLS POLLUÉS NE SONT PAS ADAPTÉS	10
6. REVUE DES MODÈLES RÉPONDANT AUX BESOINS	11
6.1 The methodology for assessing Health Risks associated with Multiple Pathways of Exposure to combustor (MPE).	11
6.2 Human Health Risk Assessment Protocol for Hazardous Waste Combustion Facilities (HHRAP)	13
6.3 EUSES (European Union System for the Evaluation of Substances)	15
6.4 CALTOX	17
6.5 MEPAS (Multimedia Environmental Pollutant Assessment System)	20
6.6 MEND-TOX	21
6.7 RESRAD (Residential Radiation)	22
6.8 MMSOILS (the Multimedia Contaminant Fate, Transport, and Exposure Model)	22
6.9 FRAMES-HWIR (Framework for Risk Analysis in Multimedia Environmental Systems)	23
6.10 PC-GEMS	24
6.11 TRIM (Total Risk Integrated Methodology)	25
7. CONCLUSION	27

1. RESUME

Les études d'impact pour les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) doivent permettre de préserver la santé publique et pour cela, elles doivent s'appuyer sur des évaluations des risques pour la santé prenant en compte l'ensemble des voies. Dans le cas des rejets atmosphériques de polluants persistants et bioaccumulables, les voies d'exposition indirectes, comme l'ingestion d'aliments produits sous le vent des émissions atmosphériques, peuvent représenter une part importante de l'exposition globale.

Actuellement une des approches les plus couramment utilisées pour la réalisation de ces évaluations de risque consiste à utiliser un modèle de dispersion atmosphérique pour estimer la distribution des concentrations de polluants dans l'air et les vitesses de dépôts de polluants sur le sol et les végétaux. Puis ces données sont entrées dans un logiciel conçu pour le calcul des expositions liées aux sols pollués, afin d'estimer les risques par les voies d'exposition indirectes. Les logiciels couramment utilisés pour l'évaluation des risques liés aux sols pollués sont pourtant mal adaptés à la problématique des émissions atmosphériques.

L'INERIS, dans ce rapport a procédé à une revue des outils de modélisation multimédia adaptés ou pouvant être adaptés à cette problématique.

Il apparaît que les seuls outils de modélisation aujourd'hui disponibles et qui ont été conçus pour évaluer les risques liés aux émissions atmosphériques des installations industrielles sont deux guides méthodologiques produits par l'USEPA en 1998, à savoir :

- The methodology for assessing Health Risks associated with Multiple Pathways of Exposure to combustor (MPE),
- Human Health Risk Assessment Protocol for Hazardous Waste Combustion Facilities (HHRAP).

Au-delà des documents méthodologiques, un logiciel informatique, capable de prendre en compte les émissions de polluants dans l'atmosphère, a par ailleurs été identifié. Ce logiciel nommé MEPAS mériterait une étude plus approfondie pour connaître son potentiel et ses limites pour évaluer les risques, selon les principes et la méthode définis dans les guides de référence existants en France.

Enfin, plusieurs équipes travaillent à l'évolution ou à l'élaboration de logiciels d'exposition multimédia, respectueux du principe de conservation de la masse. Ainsi, un logiciel intitulé TRIM est actuellement développé par l'OAQPS (Office of Air Quality, Planning and Standards). Ce logiciel très prometteur, devrait offrir des potentialités nouvelles par rapport aux logiciels existants.

2. INTRODUCTION

Dans le cadre de la réglementation française concernant les études d'impact, il est prévu que les études prennent en compte la santé publique (article 1 de la Loi 76-663 du 19 Juillet 1976 et article 19 de la Loi n°96-1236 du 30 décembre 1996). De plus, s'agissant des effets sur la santé, les études ne doivent pas se limiter à la seule pollution de l'air mais porter sur l'ensemble des problèmes qu'une installation peut engendrer sur la santé humaine.

Concernant les principes et la méthodologie générale pouvant être appliqués pour mener à bien ces études, deux guides sont aujourd'hui disponibles au niveau national : le projet de guide méthodologique de l'INERIS (référéncé : INERIS-DRC-01-25584/DRCG-337/FMA-Projet 3.0), et le guide pour l'analyse du volet sanitaire des études d'impact de l'Institut National de Veille Sanitaire (InVS). En revanche, concernant les estimations des expositions et au-delà des modèles de dispersion permettant d'évaluer les concentrations de polluants dans l'air, il n'existe pas au niveau national de recommandations et d'outils clairement identifiés pour évaluer l'ensemble des expositions générées par les émissions atmosphériques des installations industrielles.

De plus au niveau européen, la réglementation française est relativement novatrice s'agissant de l'impact engendré par des installations industrielles¹. Il ne semble pas y avoir dans les autres pays européens, d'exigence réglementaire du même type conduisant à la réalisation d'évaluations de risques comme en France. Des outils de modélisation et des groupes de travail communs ne semblent donc pas avoir été créés sur cette thématique contrairement au domaine des sols pollués, où des échanges existent à travers différents réseaux comme CLARINET (Contaminated Land Rehabilitation Network For Environmental Technologies in Europe) et NICOLE (the Network for Industrially Contaminated Land in Europe).

Pour répondre à ce besoin, l'INERIS a donc recherché quelles étaient les approches possibles. L'objectif de ce rapport est de présenter les outils de modélisation disponibles ou transposables pour évaluer les expositions des populations soumises aux pollutions atmosphériques générées par les installations industrielles.

Après un rappel des besoins en terme de modélisation pour évaluer les expositions liées à ce type de pollution et un état des lieux concernant le développement des outils multimédia, il est indiqué en quoi les logiciels traditionnellement utilisés dans la problématique des sols pollués sont mal adaptés à cette problématique. Les modèles identifiés et qui semblent adaptés ou pouvoir être adaptés à l'évaluation des expositions liées aux émissions atmosphériques des installations industrielles font ensuite l'objet d'une présentation plus ou moins détaillée, décrivant les méthodes de calcul qu'ils utilisent. Les intérêts et limites de chacun de ces modèles sont mis en évidence.

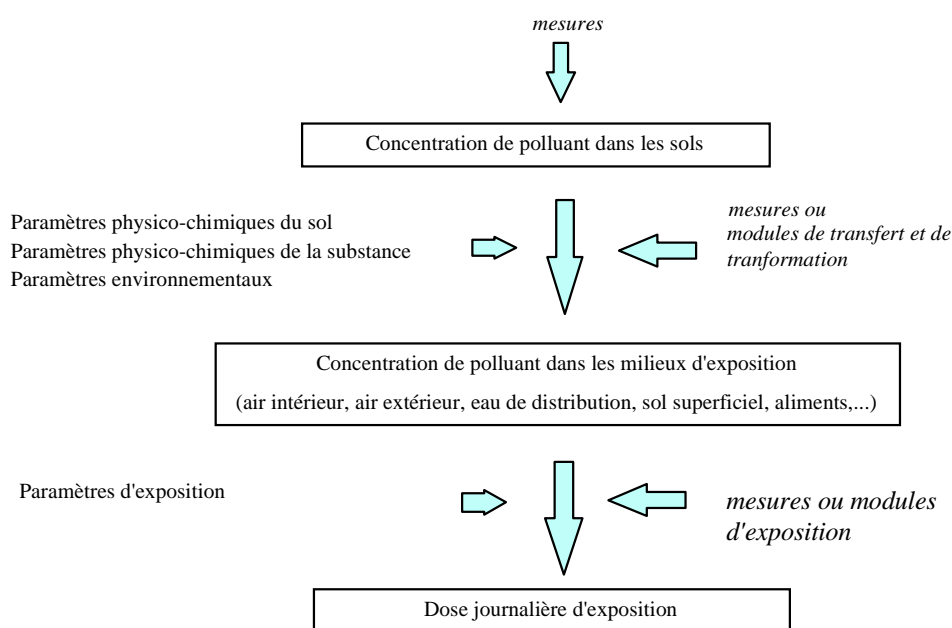
¹ Lemesle Stéphanie, Intercomparaison des exigences réglementaires de l'évaluation des risques sanitaires pour les équivalents ICPE dans les pays membres de l'Union Européenne, rapport de stage, INERIS, 2001

3. RAPPEL DES BESOINS

L'évaluation du risque pour la santé humaine suppose d'évaluer les niveaux d'exposition des individus en prenant en compte les multiples voies par lesquelles ils sont exposés. La multiplicité des voies, le besoin de considérer les expositions sur le long terme (plusieurs dizaines d'années, voire la vie entière), la difficulté des mesures sur les personnes et la nécessité de réaliser des études prospectives concourent à un besoin fort de modélisation dans ce domaine.

Le principe d'estimation des niveaux d'exposition est résumé dans le schéma suivant :

Figure 1: Schéma de principe de la démarche de quantification de l'exposition



En fonction des données d'entrée disponibles (données concernant la source de pollution, mesures de polluants dans les milieux environnementaux ou mesures dans les milieux d'exposition²), l'ensemble de la démarche devra être déroulé ou seulement une partie. Dans le cas où seules des données concernant la source de pollution sont disponibles, des outils pour modéliser les transferts des polluants dans et entre les milieux devront être utilisés, en plus des outils de modélisation de l'exposition. Il existe aujourd'hui un certain nombre d'outils informatiques intégrant les différentes étapes de cette démarche, notamment dans le domaine de la pollution des sols. La plupart vont même jusqu'au calcul du niveau de risque, grâce à une base de données toxicologiques intégrée.

² L'expression "milieux environnementaux" peut être définie par opposition à l'expression "milieux d'exposition". Les milieux environnementaux désignent l'air, les eaux souterraines, les eaux superficielles, les sols, les sédiments selon les cas, tandis que les milieux d'exposition désignent précisément les milieux au contact desquels se trouve la cible étudiée, ici l'homme, c'est-à-dire l'air à l'intérieur des habitations, l'eau du robinet, la couche de sol superficielle, mais aussi les aliments.

Dans le cadre des études d'impact sur la santé publique, la source de pollution considérée est le plus souvent rejetée dans l'atmosphère. Pour évaluer le risque des populations riveraines soumises à cette source de pollution, il faut prendre en compte l'exposition par voie d'inhalation, mais il s'avère aussi souvent indispensable de considérer les voies d'exposition indirectes, comme par exemple, l'ingestion de fruits et légumes contaminés par les retombées de ces polluants sur les végétaux et sur le sol, notamment dans le cas de rejets de polluants persistants. Or les mesures disponibles dans les milieux sont rares, et le plus souvent il s'agit d'évaluer les risques liés à une installation future. On a donc généralement besoin de modèles pour prendre en compte le devenir des polluants dans les différents milieux et les différentes voies d'exposition et finalement de dérouler toute la démarche d'estimation : des données sur la source de pollution à l'estimation des niveaux d'exposition ou du risque.

Pour modéliser l'exposition globale des populations, on doit donc utiliser :

- soit des modèles multimédia, c'est-à-dire des modèles prenant en compte le transfert des polluants dans les différents milieux à partir d'un rejet à l'atmosphère et faisant la synthèse des voies d'exposition en rapport avec ces différents milieux,
- soit une série de modèles de transfert, pour représenter la cascade des phénomènes physico-chimiques et biologiques intervenant entre les différents milieux, afin de définir la contamination des autres milieux environnementaux à partir de l'air. Les résultats obtenus servent alors à alimenter d'autres modèles pour calculer les concentrations de polluants dans les milieux d'exposition, puis les doses d'exposition qui en résultent. Dans le cas d'un rejet à l'air, il faudra par exemple utiliser un modèle de dépôt pour calculer les concentrations de polluants déposés sur le sol, les végétaux et dans les eaux superficielles, un modèle de ruissellement pour simuler le transfert de pollution du sol vers les eaux, un modèle de bioconcentration pour représenter la concentration de polluant dans les végétaux, etc...

Dans une première approche, pour éviter d'omettre des phénomènes et des voies d'exposition importantes, il apparaît plus simple d'utiliser un outil intégrateur pour évaluer les expositions directes et indirectes à partir des différents milieux touchés par la pollution. L'objet de ce rapport est donc de faire une première présentation des outils de modélisation intégrateurs permettant de mener à bien une évaluation des expositions directes et indirectes à partir d'une pollution atmosphérique.

4. ETAT DES LIEUX CONCERNANT LES OUTILS MULTIMEDIA

Sous l'expression "modèle d'exposition", des outils de nature très différentes sont en fait regroupés. Selon les sources, il s'agit parfois de logiciels permettant de modéliser les phénomènes de dispersion dans un milieu particulier (cf. logiciels regroupés dans l'Exposure Models Library and Integrated Model Evaluation system distribué sous forme de CD-Rom par l'Office of Research and Development de l'USEPA), parfois d'équations présentées dans un guide méthodologique permettant de définir des valeurs d'alerte en fonction du risque pour la santé, via une voie d'exposition particulière (cf. Soil Screening Guidance de l'USEPA³), ou encore de logiciels intégrant des bases de données sur les budgets espace-temps des populations et calculant l'exposition et/ou le risque en fonction des concentrations d'exposition entrées par l'utilisateur (cf. THERdbASE disponible sur le CD-ROM cité ci-dessus).

Les outils multimédia permettant le calcul des concentrations de polluants dans les milieux environnementaux en fonction d'une source définie par l'utilisateur et permettant d'évaluer les doses d'exposition et/ou le risque pour la population sont en fait beaucoup moins nombreux. Le développement de ce type d'outils est généralement assez récent. Il correspond à la préoccupation relativement nouvelle de prendre en compte les expositions et donc les risques cumulés que subit un individu au travers des différentes voies d'exposition. La première évaluation de risque réalisée par l'USEPA prenant en compte les différentes voies d'exposition à partir d'une source de pollution date de 1987.

Là encore, deux grands types de modèles multimédia existent :

- d'une part, les systèmes liant plusieurs modules de calcul, chaque module permettant de calculer les transferts des polluants au sein d'un milieu. Les données de sortie de chaque module servant à alimenter un autre module à l'aval, traitant des transferts dans un autre milieu. Avec ce genre d'approche, la conservation de la masse du polluant dans l'environnement n'est pas assurée et les transferts secondaires ne sont pas considérés de manière complète. Par exemple, la quantité de polluant qui lixivie vers les couches de sol plus profondes ou vers la nappe ne viendra pas nécessairement en déduction de la quantité de polluant disponible pour les plantes dans le sol ou de la quantité de polluant pouvant se volatiliser.

³ US EPA. Soil Screening Guidance: technical background document, 9355.4-17A, Washington,DC: Office of Emergency and Remedial Response, 1996

- d'autre part, les modèles de calcul assurant la conservation de la masse du polluant dans l'environnement. Le développement des premiers modèles décrivant la répartition des polluants dans l'environnement tout en respectant le bilan massique (souvent qualifié de modèles de fugacité⁴) date ainsi des années 80 avec les travaux de McKay. Il s'agit de modèles où les polluants sont répartis dans un environnement divisé en compartiments. La plupart de ces modèles présente des limites liées au type de substances auxquelles ils peuvent être appliqués (essentiellement des substances organiques) et à l'échelle spatiale à laquelle il s'applique. Parmi les recommandations émises par les participants à l'atelier organisé par la Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) sur l'application des modèles multimédia, il est indiqué que pour des polluants émis dans l'atmosphère, les modèles de ce type ne devraient pas être utilisés pour des superficies inférieures à quelques centaines de kilomètres carrés⁵. En effet, dans la plupart de ces modèles la représentation de l'espace est limitée à une définition rigide de quelques compartiments correspondant à des milieux comme l'air, le sol, l'eau. La concentration dans l'air résultant d'un flux donné de polluants émis dans l'atmosphère est alors fonction de la superficie de la zone d'étude retenue. Si cette hypothèse de concentration uniforme dans un milieu est acceptable au niveau régional, au niveau local ce type d'approche se trouve inadaptée. Quelques rares modèles cependant ont été conçus pour prendre en compte des zones de plus faibles superficies.

Il semble que ce soit pour l'évaluation du risque lié aux sols pollués que l'on trouve le plus de modèles adaptés aux approches multimédia et multivoies. L'USEPA en a ainsi développé plusieurs (MMSOILS, RESRAD,...). Certains sont commercialisés par des sociétés de logiciels ou de services (RBCA, AERIS, RISK, HESP,...) et en Europe une étude d'intercomparaison des modèles utilisés par les instituts scientifiques des différents pays du réseau CLARINET⁶ est en cours de réalisation.

⁴ La fugacité est une grandeur thermodynamique homogène à une pression, qui représente la potentialité d'échappement d'une substance à partir d'un compartiment. Toute substance évolue du compartiment où sa fugacité est élevée vers celui où elle est faible. Deux phases à l'équilibre ont même fugacité. La concentration de polluant dans un compartiment est égale à :

$$C = f * Z$$

avec f : fugacité en Pa,

Z : capacité fugace du milieu. Z est une grandeur dépendante de la température, de la pression, de la substance et du compartiment.

Les modèles de fugacité se déclinent en quatre niveaux de complexité successifs :

Le niveau 1 correspond à un état statique, où tous les compartiments sont à l'équilibre.

Le niveau 2 correspond à un état d'équilibre entre les compartiments dans lequel les quantités reçues par un compartiment sont égales aux quantités perdues.

Au niveau 3, il n'y a plus équilibre entre les compartiments. La fugacité varie entre les compartiments du fait d'émissions hétérogènes liées à des résistances aux transferts différentes entre eux. Les transferts sont néanmoins stationnaires dans le temps.

Au niveau 4, il n'y a plus équilibre entre les compartiments et les émissions sont variables au cours du temps. Il n'y a plus d'état stationnaire. Le niveau 4 permet de considérer par exemple une diminution de la source de pollution au cours du temps.

⁵ SETAC, The multi-media fate model : a vital tool for predicting the fate of chemicals, 1994

⁶ CLARINET : Contaminated Land Rehabilitation Network for Environmental Technologies

Les modèles permettant de prendre en compte l'exposition multivoies résultant d'un rejet de polluant dans l'air semblent moins nombreux.

En 1996, l'USEPA a réalisé une recherche des modèles existants pour évaluer le risque lié à une pollution de l'air par les voies non respiratoires. La plupart des modèles cités dans ce travail sont des modèles américains. Quelques-uns sont européens. Ils sont souvent disponibles sous forme informatique, toutefois certains se présentent sous forme d'un guide méthodologique regroupant une série d'équations. Enfin un certain nombre d'outils présentés sont encore en phase de développement et ne semblent pas pouvoir être disponibles au public à courte échéance.

Ce travail a conduit l'OAQPS (Office of Air Quality, Planning and Standards), institut chargé au sein de l'USEPA d'évaluer et de gérer les risques liés aux substances émises dans l'air ambiant, au constat qu'aucun modèle ne répondait réellement à ses besoins pour mener des évaluations de risques consistantes. En effet, aucun modèle n'est suffisamment intégrateur pour prendre en compte l'ensemble des milieux et des phénomènes pertinents et n'est capable de traiter les différents types de substances auxquelles cet organisme doit s'intéresser, et cela avec une résolution spatiale et temporelle adéquate. Depuis, l'OAQPS a lancé un projet de conception d'un nouveau modèle, très prometteur intitulé TRIM.

Dans le domaine radiologique, des évaluations de risque cherchant à estimer l'impact sur la santé de rejets atmosphériques radioactifs sont réalisées. La problématique est donc comparable à celle des substances chimiques rejetées par les ICPE. Dans le cadre de l'étude Nord-Cotentin-COGEMA (La Hague), l'approche utilisée par l'Institut de Protection et de Sécurité Nucléaire (IPSN) repose entièrement sur la définition de coefficients de transfert ou de biotransfert entre les milieux, issus de mesures sur sites ou de la littérature. Or la réutilisation de ce type de données est en partie limitée par la spécificité des coefficients de transferts par rapport aux conditions environnementales, par la différence entre les substances étudiées dans le domaine radiologique et le domaine chimique (les substances organiques n'étant bien sûr pas traitées).

Aujourd'hui, un certain nombre d'études d'impact réalisées s'appuient sur des outils informatiques développés pour l'évaluation des risques liés aux sols pollués.

Le VITO (institut flamand pour la recherche technologique), qui a été confronté ponctuellement à un problème d'impact local d'émissions de dioxines par un incinérateur a eu recours aux mesures sur site et à la modélisation. Pour la modélisation, un modèle de dispersion atmosphérique a été utilisé pour calculer la distribution des concentrations de polluants dans l'air et les dépôts de particules. Une version adaptée du logiciel Vlier-Humaan (modèle de référence utilisé pour estimer les expositions liées aux sols pollués, en Flandre) a ensuite été utilisée pour évaluer les expositions humaines.

Ce genre d'approche basée sur l'utilisation des logiciels dédiés aux sols pollués présente pourtant des limites et nécessite de pouvoir adapter les logiciels, et donc d'avoir accès au code de calcul, ce qui est rarement le cas. Les problèmes liés à l'utilisation des logiciels commerciaux de ce type sont présentés ci-dessous.

5. POURQUOI LES LOGICIELS UTILISES POUR L'EVALUATION DES RISQUES LIES AUX SOLS POLLUES NE SONT PAS ADAPTES

En dehors de l'inhalation directe de polluants rejetés dans l'air par les installations industrielles, l'exposition des populations est due aux dépôts de polluants sur le sol et les végétaux de polluants. Les voies d'exposition à prendre en compte a priori sont donc celles liées :

- au contact direct des individus avec la pollution à savoir, l'ingestion de sol et le contact cutané avec le sol,
- à la contamination de la chaîne alimentaire par l'air et le sol, dans le cas d'une consommation d'aliments sur et autour du site.

Par ailleurs, les polluants rejetés dans l'air sont de nature diverse :

- poussières,
- substances organiques,
- substances métalliques,
- autres substances inorganiques (tels que NO₂, CO,...).

Or peu de modèles dédiés aux sols prennent en compte la contamination de la chaîne alimentaire de manière complète.

Par ailleurs, les modèles dédiés aux sols pollués ont en premier lieu été conçus pour traiter des substances chimiques de type organique. Généralement, peu de substances autres que les substances organiques sont traitées par les logiciels dédiés à l'exposition aux sols pollués et lorsque la substance n'est pas disponible dans la base de données du logiciel, sa prise en compte par l'utilisateur peut demander des adaptations spécifiques, difficiles, voire impossibles.

Les logiciels dédiés à l'exposition aux sols pollués, les plus couramment utilisés en France sont :

- HESP : Human Exposure Assessment, logiciel développé par Shell International Petroleum,
- RBCA Tool Kit, logiciel distribué par la société Groundwater Services,
- RISC, développé pour BP Oil par Lynn Spence.

RBCA et RISC ne prennent pas en compte l'ingestion de produits végétaux et animaux.

Quant à HESP, même s'il prend en compte la chaîne alimentaire les principales limites du logiciel pour ce type d'utilisation sont les suivantes :

- le dépôt particulaire sur les végétaux n'est pas modifiable et est fixé à 60 mg/m²/j,
- les particules se déposant sur les végétaux ont une concentration égale à la moitié de la concentration du sol (50% de ces particules étant supposées issues du sol),
- l'approche pour l'absorption cutanée à partir du sol est simpliste et non satisfaisante. En effet, un taux d'absorption horaire est fixé et non modifiable, quelle que soit la substance,
- la concentration de polluant dans les végétaux liée au dépôt particulaire est moyennée sur la durée de culture au lieu d'être calculée au jour de la récolte,

- la contamination des plantes par transfert gazeux de l'air vers la partie foliaire n'est pas considérée,
- l'origine des coefficients de bioconcentration du sol vers les plantes pour les polluants métalliques n'est pas référencée. Les conditions auxquelles ces coefficients se rapportent ne sont donc pas connues.

6. REVUE DES MODELES REPODANT AUX BESOINS

Parmi les outils présentés ci-dessous, certains se présentent sous forme de guides, d'autres sous forme de logiciels. Certains ont été créés pour évaluer les risques liés aux émissions atmosphériques d'installations industrielles, d'autres ont été conçus pour d'autres types d'évaluation de risques. Certains sont des outils liant différents modules de calcul, d'autres sont des modèles assurant la conservation de la masse. Dans la présentation qui suit, une analyse du contenu a pu être faite ou initiée pour certains modèles, pour les autres les éléments présentés sur les fonctionnalités de calcul reposent sur les informations fournies par les concepteurs. Dans tous les cas, et malgré une connaissance limitée de certains de ces outils, un effort a été fait pour mettre en évidence l'intérêt et les limites de chacun d'entre eux par rapport à la problématique étudiée.

6.1 THE METHODOLOGY FOR ASSESSING HEALTH RISKS ASSOCIATED WITH MULTIPLE PATHWAYS OF EXPOSURE TO COMBUSTOR (MPE).

(Documentation disponible sur le site Internet : www.epa.gov/ncea/combust.htm)

Il s'agit d'un document publié en 1998 par le National Center for Environmental Assessment (NCEA). Ce document s'appuie sur et remplace plusieurs rapports des années 1990, présentant une méthodologie alors nommée "Indirect Exposure Methodology" (IEM).

L'objectif de ce nouveau document sur l'exposition multivoie est de fournir un ensemble d'algorithmes pour évaluer les expositions humaines aux polluants atmosphériques émis par des unités de combustion fixes et de fournir l'information nécessaire pour l'appliquer.

6.1.1 Mode de calcul

Dans ce document, les modèles de dispersion atmosphériques applicables pour analyser les émissions de combustion sont discutés. Le modèle ISC3 est recommandé pour modéliser les concentrations de polluants dans l'air et les taux de dépôt humide et sec autour d'une installation de combustion.

Des méthodes pour calculer les concentrations de polluants :

- dans les sols,
- dans les eaux de surface,
- dans l'eau de pluie.

sont présentées.

Les voies d'exposition considérées sont les suivantes :

- l'ingestion de sol, d'aliments incluant le poisson et les crustacés, d'eau et de lait maternel,
- l'absorption cutanée par contact avec le sol pollué et à partir de l'eau,
- l'inhalation de poussières remises en suspension.

Les approches proposées pour le calcul de la concentration de polluant dans le sol permettent de prendre en compte les dépôts humide et sec à partir de l'atmosphère, la diffusion de l'air vers le sol, les pertes liées à la lixiviation, à la dégradation, à la volatilisation, à l'érosion et au ruissellement.

Les phénomènes de remise en suspension de poussières à partir du sol liés au vent, liés aux travaux agricoles et au trafic routier peuvent être considérés. Les flux d'émission de poussières peuvent être pris en compte pour le calcul d'une concentration de polluant sous forme particulaire dans l'air, et le calcul d'exposition par inhalation de ces particules.

Le calcul de la concentration de polluants dans les eaux de surface repose sur un bilan massique prenant en compte :

- les apports suivants : dépôt atmosphérique de particules, diffusion de polluants à partir de l'atmosphère, apport de polluant par phénomène d'érosion des sols et par phénomène de ruissellement ;
- et les pertes suivantes : dégradation des polluants dans la colonne d'eau, dégradation des polluants dans les sédiments, volatilisation des polluants à partir de la colonne d'eau, accumulation de sédiments.

En revanche, le calcul de la contamination des eaux souterraines n'est pas développé.

Pour l'estimation de la concentration de polluants dans les fruits et légumes, les phénomènes de prélèvement par les racines à partir du sol, de translocation, de dépôt de particules et de diffusion de polluants de l'air vers les feuilles sont considérés. A l'exception du dépôt particulaire, ces phénomènes sont modélisés en faisant appel à des facteurs de bioconcentration. Concernant le transfert du sol vers les plantes des substances organiques, les facteurs de bioconcentration sont issus de relations de corrélation. Pour les légumes racines, un facteur d'atténuation pour tenir compte du transfert du polluant de la zone externe de la racine vers la zone centrale est utilisé. Pour le transfert air-partie aérienne des plantes, deux approches sont proposées, la première est basée sur le concept de dépôt gazeux, la seconde sur le concept de bioconcentration.

Quant aux produits d'origine animal rentrant dans le régime alimentaire humain (œufs, lait, viande), l'estimation de leur contamination repose sur l'utilisation d'un facteur de biotransfert et la quantité de sol et de végétaux ingéré par l'animal.

Les concentrations de polluants dans les organismes aquatiques sont calculées à partir de facteur de bioaccumulation. Plusieurs sources de données sont présentées pour définir ces paramètres.

Des approches sont proposées pour estimer l'exposition du nourrisson par le lait maternel en prenant en compte la phase aqueuse et la phase lipidique du lait, l'exposition de la mère, le taux d'élimination des contaminants dans l'organisme, la partition du polluant entre les globules rouges et le plasma et l'absorption du polluant par le nourrisson.

6.1.2 Domaine d'utilisation et limites du modèle

MPE est une méthodologie proposant des approches de modélisation pour prendre en compte les expositions indirectes liées à une pollution de l'air. Elle est adaptée aux sources de pollution de type chronique et stationnaire. Elle consiste en un ensemble de modèles simples que l'évaluateur peut utiliser les uns après les autres, en fonction des voies d'exposition identifiées. Ces modèles sont liés les uns aux autres en faisant appel à la concentration de polluant dans le milieu amont. Il ne s'agit donc pas de modèles couplés. Le bilan massique du polluant dans l'environnement n'est pas respecté.

L'utilisation de cette méthode nécessite de faire appel à un modèle de dispersion atmosphérique pour disposer de données d'entrée sous forme de concentrations de polluant dans l'air et de vitesses de dépôt humide et sec de polluant sur le sol, moyennés sur l'année. A partir de ces données, les équations proposées peuvent être recodées sur un outil simple comme EXCEL. La principale difficulté d'utilisation est alors liée à la définition des paramètres d'entrée (paramètres environnementaux, paramètres physico-chimiques comme les facteurs de bioconcentration, paramètres d'exposition). Des informations sont données dans le document pour aider l'utilisateur à définir ses propres paramètres. Des recherches complémentaires sur la valeur des paramètres doivent être faites dans la littérature et dans des bases de données pour mener à bien ce type d'évaluation, même si de nombreuses références utiles sont données dans le document. L'obtention de niveaux d'exposition sous la forme de distributions probabilistes dans la population nécessite l'emploi d'outils complémentaires comme des logiciels de calcul Monte-Carlo et la définition par l'évaluateur de distributions statistiques pour les paramètres d'entrée.

Finalement, il s'agit d'un document faisant la synthèse d'éléments de modélisation simples, définis comme des modèles de criblage ("screening-level models" en anglais). Il fournit les outils nécessaires à la réalisation d'une évaluation de risque moyenne ou majorante pour des scénarios d'exposition spécifiques dans le cas d'une pollution chronique de l'air.

6.2 HUMAN HEALTH RISK ASSESSMENT PROTOCOL FOR HAZARDOUS WASTE COMBUSTION FACILITIES (HHRAP)

(Documents disponibles à l'adresse Internet suivante :
www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/combust/riskvol.htm)

Il s'agit d'une méthode publiée par l'Office of Solid Waste.

Les documents fournis ont pour but de définir l'ensemble de la démarche à suivre pour réaliser une évaluation des risques liés aux émissions d'incinérateurs de déchets dangereux. La manière de caractériser le site, de définir les scénarios, d'évaluer l'exposition, de caractériser et d'interpréter le risque est présentée. Plus précisément le document fournit, sous forme d'annexes, l'ensemble des équations nécessaires pour quantifier l'exposition, ainsi que les données d'entrée. Des valeurs par défaut sont fournies pour la plupart des paramètres et leur origine est mentionnée.

6.2.1 Mode de calcul

La quantification de l'exposition passe par l'évaluation des concentrations dans l'air à partir des taux d'émission de polluants par l'installation. Le modèle recommandé pour faire cette évaluation est ISC3. Il permet de calculer les concentrations moyennes sur le long terme des polluants émis dans l'atmosphère, ainsi que les flux de dépôt des polluants, qu'il s'agisse de dépôt particulaire ou gazeux, de dépôt humide ou sec.

A partir de ces concentrations et de ces flux, l'exposition directe par inhalation peut être calculée, ainsi que les expositions indirectes par voie d'ingestion. L'exposition par voie cutanée n'est pas évaluée.

Les voies d'exposition indirectes prises en compte sont :

- l'ingestion de sol,
- l'ingestion de végétaux,
- l'ingestion de viande de bœuf, l'ingestion de viande de porc, l'ingestion de viande de volaille,
- l'ingestion de lait,
- l'ingestion d'œufs,
- l'ingestion de poisson.

Pour cela les concentrations dans le sol, dans les eaux superficielles (eaux courantes et eaux stagnantes) et dans les sédiments sont estimées à partir de la contamination de l'air.

En fonction des voies d'exposition considérées, les dépôts de polluants de l'air sur le sol sont supposés homogénéisés sur une profondeur de 1 cm (sol non bêché) ou de 20 cm (sol bêché).

La concentration dans le sol est calculée à partir de la résolution d'une équation différentielle de premier degré, prenant en compte les dépôts sec et humide, particulaire et gazeux, à partir de l'air pendant la période de fonctionnement de l'incinérateur et les pertes de polluants à partir du sol par les phénomènes de ruissellement, de lixiviation et de dégradation biotique et abiotique. Des équations sont également présentées pour le calcul des pertes par volatilisation et érosion, mais il est recommandé dans ce guide de considérer ces phénomènes comme nuls.

Les apports de polluants pris en compte pour la contamination des eaux superficielles sont les dépôts directs à partir de l'atmosphère, l'érosion et le ruissellement sur les surfaces imperméabilisées et sur les surfaces perméables dans le bassin versant.

La concentration de polluant dans les sédiments est estimée en considérant que la quantité de sédiments qui se dépose à partir de la colonne d'eau est égale à la quantité de sol introduite dans l'eau par phénomène d'érosion, moins la quantité de sédiments en suspension entraînée par le courant.

La concentration dans les végétaux est estimée en prenant en compte les phénomènes de dépôt et de transfert de vapeur avec l'air pour la partie aérienne et les prélèvements racinaires. La concentration par dépôt est obtenue par la résolution d'une équation différentielle de premier degré prenant en compte le dépôt particulaire sec, le dépôt particulaire humide et le coefficient de perte superficielle (par le vent, l'eau, la croissance). La concentration par transfert de vapeur à partir de l'air est calculée à partir d'un facteur de bioconcentration. Un facteur d'atténuation est introduit pour tenir compte du transfert réduit des substances lipophiles vers la partie interne des végétaux. Concernant la contamination liée au transfert à partie des racines, elle est estimée à partir de facteurs de bioconcentration. Pour les substances organiques, il s'agit d'un facteur de bioconcentration défini par des relations de corrélation. Pour les légumes racines comme la carotte ou les tubercules de pomme de terre, un facteur d'atténuation est introduit pour les substances lipophiles, pour tenir compte du transfert réduit de la substance chimique au cœur du légume.

La concentration dans les produits animaux terrestres est définie à partir des quantités de polluants ingérés par l'animal producteur à travers sa consommation de grains, de fourrage, d'ensilage, son ingestion de sol et à partir d'un facteur de transfert reliant la concentration de polluant dans l'aliment consommé par l'homme à la quantité de polluant ingéré quotidiennement par l'animal.

La concentration de polluant dans le poisson est calculée différemment selon la substance polluante concernée. Pour les substances possédant un coefficient de partition octanol-eau inférieur à 10000, la concentration de polluant dans le poisson est calculée à partir de la concentration de polluant dans l'eau et d'un facteur de bioconcentration. Pour les substances présentant un coefficient de partition octanol-eau supérieur à 10000, la concentration de polluant dans la chair du poisson est calculée à partir d'un facteur de bioaccumulation et de la concentration de polluant dans l'eau. Pour les dioxines, furannes et PCB, la concentration de polluant dans la chair du poisson est calculée à partir d'un facteur de bioaccumulation spécifique relié à la concentration de polluant dans les sédiments.

6.2.2 Domaine d'utilisation et limites du modèle

Compte-tenu de la ressemblance existant entre ce guide méthodologique et le guide développé par le NCEA présenté dans le chapitre 6.1, les mêmes remarques peuvent être faites concernant les limites de l'approche développée.

Par ailleurs, un des intérêts majeurs de ce document réside dans la base de données qu'il renferme concernant les paramètres d'exposition, d'environnement et les paramètres physico-chimiques des substances.

Concernant les substances chimiques, une table est fournie en annexe pour chaque substance. Cette table fournit des valeurs pour chaque paramètre, y compris les paramètres de bioconcentration ou de biotransfert. L'intérêt de ces tables réside en la synthèse d'information qu'elles procurent en un même lieu. 204 substances organiques et métalliques susceptibles d'être émises par un incinérateur de déchets dangereux sont traitées. La principale qualité de ces tables est de reposer sur une revue et une évaluation des données disponibles dans différents guides édités par l'USEPA et le département de l'environnement, de la santé et des ressources naturelles de la Caroline du Nord. En effet, les sources citées et référencées dans ces différents guides ont été recherchées et évaluées et la démarche pour définir chaque valeur est explicitée. Ainsi, l'utilisateur dispose d'un minimum d'informations sur la qualité des données, et notamment s'il s'agit de valeurs mesurées ou estimées par des équations de corrélation.

6.3 EUSES (EUROPEAN UNION SYSTEM FOR THE EVALUATION OF SUBSTANCES)

Le logiciel et la documentation associée peuvent être obtenues auprès du European Chemicals Bureau, Joint Research Center, Ispra.

EUSES est un système informatique européen facilitant la réalisation d'évaluation quantitative du risque pour l'homme et l'environnement lié aux substances nouvelles et existantes, conformément aux principes développés dans la directive européenne 92/32/EC et le règlement du conseil Européen 793/93.

Ce système permet d'évaluer les émissions, la distribution des polluants dans l'environnement, les expositions et les risques pour la santé humaine et l'environnement, liés aux différentes étapes du cycle de vie d'une substance. Des paramètres et des méthodes d'estimation sont fournies mais chaque résultat intermédiaire peut être remplacé par des résultats de mesure.

Les risques pour l'homme sont étudiés sous l'angle de trois cibles : le consommateur, les travailleurs et l'homme via l'environnement. Dans le cadre de la problématique d'exposition des populations par les émissions des installations classées, les voies d'exposition à considérer sont celles de l'homme via l'environnement et les équations données pour le niveau local.

6.3.1 Mode de calcul

Pour cette cible, EUSES permet de calculer les doses d'exposition liées aux voies suivantes :

- l'ingestion d'eau, de viande, de produits laitiers et de poissons,
- l'inhalation d'air.

Pour évaluer ces doses d'exposition, les concentrations de polluants dans l'air, dans les eaux de surface, dans le sol et dans les eaux souterraines sont d'abord calculées.

Pour la concentration de polluant dans l'air, un coefficient reliant la concentration dans l'air au taux d'émission a été calculé grâce à un modèle gaussien nommé OPS⁷. Ce coefficient est défini pour une source d'émission ponctuelle rejetant à 10 mètres de hauteur et pour un point situé à une distance de 100 mètres de la source d'émission.

Des estimations des vitesses de dépôts particulaire et gazeux sont également fournies. Ces vitesses de dépôts ont été calculées et moyennées pour une surface ayant un rayon de 1 000 mètres autour du point d'émission.

Pour la concentration dans les eaux superficielles, sont pris en compte la dilution du rejet de la station d'épuration recevant les effluents de l'installation considérée et la partition du polluant entre l'eau et les particules en suspension.

Le calcul de la concentration de polluant dans le sol prend en compte l'apport saisonnier de boues contaminées par une station d'épuration, le dépôt continu de particules de l'air et les pertes liées à la lixiviation, à la volatilisation et à la biodégradation.

La concentration de polluants dans la nappe est approchée en l'assimilant à la concentration de polluant dans l'eau d'un sol agricole (sol labouré et recevant des boues).

Concernant les aliments, une concentration de polluants est calculée pour les légumes racines. Elle repose sur le coefficient de partition du polluant entre la plante et l'eau. Pour la partie foliaire, la concentration est calculée à l'état stationnaire en considérant d'une part l'apport par diffusion à partir de l'air et celui lié à l'eau du sol par translocation, et d'autre part, les pertes dues à la diffusion de polluant de la plante vers l'air et celles liées au métabolisme de la plante et à la dilution due à la croissance.

⁷ Van Jaarsveld, An operational atmospheric transport model for Priority Substances : specifications and instructions for use. Bilthoven, National Institute of Public Health and the Environment, 1990, Report n° 2225011002

Les concentrations dans le lait et la viande sont calculées à partir de la quantité de polluant ingérée par le bovin via le sol et les végétaux et un facteur de biotransfert défini à partir d'une relation de corrélation.

La concentration de polluants dans le poisson est calculée à partir de la concentration dans l'eau superficielle et un facteur de bioconcentration estimé par une relation de corrélation.

6.3.2 Domaine d'utilisation et limites du modèle

Les méthodes de calcul fournies s'appliquent à un environnement standardisé, ce qui permet de comparer les risques potentiels liés à différentes substances mais implique que ces méthodes ne soient pas adaptées pour une évaluation du risque pour un site spécifique.

De plus, les méthodes de calcul fournies sont simples et ne prennent en compte que le ou les principaux phénomènes de transfert entre deux milieux. De nombreux phénomènes en effet ne sont pas considérés : érosion, ruissellement, remise en suspension de particules du sol, dépôt particulaire sur les végétaux.

Cet outil dédié à l'évaluation des risques liés aux substances nouvelles et existantes dans le cadre de la méthodologie mise en place au niveau européen ne peut donc pas s'appliquer directement à la problématique de l'exposition des populations liés aux émissions d'une installation spécifique. Toutefois, certaines des équations fournies apportent une approche intéressante (accumulation de polluants dans les sols au cours du temps, contamination de la partie foliaire des végétaux) qui pourraient être réutilisées par ailleurs.

6.4 CALTOX

Modèle et documentation associée disponibles sur le site Internet :

www.cwo.com/~herd1/ctox_dwn.htm.

CALTOX est un modèle développé sous Excel, pour le Department of Toxic Substances Control (DTSC) dans le but d'aider à évaluer les risques pour la santé et de définir des seuils de remédiation pour les sols pollués. Une première version du modèle a été conçue en 1994. Une version modifiée a été élaborée en 1996 pour pouvoir prendre en compte les risques liés aux apports continus de polluants dans les sols et dans l'air. Depuis ce modèle continue à faire l'objet de travaux.

CALTOX prend en compte la contamination des sols et des milieux adjacents que sont l'air, les eaux superficielles, les sédiments, les végétaux et les eaux souterraines.

6.4.1 Mode de calcul

Le modèle comporte deux parties principales : un modèle de transfert des polluants dans l'environnement et un modèle d'exposition.

Le modèle de transfert est basé sur une représentation de l'environnement à partir de sept compartiments : une couche de sol superficielle, une couche de sol sous-jacente cultivable ou végétale, une couche de sol plus profonde correspond à la zone située entre la couche cultivable et la nappe, l'air, les eaux superficielles, les sédiments et les végétaux. Un système de sept équations représente les échanges diffusifs et convectifs de polluants ayant lieu entre ces compartiments. Parmi ces sept équations, deux sont des équations différentielles de premier ordre représentant la variation de la masse de polluant dans la couche végétale et la couche de sol la plus profonde au cours du temps. Les échanges entre les autres compartiments sont représentés par des équations linéaires, ces compartiments étant considérés dans un état quasi-stationnaire par rapport à la couche de sol cultivable et la couche de sol profonde. La concentration de polluants dans les eaux souterraines est estimée à partir du flux de lixiviation issu de la couche profonde de sol. Le système d'équations est résolu de manière analytique et c'est la solution analytique du système d'équations qui est codée dans le logiciel de calcul.

A partir des concentrations dans les milieux environnementaux, le modèle d'exposition permet de calculer les concentrations de polluants dans les milieux d'exposition, c'est-à-dire dans les milieux avec lesquels l'homme est directement en contact. Ainsi l'air inhalé à l'intérieur des bâtiments dépend de la concentration de polluant dans l'air extérieur présent sous forme gazeuse et particulaire, des émissions de polluants à partir du sol (remise en suspension de particules et émissions gazeuses), des émissions de polluants à partir de la ressource en eau utilisée.

A partir de ces concentrations dans les milieux d'exposition, les doses d'exposition sont calculées.

Les doses d'exposition calculées correspondent à :

- l'ingestion de sol, d'eau (eau du robinet et eau de baignade), de viande, d'œufs, de lait et de lait maternel,
- l'inhalation de particules et gaz à l'intérieur et à l'extérieur, l'inhalation de gaz dans la salle de bain à partir des émissions volatiles produites par l'eau de distribution,
- l'absorption cutanée à partir du sol et à partir de l'eau (eau du robinet et eau de baignade).

L'intégration de données toxicologiques dans le logiciel permet également de calculer les niveaux de risque.

Enfin, l'ensemble des paramètres d'entrée est décrit par une valeur moyenne et un coefficient de variation permettant une utilisation directe d'un modèle de calcul Monte-Carlo pour effectuer une estimation probabiliste du niveau de risque.

6.4.2 Domaine d'utilisation et limites du modèle

Le modèle CALTOX possède différents atouts :

- il est capable de prendre en compte des rejets dans l'atmosphère, dans les eaux et dans les sols,
- il prend en compte de nombreux phénomènes et voies d'exposition,
- il respecte le bilan massique du polluant dans l'environnement.

Les limites du modèle sont celles définies par les concepteurs. CALTOX est utilisable :

- pour une zone essentiellement terrestre (le modèle n'étant pas très bien adapté à la prise en compte des milieux aquatiques),
- pour des durées d'exposition supérieures à 1 an,
- pour des substances organiques (il n'est pas adapté à la prise en compte des substances partiellement ionisées, de polarité mixte et du mercure). La prise en compte des métaux et des substances organiques partiellement ionisées suppose d'adapter les paramètres. En effet, le modèle s'appuie sur les notions de fugacité et de capacité de fugacité. Or la capacité de fugacité est définie à partir des propriétés chimiques des substances comme la pression de vapeur, la solubilité et le coefficient de partage octanol-eau,
- pour une superficie supérieure à 1000 m². Cette superficie est bien inférieure à celle couramment recommandée pour l'utilisation des modèles compartimentaux de ce type. Cette limite a été indiquée pour une pollution présente dans les sols. Dans le cas d'une pollution émise dans l'atmosphère, les limites d'utilisation sont peut-être différentes.

Par ailleurs, l'étude de cet outil logiciel a aussi montré qu'il n'était pas finalisé pour un usage "grand public".

En effet, certaines fonctionnalités sont cachées (c'est le cas pour la prise en compte d'une source polluante sous la forme d'une concentration de polluant dans l'air). D'autres fonctions ne sont pas finalisées et renvoient à des cellules vides.

Le modèle est parfois aussi d'un usage difficile : les paramètres d'entrée sont à définir par l'utilisateur avec des unités inhabituelles, certaines variables comme les concentrations de polluants dans les sols sont parfois définies par rapport au poids de sol sec, parfois par rapport au poids de sol humide.

L'INERIS a également essayé de retrouver la solution analytique du système d'équations entré dans le modèle CALTOX. Pour évaluer les concentrations de polluants hors site dans les différents compartiments environnementaux, CALTOX propose un système d'équations simplifiées constitué de sept équations linéaires, représentant les concentrations et les échanges de polluants dans ces compartiments environnementaux à l'état stationnaire. L'INERIS a comparé la solution fournie par le logiciel MATHEMATICA 2⁸ (Wolfram Research, 1991) pour ce système d'équations avec celle fournie par CALTOX. Une solution différente pouvant aboutir à des concentrations substantiellement différentes dans les compartiments environnements, selon les cas testés, a été obtenue. Un contact pris avec les concepteurs du modèle a permis d'apprendre que le système avait été simplifié et certains des éléments des équations négligés, toutefois ces simplifications n'expliquent pas les différences de résultats obtenus.

⁸ Wolfram Research, Mathematica, a system for doing mathematics by computer, version 2.0, Windows Version, 1991

En outre, le modèle ne permet pas de prendre en compte la dimension spatiale. En effet, les concentrations de polluants dans les compartiments environnementaux sont uniformes dans l'espace. Par conséquent, dans le cadre d'une étude s'intéressant à une émission de polluants dans l'air, cela n'aurait pas de sens de définir la pollution comme un taux d'émission rejeté dans l'air, car les concentrations générées par le logiciel seraient alors inversement proportionnelles à la surface de la zone d'étude. Il faut utiliser les concentrations de polluants dans l'atmosphère résultant de l'utilisation préalable d'un logiciel de dispersion. Dans ce cas, il faut limiter la zone d'étude à une zone relativement homogène du point de vue des concentrations atmosphériques liées au rejet de l'installation. Il faut aussi noter que pour estimer les concentrations et les doses d'exposition pour les populations, liées aux rejets émis dans l'air par une installation industrielle, l'utilisation du dépôt surfacique de polluant sur le sol conduirait à une utilisation erronée du logiciel CALTOX, compte tenu de la structure de calcul du module de transfert (en effet, cette approximation supposerait une contamination de l'atmosphère uniquement par des phénomènes de transfert secondaires à partir des autres milieux et notamment à partir du sol, ce qui devrait tendre à minorer les phénomènes de persistance du polluant dans l'environnement).

Dans la mesure où il s'agit d'une version bêta, toujours en cours de développement, il apparaît indispensable de poursuivre les investigations concernant ce logiciel, avant de l'employer dans le cadre d'études, ceci afin d'éclaircir les problèmes mis en évidence et d'éviter une mauvaise utilisation.

6.5 MEPAS (MULTIMEDIA ENVIRONMENTAL POLLUTANT ASSESSMENT SYSTEM)

MEPAS est un logiciel développé par le U.S. Department of Energy's Pacific Northwest Laboratory pour le département américain de l'énergie (DOE). L'objectif de MEPAS est de classer les sites présentant des risques potentiels de nature chimique et radiologique pour la population environnante.

Ce logiciel est disponible à l'adresse internet suivante :
<http://mepas.pnl.gov:2080/earth/earth.htm>.

6.5.1 Mode de calcul

MEPAS intègre différents modules pour le calcul de la source, des concentrations de polluants dans les milieux et le calcul des niveaux d'exposition et de risque. Il intègre un module d'analyse de l'incertitude et de la variabilité.

MEPAS permet de calculer les concentrations de polluants sur le long terme, liées à une émission atmosphérique, qu'il s'agisse d'une source ponctuelle comme une cheminée ou de sources surfaciques comme les émissions particulières liées à un sol pollué. Le modèle de dispersion utilisé est un modèle gaussien. La rugosité du site peut être prise en compte. Le modèle calcule également les dépôts secs et les dépôts humides sur le sol et la remise en suspension de poussières à partir du sol.

Par ailleurs, le modèle contient des modules de calcul dédiés aux transferts dans les eaux souterraines, dans les eaux superficielles et aux transferts terrestres.

Les voies d'exposition prises en compte sont :

- l'ingestion d'eau, de sols, de sédiments, de produits d'origine végétale, animale et aquatique,
- l'inhalation de polluants aériens,
- et l'absorption cutanée à partir du sol et de l'eau.

6.5.2 Domaine d'utilisation et limites du modèle

Il s'agit d'un logiciel constitué d'algorithmes restant relativement simples. MEPAS est donc un outil de "screening". Toutefois, cet outil semble complet car il permet de prendre en compte les différents milieux et les différentes voies d'exposition qui peuvent résulter des émissions d'une installation classée.

En revanche, le modèle ne respecte pas le principe de conservation de la masse. Il est constitué de plusieurs modules dédiés à différents milieux. Les calculs sont liés les uns aux autres en faisant appel à la concentration de polluant dans le milieu amont. Il ne s'agit pas de modules véritablement couplés.

Malgré cette limite et dans l'attente d'un outil plus performant pour définir l'évolution des concentrations de polluants dans le temps et l'espace, MEPAS pourrait peut-être constituer une réponse aux besoins d'estimation des expositions liées aux émissions atmosphériques des installations industrielles. Une étude approfondie de cet outil devrait être entreprise.

6.6 MEND-TOX

Il s'agit d'un logiciel commercialisé récemment par la société Envirosoft sur le site www.mmenvirosoft.com et utilisable sous Windows.

Le logiciel a été développé initialement par la School of Engineering and Applied Science à l'Université de Los Angeles. Il s'agit d'un modèle multimédia prenant en compte les milieux biologiques et physiques et assurant la conservation de la masse du polluant. C'est un modèle dynamique permettant de suivre l'impact des variations de température, des vitesses du vent et du taux de rejet des polluants.

Il est basé sur la définition de huit compartiments :

- le sol,
- l'air,
- les aérosols,
- l'eau,
- les matières en suspension,
- les sédiments,
- les végétaux
- la faune aquatique.

Les compartiments atmosphériques et aqueux sont supposés parfaitement mélangés et le bilan massique de polluants dans ces compartiments est représenté par une équation différentielle de premier ordre. Les compartiments correspondant au sol et aux sédiments sont supposés non uniformes et les transferts de polluants sont représentés par des équations de convection et diffusion à une dimension. L'ensemble des équations est résolu simultanément.

Les phénomènes d'infiltration des eaux de pluie dans le sol, de ruissellement, de dépôt humide des gaz, de dépôt sec et humide des particules, de remise en suspension des particules par le vent, de dépôt et de remise en suspension des sédiments sont considérés.

La contamination des végétaux se fait via le sol et l'atmosphère. La contamination des organismes aquatiques prend en compte les transferts via l'eau et la chaîne alimentaire. Les animaux terrestres ne sont pas considérés.

Une des particularités de MEND-TOX est de tenir compte de la distribution des particules selon leur taille dans la modélisation du devenir de ces particules.

D'après les auteurs, la résolution du modèle et la représentation de la partition des polluants dans l'environnement peuvent être améliorées par la définition de nouveaux compartiments.

Toutefois, dans l'état prédéfini, le modèle semble plutôt adapté pour traiter de la répartition des polluants à une échelle régionale. Les exemples et les applications référencées dans la littérature correspondent d'ailleurs toutes à des applications à une échelle régionale.

Sur un plan pratique, l'acquisition de ce logiciel pose problème pour l'instant, l'INERIS n'ayant pas réussi jusqu'alors à établir le contact avec la société supposée le distribuer.

6.7 RESRAD (RESIDENTIAL RADIATION)

Logiciel disponible sur le site Internet : <http://web.ead.anl.gov/resrad/register2/>.

RESRAD a été développé par Argonne National Laboratory pour le département de l'énergie américain (DOE), afin de définir des doses de rayonnements et des excès de cancer sur la vie entière pour des sites spécifiques.

Les voies d'exposition prises en compte par RESRAD sont :

- l'exposition directe,
- l'inhalation de poussières, de radon,
- l'ingestion de sol, d'eau, d'aliments d'origine végétale, animale et aquatique.

Une version de ce logiciel a été adapté pour traiter les substances chimiques. Cette version contient une base de données physico-chimiques et toxicologiques de 151 substances. Le logiciel permet de réaliser des calculs de sensibilité.

La version adaptée pour les substances chimiques prend également en compte l'absorption cutanée à partir du sol et à partir de l'eau contaminée.

RESRAD s'adresse aux contaminations de sol. Son utilisation suppose donc l'emploi en amont d'un logiciel de calcul de dispersion atmosphérique et de calcul des dépôts sur le sol.

6.8 MMSOILS (THE MULTIMEDIA CONTAMINANT FATE, TRANSPORT, AND EXPOSURE MODEL)

Logiciel et document disponible par courrier auprès du Center for Exposure Assessment Modeling (CEAM).

MMSOILS est un logiciel développé par le CEAM, structure appartenant à l'USEPA, pour estimer l'exposition et les risques pour la santé liés aux rejets de polluants par les sites renfermant des déchets.

Il s'agit d'un modèle multimédia qui permet de prendre en compte l'érosion des sols, l'accumulation dans la chaîne alimentaire et le devenir des polluants dans les eaux souterraines, dans les eaux superficielles et dans l'air. Les voies d'exposition prises en compte sont :

- l'ingestion de sol, l'ingestion d'eau, de poisson, de végétaux issus de sols contaminés et l'ingestion de produits animaux à partir de bêtes pâturant sur des sols contaminés,
- l'inhalation de polluants gazeux et particulaires,
- l'absorption cutanée à partir de sol et d'eau.

Le logiciel permet de calculer les risques grâce une base de données toxicologiques intégrées.

Là encore, il s'agit d'un logiciel qui s'adresse aux contaminations de sols. Son utilisation suppose donc l'emploi en amont d'un logiciel de calcul de dispersion atmosphérique et de calcul des dépôts sur le sol.

6.9 FRAMES-HWIR (FRAMEWORK FOR RISK ANALYSIS IN MULTIMEDIA ENVIRONMENTAL SYSTEMS)

Il s'agit d'un outil, fonctionnant sous PC, disponible depuis Juin 2000, sous la version 0.98 bêta, sur Internet, à l'adresse suivante : www.epa.gov/ceampubl/hwir.htm. La documentation associée peut être téléchargée du site Internet :

www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/id/hwirwste/risk.htm.

FRAMES-HWIR est un système informatique et multimédia, conçu par le Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), sous la conduite de l'USEPA pour mener des évaluations de risques liés aux rejets de substances dangereuses par les unités de stockage de déchets. Le but recherché par l'USEPA est de définir des critères de concentration de polluants dans les déchets à stocker qui ne présentent pas de risque pour la santé humaine et les écosystèmes. La démarche consiste alors à réaliser un ensemble d'évaluations de risque grâce à cet outil informatique sur des sites réels.

FRAMES est un système composé d'une interface utilisateur et d'une série de processeurs permettant de faire tourner de nombreux modèles de transport et d'exposition avec un minimum de modifications. Il comporte différentes bases de données sur les conditions physiques des sites, les propriétés physico-chimiques, toxicologiques et écotoxicologiques des substances.

Le système permet de traiter les substances organiques et inorganiques. Il permet d'estimer :

- les fuites ou les rejets de polluants générés par les sites de stockage de déchets par érosion, volatilisation, ruissellement, lixiviation et remise en suspension de particules ;
- les transferts de polluants dans l'air, les eaux souterraines, le sol, dans les bassins versants, les rivières, les lacs et les zones humides.

Il prend en compte les cibles humaines différenciées en cinq classes d'âge définies, ainsi que la faune et la flore terrestres et aquatiques.

Concernant les cibles humaines, les voies d'exposition traitées sont :

- celles liées au contact direct avec l'eau et les sols,
- celles liées à l'ingestion de sol, d'eau, de végétaux, de viande, de lait, et de lait maternel,
- celles liées à l'inhalation de particules et de gaz, y compris lors de la prise de douche.

Bien que cet outil ne soit pas non plus directement utilisable dans le cadre de la problématique définie dans ce rapport, il représente une source documentaire intéressante car les données et les équations utilisées sont détaillées. Néanmoins, cet outil semble se référer assez largement aux documents relatifs à "The methodology for assessing Health Risks associated with Multiple Pathways of Exposure to combustor (MPE)" décrite au chapitre 6.1.

6.10 PC-GEMS

PC-GEMS est inclus dans le CD-ROM distribué par l'Office of Research and Development de l'USEPA et intitulé Exposure Models Library and Integrated Model Evaluation System. Le guide de l'utilisateur peut être téléchargé de l'adresse internet suivante : <http://www.epa.gov/opptintr/cbep/actlocal/pcgems/pcgemsu.htm>.

PC-GEMS est la version PC d'un logiciel intitulé GEMS (Graphical Exposure Modeling System). PC-GEMS est un logiciel utilisable sous DOS. Il s'agit d'un système regroupant différents modèles pour estimer les concentrations de polluants dans l'atmosphère, les eaux superficielles, les eaux souterraines et le sol. Ce système comporte aussi des outils d'estimation des paramètres physico-chimiques des substances et des fonctionnalités statistiques et graphiques pour générer des graphiques et des cartes. De plus, il contient des bases de données américaines sur l'environnement et les populations permettant d'alimenter les modèles (données de recensement de la population, données atmosphériques, climatiques, débits des cours d'eau).

PC-GEMS est un système informatique incluant les modèles suivants :

- ENPART : modèle permettant d'estimer les coefficients de partage à l'équilibre des polluants entre l'air, l'eau et les sols.
- ISCLT : modèle permettant de calculer les concentrations annuelles au niveau du sol et les vitesses de dépôt.
- PTPLU : Modèle de dispersion gaussien permettant d'estimer le lieu de concentration maximale à court terme lié à une source ponctuelle.
- SESOIL : permettant d'estimer le transfert vertical des polluants dans la colonne de sol.
- AT123D : permettant d'estimer le devenir des polluants dans les eaux souterraines.
- EXAMS II : permettant d'estimer le devenir des polluants dans les eaux superficielles.
- ReachScan : permettant de calculer les concentrations dans les eaux à l'état stationnaire.

Une nouvelle version du logiciel utilisable sous PC est en cours d'élaboration. Il était prévu qu'elle soit accessible à tous par Internet courant 2001. Cette version permettra d'utiliser des données issues des bases de l'USEPA comme ORACLE et TRIS.

Cet outil fournit des modèles intéressants pour calculer les concentrations dans les milieux air, eau et sol résultant de pollutions. Toutefois, il ne fournit pas une réponse complète à la problématique des expositions d'une population soumise à une source de pollution. Il s'agit ici d'un ensemble de modèles de transfert dans les milieux environnementaux et non pas d'un logiciel de calcul des concentrations de polluants dans les milieux d'exposition ou de calcul des doses d'exposition. PC-GEMS est présenté ici à titre d'exemple, pour rappeler que de nombreux outils de modélisation des transferts spécifiques d'un milieu et de niveau de sophistication différent existent et peuvent servir aux calculs des concentrations de polluants dans les milieux, en amont aux calculs des expositions. En effet, les calculs d'exposition peuvent être effectués dans un deuxième temps, à partir d'équations simples, codées sous Excel et éventuellement de bases de données sur les budgets espaces-temps des populations.

Ce type d'approche a cependant pour défaut de ne pas assurer le respect du principe de conservation de la masse.

6.11 TRIM (TOTAL RISK INTEGRATED METHODOLOGY)

Document disponible sur le site Internet : www.epa.gov/ttn/uatw/urban/trim/trimpg.html.

L'Office of Air Quality, Planning and Standards (OAQPS) est chargé au sein de l'USEPA d'évaluer et de gérer les risques liés aux substances émises dans l'air ambiant. Dans un rapport édité en 1999, cet organisme indique qu'il n'existe aucun modèle qui réponde réellement à ses besoins pour mener des évaluations de risques consistantes. En l'absence d'un outil couvrant vraiment l'ensemble des besoins induits par la charge de l'évaluation des risques liés aux substances émises dans l'air ambiant, l'OAQPS précise avoir jusqu'alors utilisé des méthodes de calcul différentes n'assurant pas une véritable cohérence entre les travaux réalisés. C'est pourquoi un projet a été lancé pour développer un nouveau modèle scientifiquement "défendable, convivial et souple".

Les caractéristiques recherchées au travers de cet outil informatique sont les suivantes :

- le respect du principe de conservation de la masse,
- la capacité à caractériser l'incertitude et la variabilité liées aux paramètres d'entrée sur le résultat,
- la capacité à évaluer les risques liés à une ou plusieurs substances issues de sources multiples et au travers de voies d'exposition multiples,
- une architecture modulaire permettant d'utiliser des modèles et des données extérieures,
- la capacité à traiter des problèmes avec des échelles de temps et d'espace variables,
- la capacité à évaluer les risques écologiques et les risques pour la santé humaine,
- un outil facilement accessible sur PC, bien documenté, clair et transparent.

TRIM est composé de trois parties :

- TRIM-FATE : module de calcul des transferts de polluants dans l'environnement et de l'exposition des écosystèmes,
- TRIM-EXPO : module de calcul des expositions humaines,

- TRIM-RISK : module de caractérisation du risque.

TRIM.FATE est un modèle de calcul composé de compartiments représentant les milieux physiques et biologiques. Dans TRIM.FATE, tous les compartiments sont couplés et les transferts secondaires de polluants (comme par exemple la revolatilisation à partir du sol) sont pris en compte pour assurer le respect du principe de conservation de la masse dans le système. Le degré de résolution spatiale du modèle peut être adaptée, selon les besoins, par l'utilisateur. Ainsi les concepteurs indiquent que ce logiciel peut être utilisé pour des applications s'attachant aux risques au niveau d'un site spécifique jusqu'aux risques au niveau d'une agglomération. Un des grands atouts de TRIM.FATE est de disposer d'une bibliothèque d'algorithmes permettant de choisir entre différentes équations pour représenter un type de transfert de polluants. Cette possibilité permet d'évaluer l'impact de différentes équations sur la valeur prédite et donc d'avoir une approche de l'incertitude liée à la formulation des équations. TRIM.FATE permet aussi d'analyser l'incertitude et la variabilité d'une manière distincte grâce à une procédure de calcul incorporée. Enfin, l'utilisateur a accès aux calculs réalisés par le logiciel et peut ainsi suivre, lors du déroulement des calculs, les équations utilisées et les valeurs prises par les variables. Cela permet à l'utilisateur de véritablement connaître le détail des calculs par opposition aux outils "boîtes noires" mal documentés et dont le code de calcul n'est pas accessible. En 2001, des activités d'évaluations de TRIM.FATE sont prévues à partir d'études d'évaluation de risque.

TRIM.EXPO évalue l'exposition de cohortes de populations, c'est-à-dire l'exposition de sous-groupes de populations présentant des caractéristiques identiques. Les caractéristiques définissant les cohortes peuvent être adaptées par l'utilisateur. Pour chaque cohorte, le budget espace-temps d'un individu y appartenant est utilisé afin de définir une séquence d'évènements qui servira à estimer l'exposition. La variabilité entre les individus d'une cohorte est appréhendée à travers la réalisation de multiples simulations.

D'après les informations fournies par les concepteurs en cours d'année, TRIM.FATE et la partie de TRIM.EXPO dédiée à l'inhalation sont en phase d'évaluation. En 2002, la réalisation de la partie ingestion du module TRIM.EXPO et la réalisation de TRIM.RISK sont prévues. En revanche, la prise en compte des voies concernant l'absorption cutanée est envisagée à plus longue échéance. Fin 2002, le logiciel TRIM sera peut-être disponible au public.

Compte-tenu des capacités présentées dans les documents techniques d'ores et déjà disponibles, TRIM apparaît comme un outil très séduisant allant au-delà des performances des outils aujourd'hui disponibles. Il est d'ailleurs présenté comme un modèle multimédia de nouvelle génération. Toutefois, la sophistication de l'outil, notamment pour la définition de la résolution spatiale des problèmes peut faire craindre que cet outil ne soit réservé qu'à des utilisateurs très expérimentés, ce qui réduirait bien sûr son intérêt en tant qu'outil de référence.

7. CONCLUSION

D'une manière générale, pour utiliser correctement un modèle de calcul, il est indispensable de savoir avec quel objectif le modèle a été développé et de connaître le détail des principes de modélisation qu'il renferme. Un utilisateur ne peut pas se contenter d'entrer des données dans une boîte noire. Un tel comportement conduit nécessairement à une interprétation erronée du résultat obtenu. Aussi, l'amélioration du niveau des études d'évaluation des expositions passe par une meilleure connaissance des approches de modélisation.

Dans un deuxième temps, le manque de souplesse et la spécificité des études poussent les évaluateurs de risque à développer leurs propres modules de calcul.

Le recensement réalisé par l'INERIS sur les modèles disponibles et conçus pour évaluer les risques liés aux émissions atmosphériques d'installations industrielles constitue une première étape d'avancement pour répondre à ces besoins.

Ainsi, les documents méthodologiques, publiés par l'USEPA :

- The methodology for assessing Health Risks associated with Multiple Pathways of Exposure to combustor (MPE),
- et de Human Health Risk Assessment Protocol for Hazardous Waste Combustion Facilities (HHRAP),

peuvent servir de base pour calculer des doses d'exposition. Les algorithmes présentés dans ces documents peuvent être repris pour créer un code de calcul simple sous format Excel. Le format Excel pour ce type de calculs est suffisant. Il permet une prise en main facile et supporte la réalisation d'évaluations de risque probabilistes, grâce à des logiciels "add-ins" comme Cristal-Ball ou @Risk. Une conception modulaire faisant appel à des bases de données permettra de faire évoluer un tel outil en intégrant de nouvelles équations et de nouvelles données au fil des connaissances acquises.

Au-delà de ces documents méthodologiques pouvant servir de base à la conception d'un nouvel outil de calcul, MEPAS a été identifié comme un logiciel informatique préexistant pouvant répondre aux besoins d'évaluation des expositions liées aux émissions dans l'atmosphère. Une étude de cet outil est nécessaire pour mieux connaître son potentiel, sa souplesse et ses limites pour évaluer les risques, selon les principes et la méthode définis dans les guides de référence existant en France.

Par ailleurs, des logiciels comme MMSOILS, RESRAD et EUSES peuvent constituer une source d'informations intéressante en terme de paramètres et d'équations pour la modélisation des expositions liées à des voies particulières. Notamment, un travail de confrontation des équations et des facteurs de biotransfert utilisés dans ces différents outils pour modéliser la contamination de la chaîne alimentaire mériterait d'être fait, compte tenu de l'importance de ces voies en terme de risque et de la forte incertitude qui y est toujours attachée. Ce travail permettrait d'enrichir et de faire évoluer l'outil modulaire de calcul sous Excel évoqué ci-dessus.

nfin, il est important de suivre les évolutions du logiciel CALTOX, de plus en plus utilisé dans les évaluations de risque réalisées en France, malgré les problèmes qu'il pose et l'avancement d'outils plus sophistiqués comme TRIM, qui a terme pourrait offrir de nouvelles potentialités dans le domaine de l'évaluation des risques. En l'absence de validation des modèles multimédia ou de validation très partielle dans des cas particuliers, ces deux modèles ont l'avantage par rapport à d'autres outils, de respecter le principe de conservation de la masse, critère de solidité scientifique appréciable.

ANNEXE

TABLEAUX COMPARATIFS DES FONCTIONNALITES OFFERTES PAR LES OUTILS DE MODELISATION LES PLUS INTERESSANTS IDENTIFIES POUR LE CALCUL DES EXPOSITIONS LIEES AUX EMISSIONS ATMOSPHERIQUES DES INSTALLATIONS INDUSTRIELLES

Les tableaux ci-dessous ont pour but de faciliter une comparaison rapide des modèles disponibles. Toutefois, l'intercomparaison de modèles au travers de tableaux ne permet pas de mettre en évidence l'ensemble des fonctionnalités de chaque modèle, ni d'indiquer précisément les différences de calcul pouvant exister entre les modèles.

Tableau 1 : Présentation générale

	MPE	HHRAP	EUSES	CALTOX	MEPAS
Document méthodologique ou logiciel(s) ¹	DM	DM	DM/L	L	L
Terme source de pollution pour le calcul des expositions par voies indirectes	dépôts humides et secs de particules sur le sol ²	dépôts humides et secs de particules sur le sol ²	flux d'émission dans l'air, rejet de STEP dans les eaux superficielles, flux de boues de STEP sur les sols	flux d'émission dans l'air, sur le sol et dans les eaux superficielles concentration de polluant dans le sol et l'air	flux d'émission dans l'air concentration dans l'air, le sol, masse de polluant dans les eaux souterraines, dans une retenue d'eau superficielle, dans le sol
Polluants considérés ³	O/M	O/M	O/M	O	O/M/R
Base de données physico-chimiques		X		X	X
Concentrations variables dans le temps				X	X
Calcul de risque				X	X
Module de calcul de sensibilité					X
Monte-Carlo				X	
Conservation de la masse				X	
Mode de résolution ⁴	A	A	A	A	A/N

1 : indique s'il s'agit d'une méthodologie de calcul présentée sous la forme d'un guide ou d'un logiciel informatique accompagné d'une documentation (DM : document méthodologique / L : logiciel)

2 : Avant de détailler le calcul des expositions par les voies indirectes, ces outils indiquent quel logiciel est utilisé pour calculer les concentrations de polluants dans l'air et les vitesses de dépôt.

3 : polluants organiques : O, métaux : M, radionucléides : R

4 : Résolution analogique (A) ou numérique (N)

Tableau 2 : Calcul des concentrations environnementales - Compartiments pris en compte

Compartiments	MPE	HHRAP	EUSES	CALTOX	MEPAS
sol	X	X	X	3 couches	X
air	X	X	X	X	X
eau superficielle	X	X	X	X	X
eau de pluie	X				
eau souterraine			assimilée à l'eau du sol	X	X
sédiments		X		X	
végétation				X	

Tableau 3 : Calcul des concentrations des aliments d'origine végétale - Phénomènes pris en compte

	MPE	HHRAP	EUSES	CALTOX	MEPAS
partie souterraine					
à partir du sol : prélèvement par les racines	X	X	X	X	
à partir de l'air : dépôt de particules diffusion gazeuse					
à partir de l'eau d'arrosage				X	
partie aérienne					
à partir du sol : prélèvement par les racines par dépôt de sol	X	X	X	X X	X
à partir de l'air : dépôt de particules diffusion gazeuse	X X	X X	X	X X	X
à partir de l'eau d'arrosage				X	X
Dilution par croissance			X		
Photodégradation			X		
Métabolisation			X		

Tableau 4 : Types de transfert considérés

Compartiments	MPE	HHRAP	EUSES	CALTOX	MEPAS
à partir du sol					
remise en suspension de particules	X			X	X
lixiviation	X	X	X	X	X
volatilisation	X		X	X	X
érosion	X			X	X
ruissellement	X	X		X	X
dégradation	X	X	X	X	X
à partir de l'air					
diffusion vers le sol	X			X	
diffusion vers les eaux superficielles	X	X		X	
dépôts de gaz		X	X		X
dépôts de particules		X	X	X	X
dégradation				X	X
à partir des eaux superficielles					
volatilisation vers l'air	X	X	X	X	
sédimentation	X	X	X		
diffusion vers les sédiments			X		
dégradation	X		X	X	
à partir des sédiments					
diffusion vers les eaux superficielles				X	
remise en suspension				X	
dégradation	X			X	

Tableau 5 : Voies d'exposition - Doses d'exposition calculées

Voies	MPE	HHRAP	EUSES	CALTOX	MEPAS	RESRAD	MMSOILS	FRAMES-HWIR
ingestion :								
- de sol	X	X		X	X	X	X	X
- d'aliments d'origine végétale	X	X	X	X	X	X	X	X
- eau	X	X	X	X	X	X	X	X
- de lait	X	X	X	X	X	X	X	X
- de viande	X	X	X	X	X	X	X	X
- d'oeufs	X	X		X		X	X	
- de poissons	X	X	X	X	X	X	X	X
- de lait maternel	X			X				X
inhalation								
- air extérieur	X	X	X	X	X	X	X	X
- air intérieur				X	à partir de l'eau de distribution			
- poussières	X	X	X	X	X	X	X	X
contact cutané								
- à partir du sol	X			X	X	X	X	X
- à partir de l'eau	X			X	X	X	X	X

