



ENSP
ÉCOLE NATIONALE DE
LA SANTÉ PUBLIQUE

RENNES

Ingénieur du Génie Sanitaire
Promotion 2005

**Faisabilité d'une méthode d'analyse de risques
cumulés sur un secteur géographique donné :
Exemple de la zone industrielle Nord de la ville
de Limoges (87)**

Présenté par :

Anne-Hélène LIEBERT

Ingénieur Eau et Environnement ENSIL

Référent Professionnel :

M. Jean JAOUEN

IGS DDASS de la Haute-Vienne

Référent Pédagogique :

Mme Michèle LEGEAS

ENSP-EGERIES

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur Jean **JAOUEN**, IGS à la DDASS de la Haute-Vienne et référent professionnel pour ce mémoire, pour sa disponibilité tout au long de ces quatre mois, son aide précieuse et ses conseils pertinents lors de mes interrogations, et aussi pour m'avoir intégrée à la vie du service Santé-Environnement.

Je voudrais remercier aussi tout le personnel du service Santé-Environnement de la **DDASS** de la Haute-Vienne ainsi que celui de la **DRASS** du Limousin, notamment Florence **ALLOT**, Sandrine **AUVINET** et Catherine **LINTZ**, qui m'ont permis d'obtenir les renseignements, les données, les cartes nécessaires à l'avancement de ce mémoire et pour tous leurs conseils et encouragements afin de le réaliser au mieux.

Mes remerciements vont ensuite au personnel de la DRIRE du Limousin (Monsieur Gilles **RIO**) et de la subdivision de la Haute-Vienne (Monsieur Yannick **BARBAN**) pour leur contribution active dans la réalisation de ce mémoire et toutes les données chiffrées que j'ai pu acquérir afin de traiter l'exemple de la zone industrielle de la ville de Limoges.

Je voudrais remercier toutes les personnes que j'ai contactées lors de la réalisation de ce travail (DDASS, CIRE, DRIRE), qui n'ont pas hésité à m'envoyer de nombreuses documentations et à me faire part de leurs retours d'expérience sur des thématiques similaires à celles de mon travail :

- Monsieur Michel **NOUSSITOU** de la DDASS des Pyrénées-Atlantiques ;
- Madame Karine **HADJI** de la DDASS des Bouches-du-Rhône ;
- Mademoiselle Emmanuelle **MARTIN** de la DDASS de Seine-Maritime ;
- Mademoiselle Hélène **DU CREST** de la DDASS Nord-Pas-de-Calais ainsi que Monsieur **DUBUIS** du SPPPI ;
- Monsieur Donatien **DIULIUS** de la CIRE Nancy.

Je remercie également Madame Isabelle **NICOULET** de la DGS pour ses conseils avisés sur la thématique complexe qu'est l'Évaluation des Risques Sanitaires.

Ensuite, je tiens à remercier tout particulièrement Madame Michèle **LEGEAS**, référente pédagogique et professeur à l'École Nationale de Santé Publique, pour m'avoir guidée et orientée tout au long de ce travail : de la préparation à la finalisation de ce mémoire. Son expérience dans ce domaine, ses conseils judicieux et son soutien permanent m'ont été extrêmement précieux.

Merci enfin à toutes les personnes ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail et qui ont contribué au bon déroulement de ce stage.

Abstract

The problem raised by this work, was to study if it need considering impacts generated by a whole industrial area, and not estimate separately heath effects due to these industrial plants.

An approach to realize this global risk assessment has been carried on, and then it was applied to the Northern industrial area of Limoges, including fours industrial plants. Five cases have be treated by gathering them in two groups. On one hand, the systemic effects: study of a molecule that is released by several industrial plants and the study of several molecules that have the same shock organ. On the other hand, the same cases will be treated for carcinogenic effects, but with an additional case in studying the global carcinogenic risk for inhalation whatever the shock organ.

In a first approach, using overestimated assumptions, four of the five studied cases presented an acceptable risk.

However, the lack of scientific knowledge about the effects generated by an exposure to several chemical compounds is one limit of the methodology used to estimate these risks.

Key-words : Global risk assessment, Industrial area, Health effects, Exposed population, Air pollutants, Inhalation, Iso-QD curve, Iso-ERI curve.

Sommaire

INTRODUCTION.....	1
1 CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE DU MÉMOIRE.....	3
1.1 Contexte réglementaire	3
1.1.1 Contexte réglementaire général.....	3
1.1.2 Contexte réglementaire lié aux ICPE.....	3
1.2 La démarche de l'évaluation des risques sanitaires.....	4
1.2.1 Les 4 étapes de l'ERS.....	4
1.2.2 Les 4 grands principes mis en avant par INERIS	6
1.2.3 Les deux approches successives à adopter.....	6
1.3 Les réflexions déjà menées ou en cours, relatives à la co-exposition à plusieurs substances rejetées par plusieurs installations	6
1.3.1 Principales positions actuelles en France.....	6
A) Position de l'InVS et de l'INERIS	6
B) Positions de l'OPERSEI.....	7
1.3.2 Études initiées sur cette même approche.....	8
2 MISE EN PLACE D'UNE METHODE D'ANALYSE DES RISQUES CUMULES ..	9
2.1 Identification de l'ensemble des émissions sur le secteur d'étude	11
2.1.1 Substances rejetées.....	11
2.1.2 Estimation des flux rejetés	11
2.1.3 Identification des dangers	12
2.1.4 Choix des polluants "traceurs de risque"	14
2.2 Évaluation de l'exposition.....	15
2.2.1 Durée d'exposition	15
2.2.2 Population exposée	15
2.2.3 Modélisation de la dispersion atmosphérique.....	16
2.2.4 Concentrations dans l'environnement.....	17
2.2.5 Voie d'exposition retenue	17
2.2.6 Scénario d'exposition	17
2.3 Caractérisation du risque	18
2.3.1 Polluants à effet de seuil	18
2.3.2 Polluants sans effet de seuil	20
3 APPLICATION À LA ZONE INDUSTRIELLE NORD DE LA VILLE DE LIMOGES	21
3.1 Caractérisation du site et de son environnement.....	21
3.1.1 Domaine d'étude.....	21
3.1.2 Relief.....	22
3.1.3 Conditions météorologiques.....	22
3.2 Identification de l'ensemble des émissions sur le secteur d'étude	23
3.2.1 Synthèse qualitative et quantitative des substances rejetées sur la zone industrielle et identification des dangers liés à ces substances.....	23
A) Substances rejetées par chacune des installations	23
B) Estimation des flux rejetés	24
3.2.2 Identification des dangers	25

3.2.3	Choix des "polluants traceurs de risques".....	26
A)	Molécules agissant avec un effet de seuil.....	26
B)	Molécules agissant sans effet de seuil.....	32
3.3	Évaluation de l'exposition.....	37
3.3.1	Population exposée.....	37
A)	Recensement des populations.....	37
B)	Population sensible.....	37
3.3.2	Concentrations dans l'environnement.....	38
3.3.3	Voie d'exposition étudiée.....	38
3.3.4	Scénario d'exposition.....	38
3.4	Évaluation des risques.....	39
3.4.1	Cas des molécules à effets de seuil : estimation des QD.....	39
A)	Cas n°1 : étude du chrome.....	39
B)	Cas n°2 : étude du système respiratoire.....	41
3.4.2	Cas des molécules sans effets de seuil : estimation des ERI.....	43
A)	Cas n°3 : étude du benzène.....	43
B)	Cas n°4 : étude du système sanguin.....	45
C)	Cas n°5 : étude du risque cancérigène global pour l'inhalation, quel que soit l'organe cible.....	47
3.5	Synthèse de l'étude des risques cumulés.....	49
3.5.1	Synthèse sur l'exemple d'application au niveau de la zone industrielle de Limoges.....	49
3.5.2	Synthèse sur la méthode développée pour l'analyse des risques cumulés.....	51
CONCLUSION.....		55
BIBLIOGRAPHIE.....		57
GLOSSAIRE.....		61
LISTE DES ANNEXES.....		65
Annexe 1 : Description du mode de fonctionnement et de l'historique des installations présentes sur le site de la zone industrielle Nord de la ville de Limoges et faisant l'objet de la présente étude.....		66
Annexe 2 : Force et direction du vent sur le secteur d'étude.....		92
Annexe 3 : Dérivation voie à voie – Estimation des VTR à partir des VLEP.....		93
Annexe 4 : Dénomination des VTR des bases de données toxicologiques utilisées dans le cadre de cette étude.....		95
Annexe 5 : Analyse du potentiel dangereux des éléments émis sur le secteur d'étude.....		97
Annexe 6 : Description du modèle de dispersion atmosphérique utilisé (paramètres et équations utilisés).....		111
Annexe 7 : Résultats de la modélisation pour la zone industrielle Nord.....		119

Liste des sigles utilisés

ACGIH : American Conference of Governmental Industrial Hygienists
AFSSE : Agence Française de Sécurité Sanitaire Environnementale
ARQAL : Agence Régionale pour la Qualité de l'Air en Limousin
ATSDR : Agency for Toxic Substances and Disease Registry
ASTEE : Association Scientifique et Technique de l'Eau et de l'Environnement
BHM : Boues d'Hydroxydes Métalliques
CAREPS : Centre Alpin de Recherche Épidémiologique et de Prévention Sanitaire
CAS : Chemical Abstracts Service
CEDLM : Centrale Énergie Déchets de Limoges Métropole
CETE : Centre d'Études Techniques de l'Équipement
CGE : Compagnie Générale d'Électricité
CGEM : Compagnie Générale d'Électrométallurgie
CGEP : Compagnie Générale d'Électrolyse du Palais
CI : Concentration Inhalée
CIRE : Cellule Interrégionale d'Épidémiologie
COV : Composés Organiques Volatils
CSHPF : Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France
DDASS : Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales
DGS : Direction Générale de la Santé
DIB : Déchets Industriels Banals
DJA : Dose Journalière Absorbée
DJE : Dose Journalière d'Exposition
DJT : Dose Journalière Tolérable
DRASS : Direction Régionale des Affaires Sanitaires et Sociales
DRIRE : Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement
ENSP : École Nationale de la Santé Publique
EQRS : Évaluation Quantitative des Risques Sanitaires
ERS : Évaluation des Risques Sanitaires
ERSEI : Évaluation des Risques Sanitaires dans les Études d'Impact
ERI : Excès de Risque Individuel
ERI_i : Excès de Risque Individuel pour l'inhalation
ERI_o : Excès de Risque Individuel pour l'ingestion
ERC : Excès de Risque Collectif
FCP : Fonderie de Cuivre du Palais
FDA : Food and Drug Administration
FET : Facteur d'Équivalence Toxique
FINESSE : Fichier National des Établissements Sanitaires et Sociaux
HAP : Hydrocarbure Aromatique Polycyclique
IARC : International Agency for Research on Cancer
ICPE : Installation Classée pour la Protection de l'Environnement
ITER : International Toxicity Estimates for Risk
INERIS : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques
INRS : Institut National de Recherche et de Sécurité
INSEE : Institut National de la Statistique et des Études Économiques
InVS : Institut de Veille Sanitaire
I - TEQ : Teneur en Équivalent Toxique (valable pour les dioxines et les furannes)
LAURE : Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Énergie
LIMAIR : Agence de surveillance de l'Air en Limousin
MAK : Maximale ArbeitsplatzKonzentrationen (Concentration maximale sur les lieux de travail)
MRL : Minimal Risk Level
NSF Intl : NSF International

OEHHA : Office of Environmental Health Hazard Assessment
OMS : Organisation Mondiale de la Santé
OPERSEI : Observatoire des Pratiques de l'Évaluation des Risques Sanitaires dans les Études d'Impact
PM : Particule Matter
PNSE : Plan National Santé-Environnement
REL : Reference Exposure Level
RfC : Reference Concentration
RIVM : Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (National Institute of Public Health and the Environment)
SPPPI : Secrétariat Permanent pour la Prévention des Pollutions Industrielles
TCA : Tolerable Concentration in Air
TDI : Tolerable Daily Intake
TLV : Threshold Limit Value
TWA : Time Weighted Average
TCE : Trichloréthylène
UIOM : Usine d'Incinération d'Ordures Ménagères
U.S. EPA : United States - Environmental Protection Agency
VLEP : Valeur Limite d'Exposition Professionnelle
VME : Valeur Moyenne d'Exposition
VTR : Valeur Toxicologique de Référence
ZI : Zone Industrielle

Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison des concentrations estimées par le modèle utilisé pour cette étude et celles du modèle de l'ERSEI de la CEDLM.....	16
Tableau 2: Sources bibliographiques utilisées pour l'identification de l'ensemble des émissions sur le secteur d'étude.....	23
Tableau 3 : Récapitulatif des substances rejetées par les différentes activités de la zone industrielle.....	24
Tableau 4 : Tableau de sélection des "polluants traceurs de risques" pour les molécules agissant avec un effet de seuil et pour l'inhalation	27
Tableau 5 : Nombre de molécules étudiées pour le système respiratoire	31
Tableau 6 : Tableau de sélection des "polluants traceurs de risques" pour les molécules agissant sans effet de seuil et pour l'inhalation	33
Tableau 7 : Nombre de système-cibles touchés par les principales molécules agissant sans effet de seuil.....	36
Tableau 8 : Recensement de la population générale sur le site d'étude	37
Tableau 9 : Crèches et haltes-garderie dans le secteur d'étude	37
Tableau 10 : Répartition des écoles maternelles et primaires sur le secteur d'étude.....	38
Tableau 11 : QD maxima observés pour les 4 installations concernant le 1er cas d'étude (chrome).....	39
Tableau 12 : QD maxima observés pour les 4 installations concernant le 2ème cas d'étude (système respiratoire).....	41
Tableau 13 : ERI maxima observés pour les 4 installations concernant le 3ème cas d'étude (benzène).....	43
Tableau 14 : ERI maxima observés pour les 4 installations concernant le 4ème cas d'étude (système sanguin)	45
Tableau 15 : ERI maxima observés pour les 4 installations concernant le 5ème cas d'étude (risque cancérigène global pour l'inhalation)	47
Tableau 16: Substances émises par la CEDLM.....	69
Tableau 17 : Flux de polluants émis par la CEDLM durant la première période de fonctionnement.....	71
Tableau 18 : Flux de polluants émis par la CEDLM durant la deuxième période de fonctionnement.....	72
Tableau 19 : Flux de polluants émis par la CEDLM durant la troisième période de fonctionnement.....	72
Tableau 20 : Substances émises par FCP	76
Tableau 21 : Flux de polluants émis par FCP durant la première période de fonctionnement.....	77
Tableau 22 : Flux de polluants émis par FCP durant la deuxième période de fonctionnement.....	78
Tableau 23 : Substances émises par VALDI LE PALAIS	82
Tableau 24 : Flux de polluants émis par VALDI LE PALAIS durant la période de fonctionnement à partir de 1999	83
Tableau 25 : Substances émises par VALEO.....	87
Tableau 26 : Flux de polluants émis par VALEO durant la première période de fonctionnement.....	87
Tableau 27 : Flux de polluants émis par VALEO durant la deuxième période de fonctionnement.....	88
Tableau 28 : Substances émises par les véhicules circulant sur l'A 20	91
Tableau 29 : Flux de polluants émis par les véhicules circulant sur l'A20	91

Liste des figures

Figure 1 : Synoptique de la démarche suivie	10
Figure 2 : Démarche adoptée pour le choix des VTR	13
Figure 3 : Synoptique pour le calcul d'un QD global pour le cas n°1.....	18
Figure 4 : Synoptique pour le calcul d'un QD global pour le cas n°2.....	20
Figure 5 : Zone d'étude	21
Figure 6 : Rose des vents générale de la station Météo-France de Limoges.....	22
Figure 7 : Courbes d'Iso-Quotient de Danger pour le chrome – Zone industrielle Nord de la ville de Limoges	40
Figure 8 : Courbes d'Iso-Quotient de Danger pour le système respiratoire – Zone industrielle Nord de la ville de Limoges	42
Figure 9 : Courbes d'Iso-Excès de Risque Individuel pour le benzène – Zone industrielle Nord de la ville de Limoges	44
Figure 10 : Courbes d'Iso-Excès de Risque Individuel pour le système sanguin – Zone industrielle Nord de la ville de Limoges	46
Figure 11 : Courbes d'Iso-Excès de Risque Individuel pour le risque cancérigène global – Zone industrielle Nord de la ville de Limoges	48
Figure 12 : Paramètres à entrer dans le modèle de dispersion atmosphérique.....	118
Figure 13 : Concentrations calculées via le modèle entre 100 m et 2 000 m par rapport à la source, entre 20° et 360°	118

INTRODUCTION

Les zones industrielles en France ne cessent de se développer, de se modifier et de s'étendre. Elles voient donc croître le nombre d'Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE). Cependant, en parallèle avec ce développement, une prise de conscience évidente s'est opérée ces dernières années concernant la protection de la santé humaine et celle des milieux naturels.

La population s'interroge sur les conséquences à plus ou moins long terme de la présence d'activités polluantes dans son environnement, d'autant plus que la politique d'urbanisme actuelle a tendance à prôner une mixité industrielle et résidentielle.

Actuellement, elles génèrent des rejets, notamment atmosphériques qui, en se dispersant dans l'environnement, retombent sur différents milieux (sol, eaux superficielles, végétaux, etc...), pouvant ainsi engendrer leur contamination. À cause de mécanismes d'infiltration, de ruissellement, et avec en plus, la possible rémanence des substances, ces polluants peuvent alors gagner les sols en profondeur, voire les nappes d'eaux souterraines. Ils peuvent également contaminer et se concentrer dans les produits d'origine animale (viande, lait, ...) et les végétaux, ces deux pouvant appartenir à la chaîne alimentaire. Il existe donc un risque de bio-accumulation de ces polluants.

À partir de 1976, une Étude d'Impact (EI) est exigée du pétitionnaire, notamment lors d'une demande d'autorisation d'exploiter. Son objectif est de fournir des éléments pour étayer la décision d'autorisation. Les effets éventuels du projet sur la santé doivent également être considérés : ils représentent même un des points clés via l'établissement des ERSEI (Évaluation des Risques Sanitaires dans les Études d'Impact).

En théorie, ce dossier doit prendre en compte le "point zéro" du site, c'est-à-dire l'impact sanitaire qu'il génère avant même que l'activité visée n'ait débutée. Cette étude du bruit de fond n'est que très rarement faite. En effet, ces ERSEI ne prennent en compte généralement que l'impact généré par une seule installation à la fois sur l'environnement et la santé, indépendamment de la présence possible d'autres installations sur ce même site. Une problématique nouvelle suscite des interrogations au niveau des zones industrielles où sont présentes plusieurs ICPE : l'impact global de l'ensemble des activités est totalement inconnu, puisque, actuellement, seul l'impact des installations prises au cas par cas est considéré.

En effet, si les Évaluations des Risques Sanitaires (ERS) de chacune des installations prises séparément démontrent que les Quotients de Danger (QD) ou encore que les Excès de Risque Individuel (ERI) sont inférieurs aux valeurs repères communément acceptées, ceci n'est peut-être plus forcément vrai si l'on s'intéresse à l'impact global engendré par toutes les installations présentes sur le site... A l'heure actuelle, peu d'études tentent de globaliser l'ensemble des rejets atmosphériques occasionnés par la présence de plusieurs installations sur un même secteur, dans le but d'estimer un risque global pour la santé humaine.

Dans le cadre de ce mémoire, après une présentation générale de l'évaluation des risques sanitaires, une réflexion sera portée sur la faisabilité de la mise en place d'une méthode permettant d'évaluer les risques et impacts globaux encourus pour la population exposée. Cette méthode sera alors appliquée au niveau de la zone industrielle Nord de la ville de Limoges – site choisi par la DDASS (Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales) de la Haute-Vienne, en raison de la présence de plusieurs activités polluantes à proximité de zones résidentielles – Ceci permettra d'avoir les premières conclusions quant à l'applicabilité d'une telle méthode.

1 CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE DU MÉMOIRE

1.1 Contexte réglementaire

1.1.1 Contexte réglementaire général

En France, la *loi n°76-629 du 10 juillet 1976, loi générale sur la protection de la nature et de l'environnement* [18] prévoit la réalisation d'études d'impact sur l'environnement pour les projets d'aménagement. L'article 2 présente le contenu de l'EI :

- Une analyse de l'état initial du site et de son environnement ;
- L'étude des modifications que le projet y engendrerait, les mesures envisagées pour supprimer, réduire et, si possible, compenser les conséquences dommageables pour l'environnement.

Le décret n°77-1141 du 12 octobre 1977 fut pris pour application de l'article 2 de la *loi du 10 juillet 1976*. Il a ensuite été modifié par le décret n°96-245 du 25 février 1993 relatif aux études d'impact et au champ d'application des enquêtes publiques, et par le décret n°2003-767 du 1^{er} août 2003.

La *loi n°96-1236 du 30 décembre 1996 sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (LAURE)* [20], et notamment l'article n°19, rajoute les notions de santé publique à la *loi du 10 juillet 1976*. Plus précisément, au septième alinéa de l'article 2, le mot "engendrerait" est désormais suivi par "l'étude de ses effets sur la santé", de même qu'après l'expression "dommage pour l'environnement", les mots "et la santé" sont rajoutés.

C'est à dire que depuis le 1^{er} août 1997, en plus de l'étude d'impact sur l'environnement qu'il fallait classiquement effectuer, il y a obligation de réaliser une Évaluation Quantitative des Risques Sanitaires (EQRS) des projets d'installations, ouvrages, travaux et aménagements soumis à EI : route, usine, station d'épuration, etc...

Les infrastructures de transport doivent donc prendre en compte les effets sur la santé des populations, comme le précise le Plan National Santé Environnement (PNSE) à travers l'action n°6 : "Mieux prendre en compte l'impact sur la santé dans les projets de création d'infrastructure de transport" [21]. La circulaire interministérielle n°DGS/SD7B/2005/273 du 25 février 2005 [10] propose quant à elle une note méthodologique sur l'évaluation des effets sur la santé de la pollution de l'air dans les études d'impact routières.

1.1.2 Contexte réglementaire lié aux ICPE

La *loi n°76-663 du 19 juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement* [19] et son décret d'application n°77-1133 du 21 septembre 1977, modifié par le décret n° 2000-258 du 20 mars 2000 s'applique plus spécifiquement pour les activités et installations à caractère industriel.

Bien que la *LAURE* renvoie à la *loi du 10 juillet 1976*, l'ensemble des acteurs a admis que par extension, l'utilisation de l'EQRS pour répondre à la problématique des effets sur la santé humaine peut également être adoptée à la *loi du 19 juillet 1976* sur les ICPE, et ce, depuis quelques années.

1.2 La démarche de l'évaluation des risques sanitaires

La démarche d'Évaluation des Risques Sanitaires date du début des années 1980, et vient de l'Académie des Sciences Américaines.

Les éléments proviennent de la méthode de l'United States - Environmental Protection Agency (US-EPA), et sont repris dans le guide d'évaluation des risques sanitaires dans les études d'impact des ICPE pour les substances chimiques rédigé par l'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS) [14]. Celui-ci propose d'ailleurs la définition suivante de l'ERS :

"L'évaluation des risques sanitaires doit être comprise comme une démarche visant à structurer les éléments de connaissances, tout en les assortissant des incertitudes correspondantes. Elle a pour but de présenter aux différentes parties, et de manière explicite, les éléments d'analyse sur lesquels la prise de décision pourra s'appuyer. L'évaluation des risques pour la santé est donc un outil d'analyse au service des gestionnaires du risque".

1.2.1 Les 4 étapes de l'ERS

La démarche comporte quatre grandes étapes :

1. Identification des dangers : elle permet de connaître l'effet sanitaire néfaste (infectieux, cancérigène, toxique, etc ...) qui est engendré par le ou les agent(s), et ce, pour la voie d'exposition considérée ;
2. Relation Dose-Réponse : elle estime la relation entre la dose ou le niveau d'exposition aux composés, et l'incidence et la gravité de ces effets. C'est à dire que le but de cette étape est d'avoir une relation quantitative entre dose et effet, afin de déterminer des Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR) des substances. Deux grands groupes de molécules différentes existent :
 - *Les molécules agissant avec effet de seuil* (effets déterministes) : la gravité de l'effet augmente avec l'exposition ou la dose reçue. Dans ce cas là, il existe un seuil en dessous duquel il n'y a aucun risque ;
 - Quant aux *molécules agissant sans effet de seuil* (effets probabilistes ou stochastiques) : la probabilité de survenue d'un effet augmente avec l'exposition. Autrement dit, plus on est exposé, et plus le risque de survenue de l'effet est important, même si le fait d'être exposé ne va pas forcément l'induire. Enfin, la gravité de l'effet (un cancer) sera la même, quelle que soit l'intensité de l'exposition. Il faut alors trouver le risque correspondant à la dose, avec la difficulté qu'est le passage des fortes doses d'exposition aux faibles doses.
3. Évaluation de l'exposition : dans un premier temps, il faut répertorier de manière qualitative plusieurs paramètres (sources d'émission, zone impactée, population concernée, voies et durées d'exposition, etc...) pour pouvoir ensuite quantifier l'exposition : calcul de la Dose Journalière d'Exposition (DJE), de la Concentration moyenne Inhalée (CI) ;
4. Caractérisation du risque : cette dernière étape permet d'estimer le risque attendu pour la population exposée. En fonction du type de molécules, deux estimations de risques différentes sont à envisager :

* *Estimation du risque pour les effets à seuil :*

Comme l'expression déterministe de la survenue d'un effet toxique dépend du dépassement d'une valeur, le risque sera donc exprimé par le rapport entre la concentration d'exposition et la VTR, ce qui revient à une approximation linéaire de la fonction dose-réponse à partir de la valeur seuil :

$$\boxed{QD = \frac{CI}{VTR}} \quad \text{ou} \quad \boxed{QD = \frac{DJE}{VTR}}$$

Avec :

- CI : Concentration inhalée (mg.m^{-3}) ;
- DJE : Dose Journalière d'Exposition (mg/kg/j) ;
- VTR : Valeur Toxicologique de Référence (mg.m^{-3} ou mg/kg/j).

Lorsque ce ratio est inférieur à 1, il est admis que la survenue d'un effet toxique apparaît peu probable. Cependant, le résultat exprimé donne une notion de sur-exposition, mais pas une quantification réelle du risque. Un QD de 2 signifie que la population est deux fois plus exposée à un polluant donné que si le QD était égal à 1, mais le QD ne donne pas d'informations sur le risque : ce n'est pas parce que l'on a un QD égal à 2 que l'on a 2 fois plus de chance de développer la maladie.

* *Estimation du risque pour les effets sans seuil :*

Pour ce genre de molécules, principalement les substances cancérigènes, un Excès de Risque Individuel (ERI) est calculé en multipliant la CI par l'Excès de Risque Unitaire par inhalation (ERU_i), ou bien en multipliant la DJE par l'Excès de Risque Unitaire par voie orale (ERU_o) :

$$\boxed{ERI = CI \times \text{ERU}_i} \quad \text{ou} \quad \boxed{ERI = DJE \times \text{ERU}_o}$$

L'ERU est en $(\text{mg.m}^{-3})^{-1}$, de ce fait, l'ERI est sans unité. L'ERI correspond à la probabilité de survenue d'un danger, au cours de la vie entière d'un individu, liée à une exposition à un agent cancérigène. Les ERI estimés lors de cette étude seront comparés à la valeur seuil fixée par l'US-EPA qui prend en considération le risque repère de 10^{-6} pour le risque collectif touchant l'ensemble d'une population. La valeur communément admise comme **risque acceptable** est une valeur d'ERI **inférieure à 10^{-6}** pour les substances chimiques.

Historiquement, cette valeur est le résultat d'un choix retenu aux États-Unis. Mais l'origine du choix de cette valeur reste cependant assez floue. Notamment, en France, il n'existe pas de valeurs qui aient fait l'objet d'un consensus explicite, et aucun des organismes officiels (Ministères, Agences...) ne connaît le fondement du choix de ce repère. Au départ, la publication de Mantel et Bryan en 1961 avait pour but de déterminer la fixation d'une dose virtuellement sûre pour laquelle l'innocuité de l'agent dangereux pouvait être admise. Ces auteurs avaient choisi arbitrairement la valeur de 10^{-8} pour estimer le niveau de risque en dessous duquel cette dose serait considérée comme virtuellement sûre. Puis, au début des années 1980, la valeur de 10^{-6} a été instaurée par la Food and Drug Administration (FDA) comme étant un risque négligeable, ce qui ne veut pas dire un niveau de risque acceptable. Cependant, dans la pratique, ce niveau a été alors interprété comme étant un niveau de risque maximum acceptable. Sachant que le risque de développer un cancer dû à des déterminants environnementaux est estimé par des auteurs américains entre 10^{-3} et 10^{-2} , cette valeur de 10^{-6} choisie est donc 1 000 à 10 000 fois inférieure à cette estimation [32].

Cette dernière étape de l'ERS permet également d'analyser le résultat trouvé, notamment par le biais de l'analyse des incertitudes qui lui sont liées.

1.2.2 Les 4 grands principes mis en avant par INERIS

1. **Le principe de spécificité** : il s'agit de la pertinence de l'étude par rapport à l'usage et aux caractéristiques propres du site, de son environnement, de la source de pollution et des populations potentiellement exposées ;
2. **Le principe de prudence scientifique** : si aucune donnée reconnue n'est disponible, il s'agira de prendre comme hypothèse, des données raisonnablement majorantes pour poursuivre l'étude ;
3. **Le principe de proportionnalité** : il correspond à la cohérence qu'il y a entre le degré d'approfondissement de l'étude et l'importance des incidences prévisibles de la pollution ;
4. **Le principe de transparence** : se traduit par les cohérences et les explications des choix pris par l'évaluateur, de manière à ce que la logique du raisonnement puisse être suivie et discutée par les différentes parties intéressées.

1.2.3 Les deux approches successives à adopter

Dans le guide méthodologique de l'INERIS, deux approches sont suggérées lors d'une réalisation d'une ERS :

- Dans un premier niveau d'approche, des hypothèses qualitatives et quantitatives raisonnablement **majorantes** seront prises en considération pour estimer le risque ;
- Puis, dans un deuxième temps, si les comparaisons des valeurs de risques obtenues sont supérieures aux valeurs repères de risques, **risque apprécié n'est pas acceptable**, l'évaluation des risques sera révisée, en approfondissant certains points : d'autres hypothèses beaucoup plus **réalistes** seront à considérer, ainsi que l'acquisition de **données complémentaires**, ou encore un **affinage des scénarios** retenus précédemment.

1.3 Les réflexions déjà menées ou en cours, relatives à la co-exposition à plusieurs substances rejetées par plusieurs installations

Des réflexions sont menées actuellement sur la prise en compte des impacts engendrés par la présence de plusieurs molécules sur un même site. Des positions communes de différentes institutions commencent également à émerger.

1.3.1 Principales positions actuelles en France

A) Position de l'InVS et de l'INERIS

Lors de l'exposition conjointe à plusieurs polluants, l'Institut de Veille Sanitaire (InVS) en 2000 [16], repris par l'INERIS en 2003 [14], recommande, pour évaluer le risque sanitaire global, de sommer les risques de la façon suivante :

- **Pour les polluants à effet de seuil** : la somme doit être réalisée pour ceux dont la toxicité est identique en terme de mécanismes d'action et d'organe cible ;
- **Pour les polluants sans effet de seuil** : la somme de tous les ERI doit être réalisée, quel que soit le type de cancer et l'organe touché, de façon à apprécier le risque global. L'INERIS précise même qu'il est possible d'effectuer :

- Pour chaque substance, la somme des ERI dus au site et liés aux différentes voies d'exposition qui concernent l'individu ou la sous-population du scénario considéré ;
- La somme des ERI dus au site et liés aux différentes substances cancérigènes ;
- La somme des ERI dus au site et liés aux différentes durées d'exposition.

B) Positions de l'OPERSEI

Des réflexions ont été menées sur le risque global d'un mélange de substances. L'Observatoire des Pratiques de l'Évaluation des Risques Sanitaires dans les Études d'Impact (OPERSEI) apporte des éléments de réponse [32]. Ces dernières étant validées par le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France (CHSPF) concernant cette thématique : à l'heure actuelle, cette problématique de l'exposition à un cocktail de molécules est une limite méthodologique de l'ERS. L'exposition à un mélange de composés peut conduire à un effet global différent de celui qui serait engendré en ne considérant que les substances prises individuellement. Il peut y avoir :

- synergisme : l'effet global est supérieur à la somme des effets des substances prises individuellement ;
- antagonisme : l'effet global est inférieur ;
- additivité : les molécules dangereuses ont des effets identiques qui s'additionnent entre eux ;
- indépendance : les effets toxiques – probablement indépendants entre eux – se juxtaposent sans interférence.

Peu d'études prennent en compte l'interaction de la présence d'un mélange de substances. Il est donc difficile, voire impossible de transposer les conclusions de ces études à un autre mélange de substances différent de celui de l'étude (de par ses proportions et/ou ses constituants). Il est important de rajouter que la composition du mélange à étudier est celui au point d'exposition humaine et non à la source de pollution. De ce fait, il n'existe pas de modèles de méthode aboutis qui prennent en compte les effets des mélanges.

Cependant, au niveau de l'additivité des risques, certaines hypothèses peuvent être faites, en l'absence de plus amples connaissances, comme par exemple d'admettre une absence d'interaction entre les effets des différentes molécules en présence.

De plus, deux niveaux de distinction peuvent être établis concernant l'additivité des risques pour les effets avec seuil, de ceux sans seuil.

- Effets avec seuil : l'US-EPA admet d'additionner les QD pour les substances ayant le même mode d'action et le même organe cible. Cependant, la connaissance des mécanismes d'action est encore peu développée à ce jour. De plus, il est précisé que les effets de deux molécules peuvent avoir une intensité différente : les effets secondaires de l'une des deux substances peuvent correspondre à l'effet le plus sensible de l'autre ;
- Effets sans seuil : l'US-EPA considère que tous les excès de risque de cancer peuvent être associés entre eux, quel que soit l'organe cible et la voie d'exposition. Cela permet d'estimer un excès de risque global pour la population, dans la situation considérée.

Cette réponse de l'OPERSEI présente la position commune sur ce sujet de l'InVS, l'INERIS, l'Agence Française de Sécurité Sanitaire Environnementale (AFSSE), l'École Nationale de la Santé Publique (ENSP), et différents ministères (Santé, Environnement, Équipement et Travail).

1.3.2 Études initiées sur cette même approche

Par ailleurs, des études ont été réalisées très récemment sur cette thématique, ou sont encore en cours de réalisation. Plus précisément, elles portent sur l'étude des conséquences engendrées sur la santé humaine, par la présence sur un même endroit de plusieurs installations rejetant plusieurs polluants. Pour réaliser une revue des études existantes sur la problématique des multi-rejets, des contacts avec des DDASS, avec les Directions Régionales de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement (DRIRE) ou avec des Cellules Interrégionales d'Épidémiologie (CIRE) ayant abordé ce sujet ont été établis, montrant une prise en compte naissante de la nécessité d'étudier le risque global engendré par la présence de plusieurs installations.

Plusieurs départements se sont penchés sur cette thématique, mais les études n'en sont pas toutes au même stade :

- La DDASS des Pyrénées-Atlantiques (64) a réalisé un appel d'offre pour une étude visant à évaluer les risques sanitaires chroniques encourus par les populations exposées aux rejets atmosphériques actuels de la zone industrielle de Lacq. Cette étude est donc actuellement en cours ;
- La DDASS des Bouches-du-Rhône (13) réalise actuellement une évaluation globale des risques sur le site de Lavéra qui réunit de nombreuses activités industrielles ;
- La DDASS de Seine-Maritime (76) va engager une procédure d'appel d'offre pour la réalisation de l'étude d'évaluation des risques sanitaires sur la zone industrielle de Port-Jérôme ;
- Le département de la Moselle a fait réaliser une étude sur la dispersion atmosphérique et l'évaluation des risques sanitaires du bassin de Carling. Celle-ci vient d'être tout récemment terminée, mais doit encore être expertisée notamment par la CIRE de Nancy ;
- Enfin, le département du Nord-Pas-de-Calais a réalisé et terminé une évaluation des risques sanitaires liés aux émissions atmosphériques industrielles de la zone industrielle de Dunkerque en 2005 [2].

2 MISE EN PLACE D'UNE METHODE D'ANALYSE DES RISQUES CUMULES

La partie qui va être développée dans cette section tente de proposer une méthode permettant d'estimer le risque global. Elle suit la méthodologie classique d'une évaluation des risques sanitaires, mais subit cependant quelques modifications nécessaires afin de pouvoir intégrer la co-exposition à différents polluants émis par plusieurs installations.

Il est nécessaire d'exposer les limites du cadre dans lequel a été réalisée cette étude, avant de présenter plus en détails la démarche qui a été suivie :

- La première approche adoptée ici sera une **approche majorante**. Si les résultats indiquent une absence de risque malgré toutes les hypothèses pénalisantes prises, cela voudra donc dire que les risques encourus dans la réalité seront, au pire, égaux à ceux trouvés dans cette première approche. En revanche, dans le cas contraire, il faudra réitérer l'étude en prenant des hypothèses plus proches de la réalité. Cela afin de discerner si le risque "inacceptable" trouvé, résulte d'hypothèses trop majorantes prises au départ et/ou de l'existence avérée d'un risque pour la population ;
- Il convient également de noter que dans cette étude, seuls seront considérés les **rejets atmosphériques**, les rejets aqueux n'étant pas traités ;
- De plus, le temps imparti pour réaliser ce mémoire n'a permis que de traiter les risques générés par une exposition via **l'inhalation** ;
- Enfin, une réflexion a été menée quant à la façon de prendre en compte **l'historique du site et de ses activités**.

La figure 1 présente la démarche qui a été suivie au cours de cette étude.

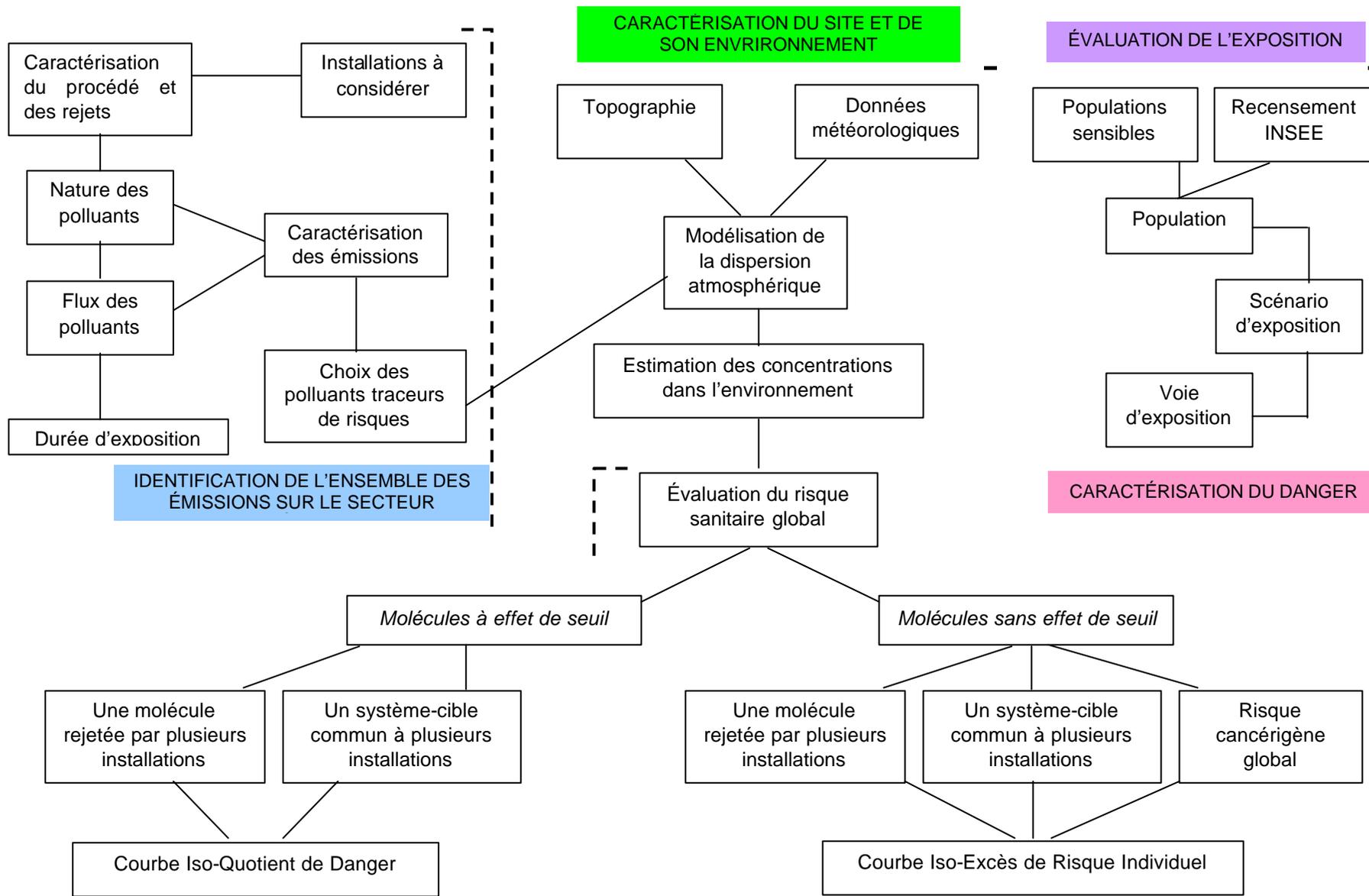


Figure 1 : Synoptique de la démarche suivie

2.1 Identification de l'ensemble des émissions sur le secteur d'étude

2.1.1 Substances rejetées

Pour chacune des installations ou activités appartenant au secteur d'étude, un inventaire – dans un premier temps qualitatif –, aussi exhaustif que possible des substances rejetées doit être conçu. Pour cela, connaître le process, les entrants ou encore l'historique du site peut se révéler extrêmement pertinent. Il doit être le plus complet et le plus précis possible : il est judicieux de faire la distinction entre les différentes formes chimiques des composés, notamment quand la toxicité varie d'une substance à une autre, au sein d'une même famille. C'est le cas par exemple, des Composés Organiques Volatils (COV) ou bien les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), où il peut être intéressant de connaître pour ces familles, la répartition des différentes formes de molécules la constituant. Il peut être également utile de connaître la spéciation des éléments traces métalliques (principalement le chrome), dont la toxicité est plus ou moins importante suivant le degré d'oxydation de l'élément.

2.1.2 Estimation des flux rejetés

Pour chacune des activités, une recherche des flux de polluants émis est systématiquement effectuée.

Remarque : certaines hypothèses doivent être émises du fait du manque d'informations dans les dossiers ou d'une certaine hétérogénéité :

- Lorsqu'il n'y avait qu'une mesure de flux réalisée pour les familles de composés (COV, HAP en particulier) sans distinction des différentes substances, la totalité du flux mesuré est attribuée à la forme la plus toxique (benzène dans le cas des COV), ce qui correspond à une approche la plus pénalisante pour l'installation (voire excessivement pénalisante, même si c'est la seule solution) ;
- Dans certains dossiers, la spéciation des composés est quelquefois fournie (différenciation par exemple entre chrome III et chrome VI), mais ce n'est pas toujours le cas. Pour pallier ce manque de données, le flux estimé est entièrement attribué à la forme la plus toxique de la spéciation du composé. Dans l'exemple du chrome, il sera sous la forme de chrome VI (bien que ce soit sans commune mesure avec la réalité), forme la plus toxique dans la spéciation de ce composé.

Dans le temps, les process évoluent, les capacités de fonctionnement aussi, engendrant donc des variations dans les flux rejetés. Pour estimer les impacts sanitaires passés, présents et ceux à venir, un découpage dans le temps doit être effectué pour chacune des installations, avec une période de temps la plus fine possible, permettant d'avoir une bonne représentativité des flux émis.

La principale difficulté dans cette partie réside dans le fait que les données concernant les flux ne sont pas toujours complètes, et ce pour les raisons suivantes :

- Les mesures qui sont disponibles dans les études d'impact, dans les rapports d'auto-surveillance portent généralement sur des paramètres dont la mesure est exigée par la réglementation. Ces substances ne sont pas forcément les plus toxiques. D'autres peuvent l'être encore plus, mais si elles ne sont pas réglementées, alors aucune mesure n'est disponible ;
- Certaines mesures ne sont pas ou ne peuvent pas non plus être en notre possession, notamment lorsque l'installation fonctionne depuis de nombreuses années (début du siècle par exemple), toutes les mesures n'étant pas systématiquement réalisées ou archivées.

2.1.3 Identification des dangers

- **Bases de données consultées**

L'étude de la toxicité pour l'homme des substances rejetées sur le site est déterminée à l'aide des bases de données épidémiologiques et toxicologiques de référence (les différents sites Internet ont été consultés courant juin 2005) :

- La base de données International Toxicity Estimates for Risk (**ITER**) [30], regroupant des données toxicologiques et épidémiologiques de différentes bases de données scientifiquement reconnues, dont :

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (**ATSDR**) ;
- **Health Canada** ;
- International Agency for Research on Cancer (**IARC**) ;
- NSF International (**NSF Intl**) ;
- National Institute of Public Health and the Environment, the Netherlands (**RIVM**) ;
- **US-EPA**

- Fiches toxicologiques de l'Institut National de Recherche et de Sécurité (**INRS**) [28] ;

- Fiches toxicologiques de **l'INERIS** [27] ;

- Fiches toxicologiques de l'Office of Environmental Health Hazard Assessment (**OEHHA**) [33] ;

- Données de l'Organisation Mondiale de la Santé (**OMS**) [24].

Les différentes dénominations des VTR correspondant à ces bases de données sont référencées en Annexe 4.

- **Sélection des dangers**

Les effets faisant l'unanimité auprès des équipes de recherche seront systématiquement sélectionnés. Cependant, dans le souci de se situer sur des hypothèses majorantes, les effets qui font, à ce jour, l'objet d'un consensus seront également retenus : des études ont pu observer des effets que pouvait entraîner une substance sur la santé humaine, même si d'autres études n'ont rien pu démontrer. Mais en l'état actuel des connaissances scientifiques et techniques, une certaine prudence entraîne tout de même la considération de ces effets pour l'analyse du potentiel dangereux des éléments.

De plus, à chaque fois que cela sera possible, une distinction entre système cible, organe cible, et pathologie(s) associée(s) sera effectuée.

- **Choix des VTR**

- ✓ Lorsqu'une ou plusieurs VTR existe(nt)

Le choix des VTR dépend de certains critères de sélection. Ces critères, notamment repris dans un document de l'InVS sur les VTR [17], sont les suivants :

1. Préférence des données humaines sur les données animales ;
2. Adéquation entre les durées et les voies d'exposition des protocoles expérimentaux et celles de la population ;
3. Notoriété de l'organisme producteur ;
4. Mise à jour récente de la VTR ;
5. Transparence des résultats.

Ils permettent de pouvoir sélectionner les VTR qui seront utilisées dans la suite de l'étude, notamment lorsque plusieurs VTR existent pour une même molécule, un même effet et une même voie d'exposition.

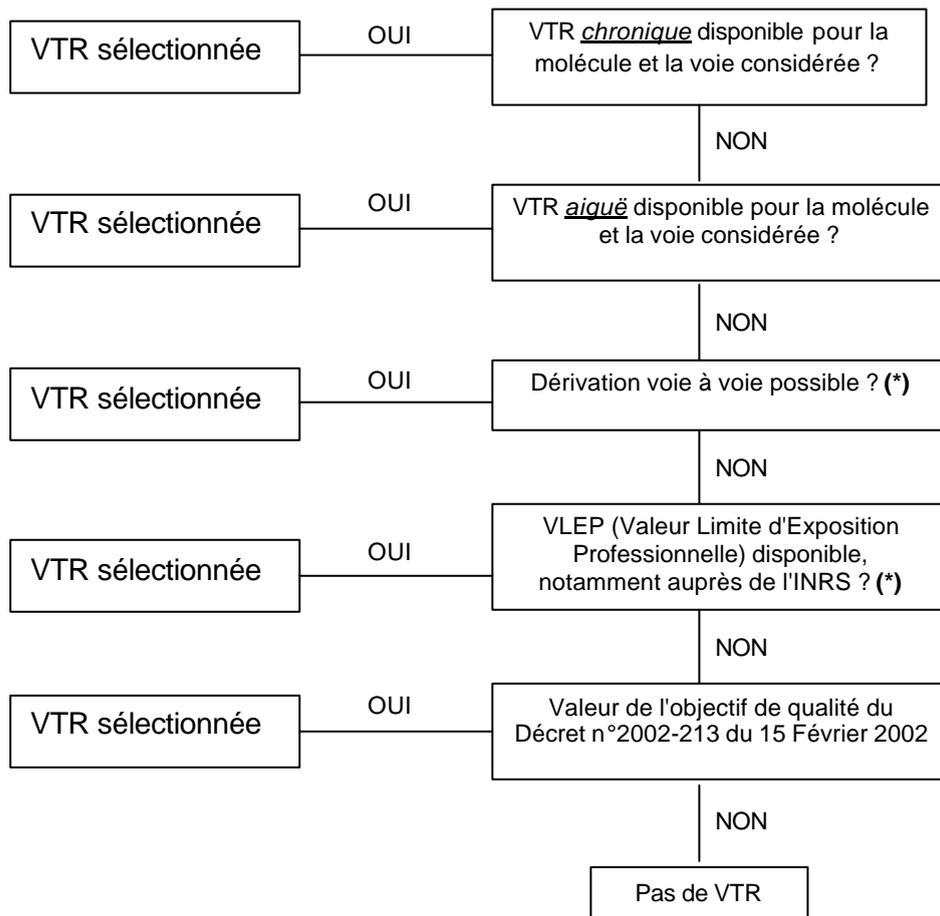
Dans ce cas, la VTR la plus conservatrice pour la santé humaine est retenue.

- ✓ Lorsque aucune VTR existe ou bien lorsqu'elle n'est pas totalement en adéquation avec le cas d'étude (voie d'exposition et/ou durée différentes, ...)

Lorsque la VTR n'est pas disponible pour une molécule, une voie d'exposition ou encore une durée adéquate, il existe plusieurs possibilités pour pallier ce manque d'informations. Dans un souci de cohérence, elles sont hiérarchisées, afin d'avoir le même raisonnement pour chacune des substances en présence.

L'objectif étant de voir s'il était possible de calculer un niveau de risque lorsque plusieurs installations sont présentes sur un même site, compte tenu des données disponibles, et de l'absence de certaines VTR, la figure 2 présente la démarche qui a été utilisée pour l'inhalation (hiérarchisation dans le choix des VTR).

Il est à préciser, qu'à défaut d'avoir trouvé systématiquement une VTR touchant le système cible souhaité, l'approximation ici faite sera de prendre pour une molécule donnée, la VTR qui a pu être déterminée pour un autre organe cible (à défaut d'en posséder une pour l'organe cible à étudier), afin de posséder tout de même une valeur permettant de continuer à dérouler la démarche de l'analyse des risques cumulés.



(*) Les formules utilisées pour réaliser les dérivations voie à voie et les estimations de VTR à partir des VLEP, sont données dans le guide de l'INERIS [14]. Elles sont reprises en Annexe 3.

Figure 2 : Démarche adoptée pour le choix des VTR

2.1.4 Choix des polluants "traceurs de risque"

Pour des raisons pratiques, l'évaluateur sera souvent amené à faire un choix des substances qu'il intégrera dans l'évaluation et qu'il considèrera comme déterminants essentiels du risque. Ceci est indiqué dans le cadre de l'élaboration d'une ERS classique. Ce choix est d'autant plus vrai lorsqu'il s'agit des risques liés à la co-exposition à un mélange de substances. Car plus on multiplie le nombre d'installations présentes à un endroit donné, plus le nombre de substances émises risque de s'accroître également. Or si l'étude porte sur les risques cumulés, plus il y a de molécules présentes, plus le nombre de combinaisons entre elles devient très vite important, et donc plus complexe sera l'évaluation.

Tous les cas ne peuvent donc être envisagés. Cinq seront traités pour réaliser l'évaluation des risques cumulés à travers l'illustration de la méthode au niveau de la ZI Nord de Limoges.

Une différence de méthodologie avec le guide de l'INERIS [14] est qu'ici, l'étude de danger se fait avant de sélectionner les polluants "traceurs de risque", pour avoir justement la connaissance de l'importance des effets engendrés par l'exposition à cette substance. Les effets engendrés correspondent au deuxième critère de sélection à prendre en compte sur les trois qui existent lors du choix des polluants "traceurs de risque" (démarche donnée au paragraphe suivant).

♣ Substances avec effets de seuil

▪ Démarche du choix des polluants "traceurs de risque"

Dans cette catégorie de substances, plusieurs paramètres vont entrer en compte pour aiguiller le choix des composés afin de réaliser l'étude à proprement parler. Il s'agit de trois paramètres estimés pour chacune des 35 molécules :

- ✓ Le facteur principal quant à la sélection des molécules, sera l'établissement d'un ratio qui va permettre d'orienter le choix. Le ratio est le suivant :

$$\text{Ratio} = \frac{\text{Flux}_{\max}}{\text{VTR}}$$

Avec :

- **Flux_{max}** = correspond au flux maximum (t.an⁻¹) de la molécule rejetée sur le site à compter de 1975. Pour cela, il sera effectué la somme du flux de cette molécule pour chacune des installations et ce, année par année. Ensuite, le flux maximum sur les 30 ans sera sélectionné pour cette molécule, ceci permettant de se situer dans une approche extrêmement majorante de la situation ;
- **VTR** : Valeur Toxicologique de Référence sélectionnée (mg.m⁻³).

Plus le flux est important (numérateur) et la VTR faible (dénominateur), plus le ratio sera élevé. Donc les molécules qui seront sélectionnées présenteront un ratio élevé ;

- ✓ Le nombre d'installations rejetant la molécule. Plus ce nombre est grand, et plus il orientera le choix vers cette molécule ;
- ✓ Enfin vient l'importance et la gravité des effets engendrés par l'exposition à cette molécule (étude de danger).

- Cas envisagés
 - ✓ **Cas n°1** : une même molécule à effet de seuil pouvant être rejetée par une ou plusieurs installation(s) ;
 - ✓ **Cas n°2** : plusieurs molécules à effet de seuil ayant le même organe cible, pouvant être rejetées par une ou plusieurs installation(s).

♣ Substances sans effets de seuil

- Démarche du choix des polluants "traceurs de risque"

Elle est la même que dans le cas précédent, à la différence de l'expression du ratio qui voit apparaître au numérateur, le nombre d'années où l'installation la plus ancienne la rejetant est en fonctionnement, soit :

$$\text{Ratio} = \frac{\text{Flux}_{\text{moy}} \times \text{nombre d'années de fonctionnement}}{\text{VTR}}$$

Avec le **Flux**_{moy} = correspondant au flux moyen (t.an⁻¹) de la molécule rejetée sur le site à compter de 1975. Pour cela, il sera effectué la somme du flux de cette molécule pour chacune des installations et ce, année par année. Ensuite, le flux moyen sur les 30 ans sera calculé pour cette molécule.

- Cas envisagés
 - ✓ **Cas n°3** : une même molécule sans effet de seuil pouvant être rejetée par une ou plusieurs installation(s) ;
 - ✓ **Cas n°4** : plusieurs molécules sans effet de seuil ayant le même organe cible, pouvant être rejetées par une ou plusieurs installation(s) ;
 - ✓ **Cas n°5** : risque cancérigène global pour l'inhalation, quel que soit l'organe cible.

2.2 Évaluation de l'exposition

2.2.1 Durée d'exposition

Les expositions à prendre en compte sont essentiellement des expositions de type chroniques, c'est à dire des expositions récurrentes et de longues durées. Il ne s'agit pas là d'étudier les cas relevant de circonstances accidentelles, qui font plus l'objet de l'étude de danger que de l'évaluation des risques.

2.2.2 Population exposée

La population exposée doit permettre d'estimer le nombre de personnes potentiellement exposées aux substances émises par les installations avoisinantes. De plus, il est conseillé de prendre en compte la population dite "sensible". Comme le précise l'OPERSEI [32], la population sensible peut être différente en fonction de la pathologie considérée. La recherche par exemple d'écoles, d'établissements de soins, de maisons de retraite, etc ... permet d'affiner l'étude, notamment lors de la réalisation du ou des scénario(s) d'exposition.

2.2.3 Modélisation de la dispersion atmosphérique

L'exposition par inhalation est estimée en utilisant les résultats d'un modèle de dispersion atmosphérique permettant de connaître les concentrations en polluants dans l'air (en moyenne annuelle), au niveau du sol.

Le modèle utilisé ici pour estimer la dispersion atmosphérique des polluants est un modèle conçu au sein de la DDASS, valable pour des sources d'émissions ponctuelles. Il est tridimensionnel et de type gaussien.

Il a été calé et validé en local, en comparant les résultats du modèle trouvés pour les concentrations en dioxines et en chrome à celles dans l'ERSEI de la Centrale Énergie Déchets de Limoges Métropole (CEDLM) [7]. Les concentrations sont du même ordre de grandeur, légèrement supérieures pour le modèle utilisé ici, compte-tenu des hypothèses réalisées.

Les concentrations estimées pour le chrome VI et les dioxines sont présentées dans le tableau 1 :

Tableau 1 : Comparaison des concentrations estimées par le modèle utilisé pour cette étude et celles du modèle de l'ERSEI de la CEDLM

Polluants	Plage de concentrations du modèle utilisé pour l'ERSEI de la CEDLM ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	Plage de concentrations du modèle utilisé pour cette étude ($\mu\text{g.m}^{-3}$)
Chrome VI	$2,5.10^{-5}$ à $7,5.10^{-5}$	$5,5.10^{-6}$ à $5,5.10^{-4}$
Dioxines	5.10^{-11} à $2,2.10^{-10}$	$2,0.10^{-10}$ à $8,6.10^{-9}$

Ce modèle permet d'estimer les concentrations en un polluant donné, à un endroit donné et à un moment donné, en tenant compte de :

- La *topographie* qui fait partie des paramètres utilisés pour modéliser la dispersion atmosphérique : en tenant compte de la différence d'altitude entre la hauteur d'émission du polluant (somme entre l'altitude de l'installation, de la hauteur de la cheminée et de celle du panache) et celle de la zone où la population est principalement exposée ;
- La *météorologie* : la météorologie locale est le paramètre déterminant pour la dispersion des polluants dans l'air. Le vent est le vecteur de la pollution, et la turbulence atmosphérique est à l'origine du processus de diffusion. Les données utilisées sont celles de la station Météo-France de Limoges pour les paramètres suivants : force et direction du vent, avec le pourcentage annuel pour chacun de ces deux paramètres ;
- La *molécule* considérée (nature et flux).

Les équations et les paramètres utilisés par ce modèle sont donnés en Annexe 6.

2.2.4 Concentrations dans l'environnement

La formule utilisée ici permettant d'estimer la concentration moyenne inhalée par jour pour la voie respiratoire est la suivante :

$$CI = \left(\sum_i (C_i \times T_i) \right) \times F \times \frac{T}{T_m}$$

avec :

- **CI** : Concentration moyenne inhalée (mg.m^{-3} ou $\mu\text{g.m}^{-3}$) ;
- **C_i** : Concentration de polluant dans l'air inhalé pendant la fraction de temps t_i ;
- **t_i** : Fraction du temps d'exposition à la concentration C_i pendant une journée ;
- **T** : Durée d'exposition (années) ;
- **F** : Fréquence ou taux d'exposition : fraction du nombre annuel d'unités de temps d'exposition (heures ou jours) sur le nombre d'unités de temps de l'année. F est sans dimension ;
- **T_m** : Période de temps sur laquelle l'exposition est moyennée (années).

Pour estimer cette concentration journalière inhalée, plusieurs étapes ont dû être réalisées :

La première a été d'estimer le terme $\left(\sum_i (C_i \times T_i) \right)$, c'est à dire la concentration en polluants rejetés dans l'atmosphère par ces différentes installations. A défaut de détenir des mesures de polluants dans l'air, fiables et exhaustives à la fois dans le temps, dans l'espace et dans la nature des molécules, le recours à la modélisation de la dispersion des polluants dans l'atmosphère s'est vite révélé indispensable. Enfin, contrairement au mesurage qui donne une image de l'exposition multisource (exposition cumulée), la modélisation permet de calculer une exposition strictement attribuable au site. Dans le cas de cette étude, elle permettra donc de voir la contribution de chacune des installations sur l'ensemble des rejets d'une zone, c'est-à-dire sur l'impact global engendré [14].

- Quel que soit le type de polluant, F sera toujours pris égal à 1, car les populations sont exposées à 100% de leur temps aux concentrations modélisées (C_i), c'est à dire 24 heures sur 24, 7 jours sur 7 et 365 jours par an ;
- Pour les polluants sans effet de seuil, l'exposition moyenne est calculée sur la durée effective d'exposition, soit $T_m = T$;
- Par contre, pour les molécules sans effet de seuil, T_m sera assimilé à la durée de la vie entière (prise conventionnellement égale à 70 ans, soit $T_m = 70$ ans) et la durée d'exposition T sera pris égale à 30 ans (durée moyenne de résidence en France, ce qui correspond au 90^{ème} percentile des durées de résidence en France [ad]). Cette durée de 30 ans est également mentionnée par l'INERIS [i], de même que par l'OPERSEI.

2.2.5 Voie d'exposition retenue

En fonction des informations disponibles, il s'agit d'étudier la pertinence d'une ou plusieurs voies d'exposition.

2.2.6 Scénario d'exposition

Les scénarios d'exposition sont décrits en termes de concentration, de durée et de fréquence d'exposition. Une différenciation dans la nature de la population potentiellement exposée entraînera une modification dans l'établissement du ou des scénario(s) d'exposition.

2.3 Caractérisation du risque

2.3.1 Polluants à effet de seuil

- ✓ Cas n°1 : une même molécule à effet de seuil pouvant être rejetée par une ou plusieurs installation(s)

Le QD de cette molécule sera estimé via la formule : $QD = \frac{CI}{VTR}$ pour différentes distances par rapport à la source et différentes directions dans l'espace, et ce pour chaque installation.

Le synoptique, à la figure 3, schématise la démarche mise en place pour une installation.

Les concentrations seront estimées jusqu'à 2 000 mètres par rapport à la source (car après 2 000 mètres, les variations sont très faibles), avec un pas de 100 mètres entre chaque mesure, et pour des orientations du vent comprises entre 20° et 360° (ces calculs étant réalisés tous les 20°).

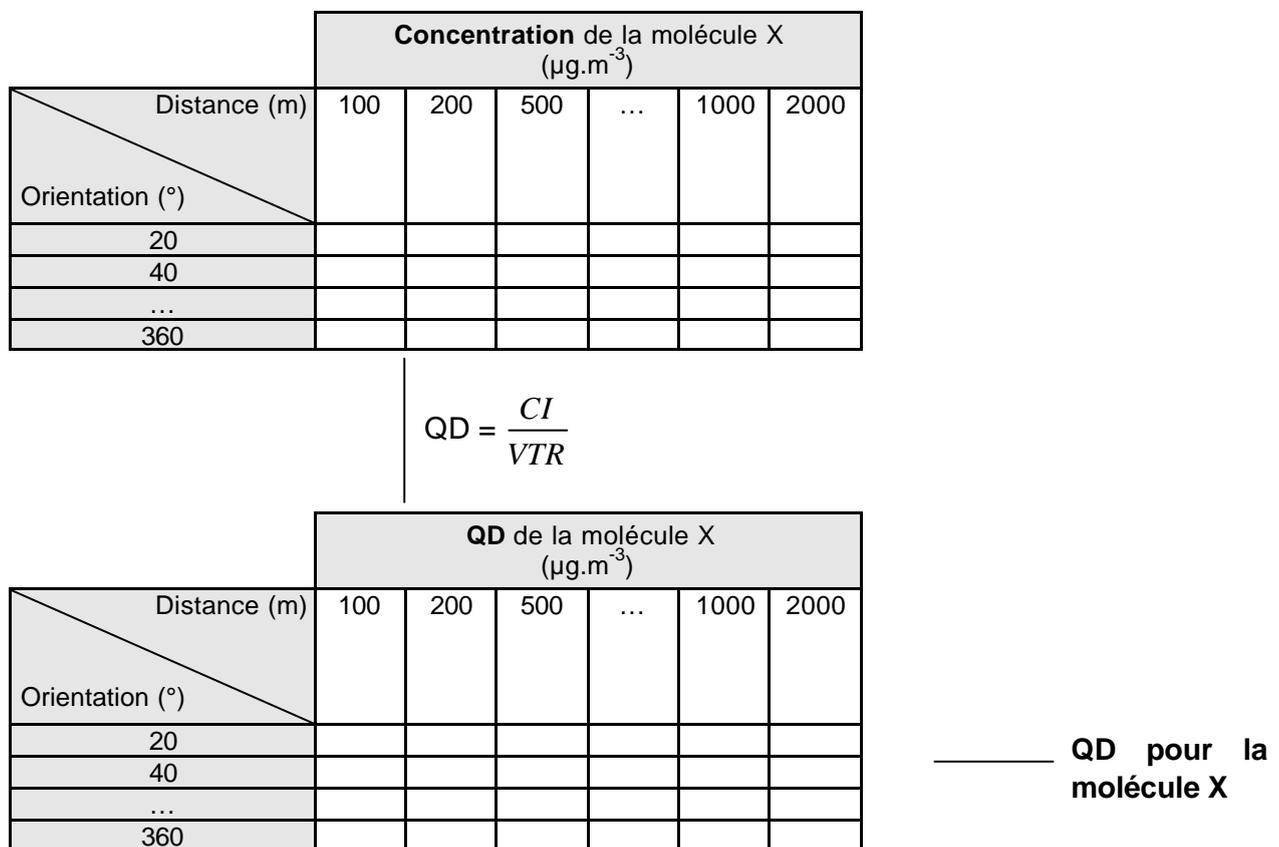


Figure 3 : Synoptique pour le calcul d'un QD global pour le cas n°1

Des valeurs de QD sont alors sélectionnées pour pouvoir tracer ensuite la courbe d'Iso-QD sur une carte IGN au 1/25 000^{ème}, en fonction de la distance par rapport à la source d'émission, puis en fonction de l'orientation dans la rose des vents.

Il est à préciser que si 2 ou plusieurs zones se recouvrent à un endroit donné de la carte, cela veut dire qu'elles ont pour origine deux ou plusieurs sources différentes (il s'agit donc là de risques cumulés).

Il faudrait alors sommer les QD respectifs en chaque point d'une même zone de recouvrement, car il s'agit de la même molécule (donc même organe cible et mêmes effets).

Mais comme les moyens informatiques disponibles ne permettent pas d'estimer point par point les QD cumulés, une approche majorante consistera dans un premier temps, à calculer le QD global maximum, c'est-à-dire effectuer la somme des QD zone par zone, graphiquement grâce aux courbes d'iso-QD :

$$QD_{global\ max} = \sum_i (QD_{global})$$

Avec i = nombre de zones de recouvrement, avec i = nombre d'installations étudiées.

Si ce $QD_{global\ max}$ reste inférieur à 1, la sur-exposition sera considérée comme acceptable.

- ✓ Cas n°2 : plusieurs molécules à effet de seuil ayant le même organe cible, pouvant être rejetées par une ou plusieurs installation(s)

L'organe cible a été sélectionné lors de l'étape : "choix des polluants traceurs de risque", et la liste des molécules agissant sur lui a été définie au niveau de "l'identification des dangers".

Dans un deuxième temps, pour chaque installation appartenant à l'étude :

- Il faut regarder parmi cette liste de molécules, celles qui sont effectivement rejetées par l'activité ;
- Ensuite, il faut réitérer le calcul du QD effectué au cas n°1 (pour différentes distances à la source et différentes orientations de la rose des vents) pour chacune des molécules séparément ;
- Enfin, il est alors possible de sommer les QD obtenus pour chaque molécule (en veillant à les sommer pour la même distance par rapport à la source et la même orientation dans la rose des vents), ce qui permet d'obtenir un QD global pour l'installation.

Ensuite, en fonction des ordres de grandeur des QD globaux obtenus pour chaque installation, une sélection pertinente de certaines de ces valeurs permettra alors de tracer des courbes d'Iso-QD au niveau de chaque installation.

Enfin, si des zones de recouvrement de différentes courbes d'Iso-QD existent, il est permis de sommer ces QD, puisqu'on étudie des molécules ayant le même organe cible.

Comme pour le cas n°1, une approche majorante sera de considérer le QD global maximum, c'est à dire l'endroit où les zones de recouvrement présentent les QD globaux les plus importants, comme le montre la figure 4 :

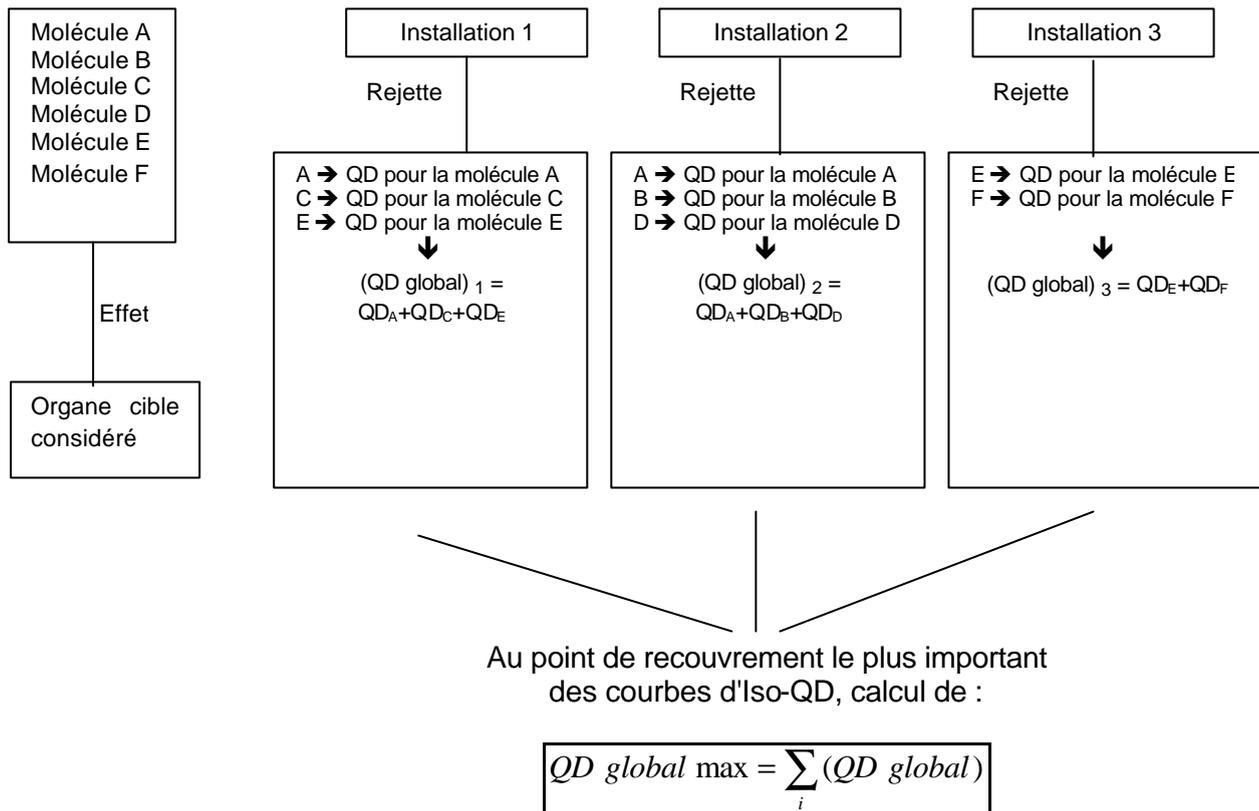


Figure 4 : Synoptique pour le calcul d'un QD global pour le cas n°2

Si ce $QD_{\text{global max}}$ reste inférieur à 1, la sur-exposition sera considérée comme acceptable.

2.3.2 Polluants sans effet de seuil

La démarche mise en place pour les cas n°1 et 2 sera la même respectivement pour les cas n° 3, 4 et 5, à la différence qu'il ne faudra pas estimer de QD, ni tracer des courbes d'Iso-QD, mais estimer des ERI pour tracer des courbes d'Iso-ERI et de comparer l'ERI global maximum à 10^{-6} pour voir l'acceptabilité du risque.

- ✓ Cas n°3 : une même molécule sans effet de seuil pouvant être rejetée par une ou plusieurs installation(s)
- ✓ Cas n°4 : plusieurs molécules sans effet de seuil ayant le même organe cible, pouvant être rejetées par une ou plusieurs installation(s)
- ✓ Cas n°5 : estimation du risque cancérigène global pour l'inhalation (quel que soit l'organe cible)

3 APPLICATION À LA ZONE INDUSTRIELLE NORD DE LA VILLE DE LIMOGES

Remarque : dans un souci de clarté, seuls figureront dans cette partie les résultats et synthèses des travaux effectués. Les détails des recherches et des calculs sont donnés dans les Annexes.

3.1 Caractérisation du site et de son environnement

3.1.1 Domaine d'étude

Le domaine d'étude est présenté sur la figure n° 5, correspondant au secteur Nord de la ville de Limoges (Haute-Vienne). Il comprend à la fois des zones résidentielles (quartier de Beaubreuil, commune du Palais-sur-Vienne), mais également une zone industrielle.

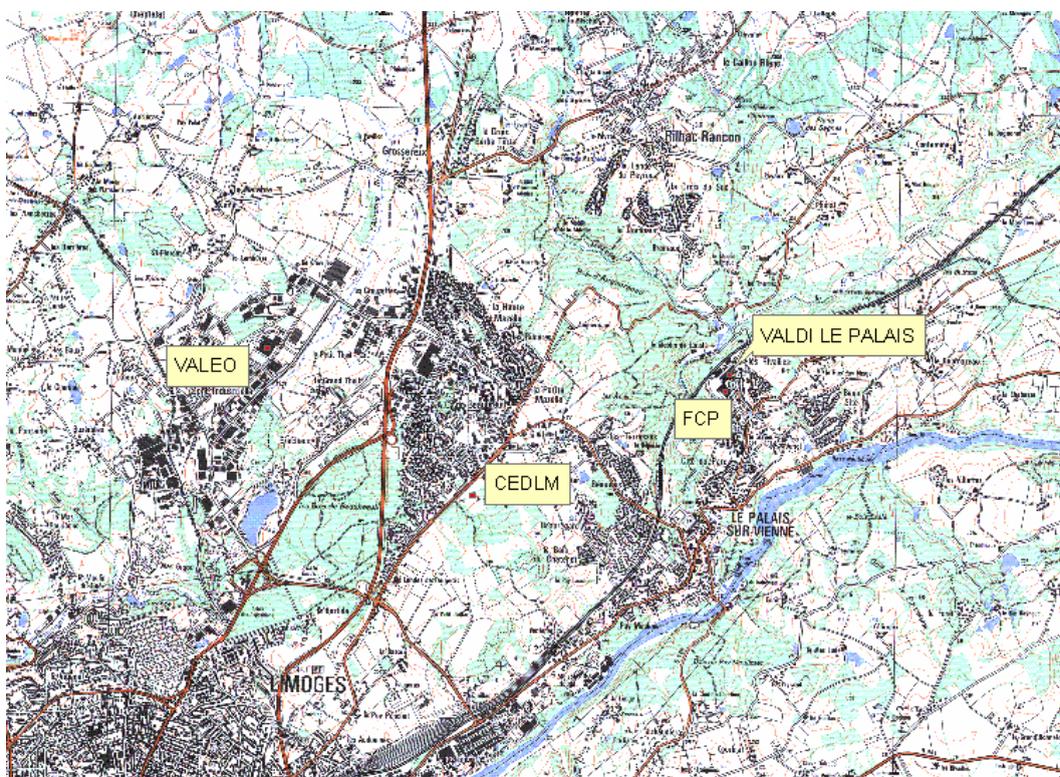


Figure 5 : Zone d'étude

Le quartier de Beaubreuil est notamment entouré par plusieurs ICPE ou infrastructures qui rejettent des polluants dans l'atmosphère du fait de leur fonctionnement.

Les quatre principales ICPE sont les suivantes :

- La Centrale Energie Déchets de Limoges Métropole (CEDLM) ;
- Une usine spécialisée dans la fabrication de matériaux de friction (VALEO) ;
- Une installation valorisant des coproduits métalliques et minéraux pour produire des alliages par pyroméallurgie (VALDI LE PALAIS) ;
- Une fonderie de cuivre (FCP).

A ces ICPE, il faut noter la présence de l'autoroute A 20 (direction Paris - Toulouse) qui traverse cette zone industrielle et dont le trafic routier est loin d'être négligeable : la circulation (estimée en 2001 lors de l'étude réalisée par l'Agence Régionale pour la Qualité de l'Air en Limousin (ARQAL), portant sur l'Étude de simulation de pollution

atmosphérique de proximité liée au trafic routier sur la ville de Limoges [5]), était évaluée à plus de 40 000 véhicules par jour sur le tronçon d'autoroute situé au Nord de la ville de Limoges, c'est à dire correspondant à la zone de la présente étude.

La description détaillée des installations (mode de fonctionnement, process) et de leur historique, provenant la plupart du temps des ERSEI relatives à ces activités, est détaillée en Annexe 1.

3.1.2 Relief

La zone d'étude ne présente pas une topographie plane, le relief est vallonné, les altitudes étant plus faibles à mesure que l'on se rapproche de la vallée de la Vienne (230 mètres d'altitude).

Les quatre ICPE ont toutes une altitude supérieure à 300 mètres : FCP et VALDI LE PALAIS se situent à environ 300 mètres, VALEO quant à lui possède une altitude de 320 mètres et l'incinérateur d'ordures ménagères est l'installation dont l'altitude est la plus élevée (355 mètres).

3.1.3 Conditions météorologiques

Les mesures proviennent de la station Météo-France de Limoges (force et direction du vent, avec le pourcentage annuel de chacun de ces deux paramètres), reprises dans le dossier de la CEDLM. L'approche proposée nécessite l'utilisation d'une chronique météorologique réelle de plusieurs années afin de mettre en évidence les comportements climatologiques du site, à une cadence tri-horaire (une mesure toutes les trois heures). L'US-EPA recommande l'utilisation de 5 années consécutives, les mesures météorologiques disponibles ont été réalisées de 1998 à 2002.

La station Météo-France de Limoges se situe à côté de l'aéroport international, au Nord-Ouest de la ville, à une dizaine de kilomètres de la zone industrielle étudiée.

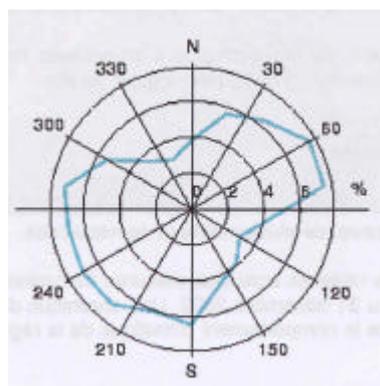


Figure 6 : Rose des vents générale de la station Météo-France de Limoges.

La force et la direction du vent sont synthétisées Annexe 2.

La rose des vents générale présente deux directions prédominantes :

- Vents de vecteurs Ouest/Sud-Ouest (180° - 300°) majoritairement ;
- Vents de secteur Est/Nord-Est (20° - 80°).

3.2 Identification de l'ensemble des émissions sur le secteur d'étude

Tableau 2: Sources bibliographiques utilisées pour l'identification de l'ensemble des émissions sur le secteur d'étude

Informations recherchées	Documents consultés
CEDLM	[4] [6] [7] [25]
VALDI	[13]
FCP	[11] [23]
VALEO	[3]
A 20	[5] [8] [9] [31]

3.2.1 Synthèse qualitative et quantitative des substances rejetées sur la zone industrielle et identification des dangers liés à ces substances

A) Substances rejetées par chacune des installations

Pour chacune des activités (4 ICPE et l'autoroute A20), une recherche (la plus exhaustive possible) des composés rejetés a été réalisée. Au total, ce sont au moins 35 molécules différentes qui sont émises au niveau de la zone d'étude. Cet inventaire a pu être réalisé grâce à deux principales sources documentaires :

- Les données contenues dans les ERSEI des quatre ICPE ;
- Diverses données disponibles auprès de la DRIRE Limousin pour les installations existantes.

Tableau 3 : Récapitulatif des substances rejetées par les différentes activités de la zone industrielle

Substances		CEDLM	VALDI	FCP	VALEO	A 20
Gaz de combustion	SO ₂	✓	✓	✓	✓	✓
	NO _x	✓		✓	✓	✓
	CO	✓	✓			✓
	CO ₂					✓
	HCl	✓	✓	✓		
	HF	✓	✓	✓		
	Ammoniaque				✓	
	O ₃					✓
Poussières		✓	✓	✓	✓	✓
COV	Benzène	✓	✓	✓	✓	✓
	Naphtalène	✓				
	Toluène			✓		
	Xylène			✓		
	Trichloréthylène				✓	
	Formaldéhyde				✓	✓
	Acétaldéhyde					✓
	Phénol				✓	
	1,3-butadiène					✓
Métaux lourds (ou semi-conducteur)	Antimoine	✓	✓	✓		
	Arsenic	✓	✓	✓		
	Cadmium	✓	✓	✓		
	Chrome	✓	✓	✓		✓
	Cobalt	✓	✓	✓		
	Cuivre	✓	✓	✓		✓
	Etain		✓	✓		
	Manganèse	✓	✓	✓		
	Mercuré	✓	✓	✓		
	Nickel	✓	✓	✓		✓
	Plomb	✓	✓	✓		✓
	Sélénium		✓	✓		✓
	Tellure		✓	✓		
	Thallium	✓	✓	✓		
	Vanadium	✓	✓	✓		
Zinc		✓	✓			
Dioxines - Furannes		✓	✓	✓		

B) Estimation des flux rejetés

L'intégration du temps a été prise en compte. Le choix de la durée de l'estimation des flux rejetés s'est arrêtée à 30 ans (de 1975 à 2005), en raison notamment du fait que ce nombre d'années correspond en moyenne à la durée de résidence d'un ménage en France [22].

Puis pour chacune de ces installations, un découpage en fonction de l'historique a été réalisé :

- Pour la CEDLM, trois périodes ont été retenues :
 - De 1986 à 1996 : début du fonctionnement de l'usine, avec deux lignes de four incinérant une capacité de 75 000 t/an ;
 - De 1997 à 2004 : accroissement de la capacité de l'installation à 90 000 t/an et mise aux normes suite à l'arrêté ministériel du 25 janvier 1991 ;
 - À partir de 2005 : augmentation de la capacité de fonctionnement à 110 000 t et mise en conformité de l'installation selon l'arrêté du 20 septembre 2002.
- Pour VALDI LE PALAIS, une seule période de fonctionnement : à partir de 1999 (date de la création de cette entreprise) ;
- Pour FCP, deux périodes de fonctionnement :
 - De 1975 à 1998, correspondant au fonctionnement de la CGEP ;
 - À partir de 1999, correspondant au début du fonctionnement de FCP ;
- Pour VALEO, deux périodes de fonctionnement :
 - De 1975 à 2001 correspondant à la période du plus fort taux de rejet en trichloréthylène (TCE) ;
 - À partir de 2002 correspondant au moment de changement de process;
- Pour l'autoroute A20 : une seule période de fonctionnement, depuis sa construction en 1989.

Pour chaque période ainsi constatée, une hiérarchisation dans les données de flux disponibles a été effectuée de façon à avoir la même façon de procéder (quelle que soit la molécule et quelle que soit l'installation) :

- ♦ En premier lieu, ont été prioritairement considérées les données des mesures réalisées dans les ERSEI (car ce sont généralement les données les plus complètes) ;
- ♦ Ensuite, les mesures d'autocontrôles réalisées par les installations.

Remarque : il n'a pas été possible d'avoir des valeurs chiffrées pour chaque année. Lorsqu'une année ne possédait pas de données, on lui a attribué les valeurs les plus fortes d'une autre année, mais appartenant à la même période.

3.2.2 Identification des dangers

L'étude détaillée des dangers est donnée en Annexe 5 pour les substances ayant des effets avec seuil et celles n'en ayant pas. Les effets retenus lors de la consultation des bases de données toxicologiques sur Internet citées précédemment sont les effets chroniques, observés chez l'homme.

Comme le temps imparti pour réaliser ce mémoire est fixé et limité à 4 mois, les hypothèses suivantes ont été faites pour effectuer la sélection des substances "traceurs de risques" :

- L'analyse du potentiel dangereux des éléments ne sera complète que pour l'inhalation. Elle portera sur toutes les molécules émises sur le site industriel (gaz de combustion, solvants, poussières, métaux et dioxines). Cette étude comprend la détermination du système et de l'organe cible, des pathologies associées, ainsi que la VTR retenue ;
- Par contre, pour la voie orale, l'analyse du potentiel dangereux des éléments ne sera pas aussi complète, en raison du temps qui est alloué pour réaliser cette étude. Les VTR ne seront par exemple recherchées que dans le cas où il n'en existe pas pour l'inhalation, ce qui permettra alors de pouvoir réaliser une dérivation voie à voie (la VTR pour la voie orale servira alors à estimer celle pour l'inhalation).

3.2.3 Choix des "polluants traceurs de risques"

Le choix dans les substances à sélectionner pour réaliser la suite de l'étude devra répondre à deux objectifs principaux :

- Le premier étant la réalisation d'un choix argumenté des substances ;
- Quant au deuxième, il s'agit de la gestion du temps pour réaliser une telle étude, le temps alloué à la réalisation de ce mémoire ne permettant pas d'envisager toutes les hypothèses possibles.

A) Molécules agissant avec un effet de seuil

Le tableau 4 présente de façon synthétique les paramètres entrant en compte pour sélectionner les "polluants traceurs de risque" pour chaque molécule émise sur le site :

- La liste des installations rejetant la molécule et le nombre total d'installations ;
- Le flux maximum émis pour cette molécule durant les 30 dernières années ;
- La VTR retenue ;
- Le ratio : Flux maximum / VTR ;
- Et enfin, les effets observés chez l'homme : organe cible et pathologies associées.

Tableau 4 : Tableau de sélection des "polluants traceurs de risques" pour les molécules agissant avec un effet de seuil et pour l'inhalation

Substances	Rejetée par les installations (*)					Installations concernées	Flux _{max} (t/an)	VTR (mg/m ³)	$\frac{Flux_{max}}{VTR}$	Effets observés
	1	2	3	4	5					
SO ₂	✓	✓	✓	✓	✓	5	9,53.10 ¹	MRL _{aigu} = 2,3.10 ⁻² (ATSDR, 1998)	4,1.10 ³	Système respiratoire (Maux de gorge, toux, irritation de la trachée et des bronches), Système cardiaque (Augmentation du rythme cardiaque), Système gastro-intestinal (Nausées, vomissements), Système sanguin (Augmentation du taux de méthémoglobine), Système oculaire (Irritations).
NO ₂	✓		✓	✓	✓	4	1,68.10 ²	VTR = 4,0.10 ⁻² (Objectif de qualité du Décret n°2002-213 du 15 Février 2002)	4,2.10 ³	Système respiratoire (Emphysème, infections pulmonaires), Système immunitaire (Diminution des immunoglobulines (IgG)).
CO	✓	✓			✓	3	3,29.10 ¹	VLEP = 1,12.10 ⁻¹ (INRS, 2005)	2,9.10 ²	Système cardio-vasculaire (Ischémie myocardique à l'effort, infarctus du myocarde), Effet foetotoxique (Séquelles neurologiques du fœtus si intoxication grave de la mère).
CO ₂					✓	1	-	VLEP = 1,84.10 ¹ (INRS, 2005)	-	Système respiratoire (Augmentation de la ventilation pulmonaire).
HCl	✓	✓		✓		3	8,37.10 ⁰	RfC = 2,00.10 ⁻² (US-EPA, 1994)	4,2.10 ²	Système respiratoire (Ulcération des muqueuses, saignements de nez).
HF	✓	✓		✓		3	6,35.10 ⁻¹	REL = 1,40.10 ⁻² (OEHHA, 2003)	4,5.10 ¹	Système respiratoire (Irritations respiratoires : muqueuses nasales notamment), Système gastro-intestinal (Nausées, vomissements), Système oculaire (Conjonctivites), Effets possibles sur les systèmes nerveux, rénal, cardiovasculaire et hématologique (Arythmie cardiaque, diminution du taux d'hémoglobine).
NH ₃			✓			1	5,50.10 ⁰	RfC = 1,00.10 ⁻¹ (IS EAP, 1991)	5,5.10 ¹	Système respiratoire : voies aériennes supérieures (Augmentation des symptômes respiratoires : inflammation, toux, irritation, asthme), Système endocrinien , Système cutané (Irritations), Système oculaire (Irritations).
O ₃					✓	1	-	VLEP = 4,08.10 ⁻⁴ (INRS, 2005)	-	Système respiratoire (Bronchopathies, emphysème, fibrose, dyspnées asthmatiformes), Système nerveux (Troubles de la mémoire, maux de tête, faiblesse, accroissement de l'excitabilité musculaire).
Poussières	✓	✓	✓	✓	✓	5	4,95.10 ¹	VLEP = 1,02.10 ⁻² (INRS, 2005)	5,6.10 ³	Particules fines : Système respiratoire (Asthme, bronchite, toux, réaction inflammatoire), Système cardiovasculaire .
Benzène	✓	✓	✓	✓	✓	5	2,05.10 ²	RfC = 3,00.10 ⁻² (US-EPA, 2003)	6,8.10 ³	Système sanguin (La plupart des effets sanguins : anémie aplasique, pancytopenie, thrombocytopénie, granulopénie, lymphopénie, ...), Système immunitaire (Diminution du nombre de lymphocytes, de leucocytes).
Naphtalène	✓					1	5,60.10 ⁰	RfC = 3,00.10 ⁻³ (US-EPA, 1998)	1,9.10 ³	Système sanguin (Anémie hémolytique), Système gastro-intestinal (Nausées, vomissements), Système hépatique (Ictère), Système oculaire

										(Cataracte), Système nerveux central (Confusion).
Toluène			✓		1	$4,30.10^{-2}$	MRL = $3,00.10^{-1}$ (ATSDR, 2000)	$1,4.10^{-1}$	Système nerveux (Dysfonctionnements cérébraux, pyramidaux et cognitifs (tremblements, ataxie, troubles de la mémoire, atrophie du cervelet, neurasthénie), Système auditif (Perte d'audition), Système hépatique , Développement .	
Xylène			✓		1	$3,90.10^{-2}$	MRL = $4,35.10^{-1}$ (ATSDR, 1995)	$9,0.10^{-2}$	Système respiratoire (Irritations des voies aériennes supérieures, altération des fonctions pulmonaires), Système cardiovasculaire (palpitations cardiaques), Système nerveux (Vertiges, perte de mémoire, anxiété), Système immunitaire (Diminution du nombre de lymphocytes), Systèmes hématologique et rénal (possible).	
Trichloréthylène			✓		1	$7,08.10^2$	REL = $6,00.10^{-1}$ (OEHHA, 2003)	$1,2.10^3$	Système nerveux central (Anesthésie, vertiges), Système gastro-intestinal (Nausées, vomissements), Système oculaire (Irritations), Système hépatique (Hépatite), Système cardiovasculaire (arythmie ventriculaire), Système rénal .	
Formaldéhyde			✓	✓	2	$3,20.10^0$	REL = $3,00.10^{-3}$ (OEHHA, 2003)	$1,1.10^3$	Système respiratoire (Irritations des voies aériennes supérieures, destruction des cellules nasales. Chez les enfants : diminution de la fonction respiratoire, asthme, bronchite), Système nerveux .	
Acétaldéhyde				✓	1	-	RfC = $9,00.10^{-3}$ (US-EPA, 1991)	-	Système respiratoire (Broncho-pneumopathie).	
Phénol			✓		1	$2,70.10^0$	REL = $2,00.10^{-1}$ (OEHHA, 2003)	$1,4.10^1$	Système cardio-vasculaire	
1,3-butadiène				✓	1	-	RfC = $2,00.10^{-3}$ (US-EPA, 1993)	-	Système respiratoire (Irritation des voies aériennes supérieures et des poumons, toux), Système cardiaque (Maladie artérioscléreuse), Système sanguin (Diminution du nombre de globules rouges, de l'hémoglobine, des plaquettes et des neutrophiles), Système oculaire (Irritations des yeux), Système nerveux (Léthargie, somnolence).	
Antimoine	✓	✓		✓	3	$2,70.10^{-1}$	VTR = $1,40.10^{-3}$ (dérivation voie à voie)	$1,9.10^2$	Système respiratoire (Pneumoconiose, bronchite et emphysème chroniques, toux, inflammation), Système cardiaque (Augmentation de la pression sanguine), Système gastro-intestinal (Douleurs abdominales, diarrhée, vomissements, ulcère), Système oculaire , Système nerveux , Développement .	
Arsenic	✓	✓		✓	3	$1,36.10^{-2}$	TCA = $1,00.10^{-3}$ (RIVM, 2001)	$1,4.10^1$	Système cardiovasculaire , Système nerveux central (Neuropathologie, encéphalopathie), Système cutané (Hyperkératose, hyper-pigmentation, hypo-pigmentation), Système gastro-intestinal (Nausées, vomissements, diarrhée).	
Cadmium	✓	✓		✓	3	$1,25.10^{-1}$	REL = $2,00.10^{-5}$ (OEHHA, 2003)	$6,6.10^3$	Système respiratoire (Diminution des capacités respiratoires, rhinites, bronchite, emphysème), Système rénal (Dysfonctionnement rénal), Système nerveux (Neuropathie périphérique).	

Chrome (VI)	✓	✓	✓	✓	4	$6,21 \cdot 10^{-2}$	MRL = $5,00 \cdot 10^{-6}$ (ATSDR, 2000)	$1,2 \cdot 10^4$	Système respiratoire (Epistaxis, rhinorrhée chronique, irritation et démangeaisons nasales, atrophie de la muqueuse nasale, ulcération du septum nasal, bronchite, pneumoconiose, pneumonies, asthme), Système gastro-intestinal (Douleurs stomacales, crampes, ulcères gastro-duodénaux, gastrites).
Cobalt	✓	✓	✓		3	$3,34 \cdot 10^{-2}$	MRL = $1,00 \cdot 10^{-4}$ (ATSDR, 2001)	$3,3 \cdot 10^2$	Système respiratoire (Diminution de la ventilation pulmonaire, irritation respiratoire, asthme, pneumonie, fibrose), Système cardiovasculaire : effets faibles cependant pour cette voie d'exposition (Cardiomyopathie).
Cuivre	✓	✓	✓	✓	4	$2,61 \cdot 10^0$	TCA = $1,00 \cdot 10^{-3}$ (RIVM, 2001)	$2,6 \cdot 10^3$	Système hépatique (Cirrhose micronodulaire, fibrose, angiosarcome, hypertension portale), Système respiratoire : poumons et voies aériennes supérieures (Irritation des voies aériennes supérieures, pneumopathie : "Vineyard Sprayers' Lung"), Système gastro-intestinal (Anorexie, nausée, diarrhée).
Etain		✓		✓	2	$1,22 \cdot 10^{-2}$	VTR = $1,05 \cdot 10^0$ (dérivation voie à voie)	$1,2 \cdot 10^{-2}$	Système respiratoire (Pneumoconiose).
Manganèse	✓	✓		✓	3	$5,05 \cdot 10^{-2}$	RfC = $5,00 \cdot 10^{-5}$ (US-EPA, 1993)	$1,0 \cdot 10^3$	Système nerveux (Diminution des fonctions motrices, confusion, fatigue ...), Système respiratoire (Inflammation des poumons, œdème, toux, bronchite, pneumonie), Système cardiaque (Diminution de la pression sanguine), Système sanguin , Système endocrinien , Reproduction , Possibles effets sur les systèmes immunologique et lymphoréticulaire .
Mercure	✓	✓		✓	3	$4,12 \cdot 10^{-2}$	MRL = $2,00 \cdot 10^{-4}$ (ATSDR, 2001)	$2,1 \cdot 10^2$	Système nerveux central (Lésions du cervelet, tremblements, irritabilité, "Pink Disease" chez les enfants), Système rénal (Protéinurie, lésions des tubes proximal et terminal, lésions glomérulaires).
Nickel	✓	✓		✓	4	$4,85 \cdot 10^{-1}$	TCA = $5,00 \cdot 10^{-5}$ (RIVM, 2001)	$9,8 \cdot 10^3$	Système respiratoire (Bronchite, emphysème, asthme), Système immunitaire , Système rénal , Reproduction et développement .
Plomb	✓	✓		✓	4	$1,96 \cdot 10^0$	VTR = $1,23 \cdot 10^{-2}$ (dérivation voie à voie)	$1,7 \cdot 10^2$	Système nerveux central (Encéphalopathie saturnine, troubles neurocomportemental et psychomoteur), Système nerveux périphérique (Paralysie des membres supérieurs, paresthésie), Système sanguin (Anémie), Système rénal (Insuffisance rénale), Système cardiovasculaire (Hypertension artérielle), Système thyroïdien , Système osseux (observé chez les enfants), Système immunitaire (possible).
Sélénium		✓		✓	3	$4,78 \cdot 10^{-4}$	REL = $2,00 \cdot 10^{-2}$ (OEHHA, 2001)	$2,4 \cdot 10^{-2}$	Système respiratoire : poumons et voies aériennes supérieures (Trachéo-bronchite, irritation du nez), Système gastro-intestinal (Douleurs à l'estomac), Système nerveux (Irritabilité, malaise).
Tellure		✓		✓	2	$1,99 \cdot 10^{-3}$	VLEP = $2,04 \cdot 10^{-4}$ (INRS, 2005)	$9,8 \cdot 10^0$	Pas d'effets sur l'homme constaté, mais VTR calculée à partir des VME de l'INRS
Thallium	✓	✓		✓	3	$4,68 \cdot 10^{-4}$	VLEP = $2,04 \cdot 10^{-4}$ (INRS, 2005)	$2,3 \cdot 10^0$	Système nerveux (Paresthésie, crampes musculaires).
Vanadium	✓	✓		✓	3	$9,56 \cdot 10^{-3}$	MRL = $2,00 \cdot 10^{-4}$	$4,8 \cdot 10^1$	Système respiratoire (Détresse respiratoire, toux, maux de gorge),

							(ATSDR, 1992)		Système gastro-intestinal (Nausées, vomissements), Système oculaire (Conjonctivite, irritation), Système nerveux (Vertige, dépression, migraine).
Zinc		✓		✓		2	$6,68.10^{-1}$ VTR = $1,05.10^0$ (dérivation voie à voie)	$6,4.10^{-1}$	Système gastro-intestinal (Douleurs abdominales ou épigastriques, nausées, vomissements, ulcères, constipation).
Dioxines – Furannes	✓	✓		✓		3	REL = $4,00.10^{-8}$ (OEHHA, date non répertoriée)	$2,2.10^1$	Système cutané (Acné, hyperpigmentation, hirsutisme, hypertrichose), Système hépatique (Hypercholestérolémie, taux en gamma GT élevé), Système endocrinien (Altération de la fonction thyroïdienne, altération du métabolisme du glucose : diabète), Système nerveux : central et périphérique (Polyneuropathie, encéphalopathie, neuropathie périphérique, désordre mental, somnolence, maux de tête), Possibles effets sur le système cardiovasculaire, système oculaire (irritations), système immunologique, reproduction.

(*) : la correspondance entre les installations et les chiffres est la suivante : 1 = CEDLM, 2 = VALDI, 3 = VALEO, 4 = FCP, 5 = A 20.

- a) Une même molécule à effet de seuil pouvant être rejetée par une ou plusieurs installation(s)

Le **chrome VI** est la molécule qui sera étudiée dans cette partie.

En effet, le ratio calculé Flux maximum rejeté / VTR ($= 1,2 \cdot 10^4$) est le plus important parmi tous les ratios. De plus, elle est émise par plusieurs installations de cette zone industrielle (3 ICPE : la CEDLM, VALDI LE PALAIS et FCP). Enfin, les pathologies qui lui sont associées sont loin d'être neutres (systèmes respiratoire et gastro-intestinal).

- b) Plusieurs molécules à effet de seuil ayant le même organe cible, pouvant être rejetées par une ou plusieurs installation(s)

L'organe cible retenu ici est le **système respiratoire**.

La plupart des molécules agissent sur ce système (voies aériennes supérieures ou poumons). Sur les 35 molécules émises sur ce site, 22 ont entre autres comme organe cible, le système respiratoire : SO₂, NO₂, CO₂, HCl, HF, NH₃, O₃, poussières, xylène, formaldéhyde, acétaldéhyde, 1,3-butadiène, antimoine, cadmium, chrome, cobalt, cuivre, étain, manganèse, nickel, sélénium et le vanadium. Ne seront sélectionnées que les molécules dont le ratio Flux maximum rejeté / VTR est égal ou supérieur à 10².

Ne seront donc gardées pour l'étude du système respiratoire que les molécules :

Tableau 5 : Nombre de molécules étudiées pour le système respiratoire

	CEDLM	VALDI	FCP	VALEO
	SO ₂	SO ₂	SO ₂	SO ₂
	NO ₂	HCl	NO ₂	NO ₂
	HCl	Antimoine	HCl	Formaldéhyde
	Antimoine	Cadmium	Antimoine	
	Cadmium	Chrome	Cadmium	
	Chrome	Cobalt	Chrome	
	Cobalt	Cuivre	Cobalt	
	Cuivre	Manganèse	Cuivre	
	Manganèse	Nickel	Manganèse	
	Nickel		Nickel	
Total	10	9	10	3

Remarque : le modèle de dispersion atmosphérique utilisé ici nécessite la masse molaire des substances. En effet, dans les données disponibles sur les installations du site, le terme "poussières" correspond à un terme d'ordre général, ne détaillant pas le contenu exact des poussières, ni leur granulométrie. Il n'existe donc pas de masse molaire spécifique pour les poussières. Ces dernières ne pourront être modélisées.

Toutes ces molécules à effet de seuil agissent sur le système respiratoire, les pathologies allant des maux de gorge, d'irritations de la trachée et des bronches, d'asthme, d'emphysème, jusqu'à des pneumopathies.

Remarque : même si le mécanisme d'action entre les molécules à ou sans effets de seuil, est différent, il est important de souligner que parmi la liste de molécules engendrant des effets systémiques sur le système respiratoire, certaines peuvent également provoquer des cancers – où sont susceptibles d'en engendrer – sur ce système (poumons principalement) : SO₂, HF, poussières, formaldéhyde, acétaldéhyde, 1,3-butadiène, cadmium, chrome, cobalt et nickel.

B) Molécules agissant sans effet de seuil

Le tableau 5 présente les paramètres entrant en compte pour sélectionner les "polluants traceurs de risque", pour chaque molécule émise sur le site :

- La liste des installations rejetant la molécule et le nombre total d'installations ;
- Le flux moyen émis pour cette molécule durant les 30 dernières années ;
- La VTR retenue ;
- Le ratio Flux maximum \times durée d'exposition / VTR ;
- Et enfin, les effets observés chez l'homme : organe cible et pathologies associées.

Tableau 6 : Tableau de sélection des "polluants traceurs de risques" pour les molécules agissant sans effet de seuil et pour l'inhalation

Substances	Rejetée par les installations (*)					Installations concernées	Flux moyen (t/an)	ERU (mg/m3) ⁻¹	Nombre d'années de fonctionnement	$\frac{Flux_{moyen}}{ERU} \times$ durée d'exposition	Effets observés
	1	2	3	4	5						
SO ₂	✓	✓	✓	✓	✓	5	4,05.10 ¹	Pas de VTR	85	-	Système respiratoire possible (Cancer du poumon)
NO ₂	✓		✓	✓	✓	4	8,51.10 ¹	Non cancérigène	85	-	Classé non cancérigène
CO	✓	✓			✓	3	1,11.10 ¹	Non cancérigène	19	-	Classé non cancérigène
CO ₂					✓	1	-	Non cancérigène	16	-	Classé non cancérigène
HCl	✓	✓		✓		3	3,35.10 ⁰	Non cancérigène	85	-	Classé non cancérigène
HF	✓	✓		✓		3	1,75.10 ⁻¹	Pas de VTR	85	-	Des études ont relaté l'existence possible de cancers sur plusieurs systèmes : système respiratoire, système hépatique, système sanguin et système reproducteur (Cancer du poumon, cancer du pancréas, cancer lympho-hématopoïétique, cancers génitaux)
NH ₃			✓			1	5,50.10 ⁰	Non cancérigène	82	-	Classé non cancérigène
O ₃					✓	1	-	Non cancérigène	16	-	Classé non cancérigène
Poussières	✓	✓	✓	✓	✓	5	4,13.10 ¹	Pas de VTR	85	-	Système respiratoire (Cancer du poumon)
Benzène	✓	✓	✓	✓	✓	5	1,88.10 ²	7,80.10 ⁰ (US-EPA, 1998)	85	2,0.10⁹	Système hématopoïétique (Lymphome non Hodgkinien), Système lymphopoïétique (Leucémie), Système respiratoire (Cancers du poumon, du nez)
Naphtalène	✓					1	2,58.10 ⁰	Non cancérigène	19	-	Classé non cancérigène
Toluène				✓		1	4,30.10 ⁻²	Pas de VTR	85	-	Système respiratoire (Cancer du tractus respiratoire), Système gastro-intestinal (Cancers de l'estomac, colo-rectal).
Xylène				✓		1	3,90.10 ⁻²	Non	85	-	Classé non cancérigène

							cancérogène				
Trichloréthylène			✓			1	6,74.10 ²	4,30.10 ⁻⁷ (OMS, 2000)	82	1,3.10 ¹¹	Système génito-urinaire (Cancer du col de l'utérus chez la femme, cancer de la prostate chez l'homme), Système hépatique (Cancer du foie), Système gastro-intestinal (Cancer de l'estomac), Système sanguin (Cancer des tissus hématopoïétiques), Système nerveux (Astrocytome).
Formaldéhyde			✓		✓	2	3,20.10 ⁰	6,00.10 ⁻⁶ (OEHHA, 2002)	82	4,4.10 ⁷	Système respiratoire : voies aériennes supérieures, cavités buccales et nasales, nasopharynx, poumons (Cancer).
Acétaldéhyde					✓	1	-	2,20.10 ⁻⁶ (US-EPA, 1991)	16	-	Possibles effets sur le système respiratoire (Tumeurs bronchiques et tumeurs buccales).
Phénol			✓			1	2,70.10 ⁰	Pas de VTR	82	-	Cancers possibles au niveau de l'œsophage et du rein et maladie de Hodgkin possible également
1,3-butadiène					✓	1	-	3,00.10 ⁻⁵ (US-EPA, 2002)	16	-	Système respiratoire, Système gastro-intestinal (Cancer de l'estomac, cancer de l'œsophage), Système urinaire (Cancer de la vessie), Système sanguin (Cancer lympho-hématopoïétique, néoplasme lymphatique, lymphosarcome, leucémie, sarcomes des cellules réticulaires).
Antimoine	✓	✓		✓		3	1,74.10 ⁻¹	Non cancérogène	85	-	Classé non cancérogène
Arsenic	✓	✓		✓		3	7,41.10 ⁻³	3,30.10 ⁻³ (OEHHA, 2002)	85	2,0.10 ²	Système respiratoire (Cancer du poumon)
Cadmium	✓	✓		✓		3	9,34.10 ⁻²	1,80.10 ⁻³ (US-EPA, 1992)	85	4,7.10 ³	Système respiratoire (Cancer du poumon), Système urinaire (Cancer de la prostate), Une étude a observé une action cancérogène possible sur les systèmes hépatique et gastro-intestinal (Cancers du foie et de l'estomac).
Chrome (VI)	✓	✓		✓	✓	4	1,80.10 ⁻²	1,20.10 ⁻² (US-EPA, 1988)	85	1,3.10 ²	Système respiratoire (Cancer du poumon, Cancer à petites cellules, carcinomes épithélioïdes), Autres cancers observés : os, estomac, prostate, organes génitaux, rein, vessie, cavité nasale, larynx, sang (lymphomes, maladie de Hodgkin, leucémie).
Cobalt	✓	✓		✓		3	7,73.10 ⁻³	Pas de VTR	85	-	Système respiratoire , mais souvent du à la co-exposition à d'autres cancérogènes (Cancer).

Cuivre	✓	✓		✓	✓	4	1,71.10 ⁰	Non cancérigène	85	-	Classé non cancérogène
Etain		✓		✓		2	2,89.10 ⁻³	Non cancérigène	85	-	Classé non cancérogène
Manganèse	✓	✓		✓		3	1,50.10 ⁻²	Non cancérigène	85	-	Classé non cancérogène
Mercure	✓	✓		✓		3	1,67.10 ⁻²	Pas de VTR	85	-	Système respiratoire (<i>Cancer du poumon</i>), Système nerveux central (<i>Cancer du cerveau</i>), Système rénal possible (<i>Cancer du rein</i>).
Nickel	✓	✓		✓	✓	4	3,54.10 ⁻¹	2,40.10 ⁻⁴ (US-EPA, 1991)	85	1,3.10 ⁵	Système respiratoire (<i>Cancers du poumon et du nez</i>).
Plomb	✓	✓		✓	✓	4	1,19.10 ⁰	1,20.10 ⁻⁵ (OEHHA, 2002)	85	1,1.10 ⁷	Système respiratoire (<i>Cancer bronchique</i>), Système rénal (<i>Cancer du rein</i>), Système gastro-intestinal (<i>Cancers gastriques, vésicaux</i>), Système nerveux (<i>Gliome</i>).
Sélénium		✓		✓	✓	3	1,76.10 ⁻⁴	Non cancérigène	85	-	Classé non cancérogène
Tellure		✓		✓		2	5,17.10 ⁻⁴	Pas de VTR	85	-	-
Thallium	✓	✓		✓		3	1,74.10 ⁻⁴	Non cancérigène	85	-	Classé non cancérogène
Vanadium	✓	✓		✓		3	2,36.10 ⁻³	Non cancérigène	85	-	Classé non cancérogène
Zinc		✓		✓		2	4,35.10 ⁻¹	Non cancérigène	85	-	Classé non cancérogène
Dioxines – Furannes	✓	✓		✓		3	6,17.10 ⁻⁷	Pas de VTR	85	-	Système tissulaire (<i>Sarcome des tissus mous</i>), Système lymphatique (<i>Lymphome malin</i>), Système gastro-intestinal (<i>Cancers de l'estomac, du pancréas</i>), Système hépatique (<i>Cancer du foie</i>), Système respiratoire (<i>Cancers du poumon, du tractus respiratoire</i>).

(*) : la correspondance entre les installations et les chiffres est la suivante : 1 = CEDLM, 2 = VALDI, 3 = VALEO, 4 = FCP, 5 = A 20.

Remarque : la durée d'exposition est estimée en considérant l'installation qui a, en premier, rejeté la molécule. C'est à dire que dans le cas où une molécule serait rejetée par plusieurs installations, on choisit la durée d'exposition correspondant à l'installation qui l'a, en premier, émise parmi toutes ces installations, de façon à adopter une position pénalisante, car majorante.

Les dates retenues pour le début du fonctionnement des installations du site sont les suivantes : 1920 pour FCP, 1923 pour VALEO, 1986 pour la CEDLM, 1989 pour l'autoroute A20 et 1999 pour VALDI LE PALAIS, en prenant comme date de référence 2005.

- a) *Une même molécule sans effet de seuil pouvant être rejetée par une ou plusieurs installation(s)*

Pour les molécules agissant sans effet de seuil, la molécule retenue est le **benzène**.

Son ratio (Flux moyen × durée / VTR) était pourtant inférieur à celui du trichloréthylène (ratios étant respectivement à $2,6 \cdot 10^9$ et $4,7 \cdot 10^{10}$). Mais ce dernier n'a pas été sélectionné, car il n'est rejeté que par une seule installation (VALEO), et il ne serait pas possible de réaliser une étude des risques cumulés sur cette zone, si on étudie un polluant rejeté par une seule installation. (En prenant le trichloréthylène, cela serait revenu à réitérer l'ERSEI faite pour VALEO).

- b) *Plusieurs molécules sans effet de seuil ayant le même organe cible, pouvant être rejetées par une ou plusieurs installation(s)*

Le choix qui a été fait ici est de ne conserver les molécules qui ont le plus fort impact, c'est à dire un ratio compris entre 10^8 et 10^{11} . Il s'agit donc du benzène et du TCE, les autres molécules ayant une contribution négligeable par rapport à ces trois molécules. Ensuite, pour sélectionner l'organe cible commun, on compare pour chacune des trois molécules, les différents système-cibles sur lesquelles elles agissent.

Tableau 7 : Nombre de système-cibles touchés par les principales molécules agissant sans effet de seuil

	$\frac{\text{Flux}_{\text{moyen}}}{\text{ERU}} \times \text{durée d'exposition}$	Système nerveux	Système respiratoire	Système génito-urinaire	Système hépatique	Système gastro-intestinal	Système sanguin
TCE	$1,3 \cdot 10^{11}$	×		×	×	×	×
Benzène	$2,0 \cdot 10^9$		×				×
Total		1	1	1	1	1	2

Le **système sanguin** est le système le plus touché, il sera donc considéré dans la suite de l'étude comme système-cible. Les molécules agissant sur ce système sont principalement le benzène et le TCE, bien que d'autres molécules aient également ce système-cible (comme le 1,3-butadiène, le chrome ou encore l'acide fluorhydrique), mais leur ratio reste négligeable devant le benzène et le TCE.

Ces molécules entraînent notamment des cancers lympho-hématopoïétiques, leucémies, maladies de Hodgkin ...

- c) *Risque cancérigène global pour l'inhalation, quel que soit l'organe cible*

Le **risque cancérigène global** sera étudié, quel que soit l'organe cible, en considérant les molécules ayant un ratio important, c'est-à-dire supérieur à 10^5 : il s'agit du benzène, du TCE, de l'acétaldéhyde, du nickel et du plomb.

3.3 Évaluation de l'exposition

3.3.1 Population exposée

Concernant les populations à considérer, l'idéal serait de prendre en compte au moins ces deux populations : la population du quartier Nord de Limoges (Beaubreuil) et la commune du Palais sur Vienne.

Compte tenu du temps disponible et du fait qu'il fallait rentrer dans le modèle de dispersion atmosphérique l'altitude de la population exposée, un choix a dû être fait de ne traiter qu'une seule population. Seule la première population sera étudiée (Beaubreuil) et les concentrations modélisées le seront en considérant l'altitude de cette population (340 mètres).

A) Recensement des populations

L'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE) a fourni les données de population du recensement de 1999 pour les communes de la zone étudiée [29], [7], [12] :

Tableau 8 : Recensement de la population générale sur le site d'étude

Communes ou quartiers	Population	Enfants de moins de 6 ans
LIMOGES	133 924	6 311
Quartier Beaubreuil – Les Homérides	5 286	Non communiqué
LE PALAIS-SUR-VIENNE	5 722	248
RILHAC-RANCON	3 648	205

B) Population sensible

Remarque : les valeurs n'ont pu être obtenues que pour la ville de Limoges, et non pour le quartier de Beaubreuil.

- o Crèches, haltes-garderie

Tableau 9 : Crèches et haltes-garderie dans le secteur d'étude

Communes	Crèches collectives	Haltes-garderie	Établissements mixtes	Capacité d'accueil totale
LIMOGES	11	3	5	895

- o Écoles maternelles et primaires

Le tableau 10 présente le nombre d'enfants scolarisés dans les écoles publiques et privées à la rentrée 2003 dans les communes présentes sur le secteur d'étude [7] :

Tableau 10 : Répartition des écoles maternelles et primaires sur le secteur d'étude

Communes	Types d'écoles	Effectif de l'école maternelle	Effectif de l'école primaire	Effectif total
LIMOGES	École publique	3 510	5 849	9 359
LE PALAIS-SUR-VIENNE	École publique	162	304	466
RILHAC-RANCON	École publique	129	208	337
LIMOGES	École privée	435	968	1 373
LE PALAIS-SUR-VIENNE	École privée	17	53	70

o Établissements sanitaires

Pour le Palais-sur-Vienne, seule une maison de retraite existe avec 80 pensionnaires. Par contre, pour Limoges, il existe pas moins de 12 maisons de retraite, ce qui représente une capacité autorisée de presque 700 pensionnaires au niveau de la ville. Ces renseignements ont été obtenus par le Fichier National des Établissements Sanitaires et Sociaux (FINESS) [26].

3.3.2 Concentrations dans l'environnement

Seules quatre des cinq activités ont pu être modélisées. Les rejets dus aux automobiles circulant sur l'autoroute A20 n'ont pu l'être, car à part des concentrations, aucun flux de ce tronçon d'autoroute n'a pu être trouvé. De plus, le modèle de dispersion atmosphérique fonctionne pour une source ponctuelle, et non pour une source linéaire comme l'A20.

3.3.3 Voie d'exposition étudiée

Trois voies d'exposition sont possibles : l'inhalation, l'ingestion et la voie cutanée. Seules les deux premières sont prépondérantes, la voie cutanée étant considérée comme négligeable devant les deux autres. Mais dans un souci de simplification, seule l'inhalation sera étudiée.

3.3.4 Scénario d'exposition

Le scénario d'exposition choisi est un scénario très pénalisant. En effet, il a été considéré comme population exposée une population qui séjournerait 24h/24, 7j/7 et 365j/an sur le quartier de Beaubreuil. Cette population correspond à une population sensible et/ou fortement exposée : personnes âgées, enfants, ou encore personnes qui restent sur cette zone pour des raisons de santé (pathologies graves ne leur permettant pas de se déplacer), personnes travaillant et résidant dans ce même quartier.

3.4 Évaluation des risques

Les résultats relatifs aux cas étudiés sont donnés Annexe 7.

3.4.1 Cas des molécules à effets de seuil : estimation des QD

A) Cas n°1 : étude du chrome

Le QD du chrome a été estimé pour des distances à la source d'émission allant de 100 m à 2 000 m, et ce, tous les 20°, de façon à couvrir la rose des vents.

Les QD maxima pour chacune de ces installations sont les suivants :

Tableau 11 : QD maxima observés pour les 4 installations concernant le 1er cas d'étude (chrome)

	CEDLM	VALDI	FCP	VALEO
QD Maximum	$1,1.10^{-1}$	$7,5.10^{-2}$	$2,7.10^{-3}$	Pas de rejet en chrome
Distance par rapport à la source	600 m et 1 000 m	100 m	100 m	×
Orientation de la rose des vents	220° et 240°	220°	220°	×

Les résultats obtenus laissent apparaître une prédominance des rejets de la CEDLM.

Cependant, le QD maximum obtenu est très inférieur aux valeurs limites communément admises ($QD < 1$).

QD = 0,10

0,06 = QD < 0,10

0,05 = QD < 0,06

0,01 = QD < 0,05

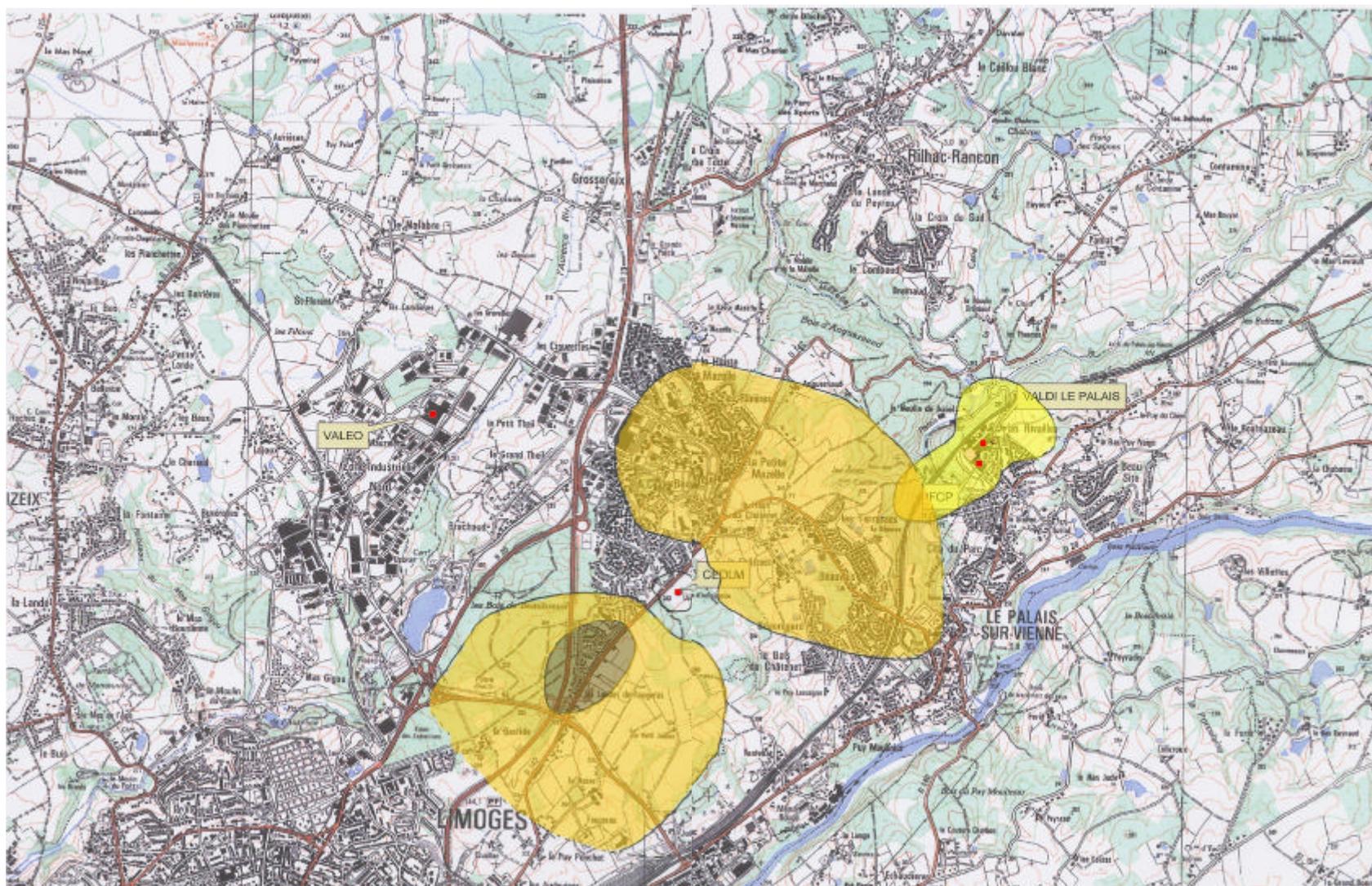


Figure 7 : Courbes d'Iso-Quotient de Danger pour le chrome – Zone industrielle Nord de la ville de Limoges

B) Cas n°2 : étude du système respiratoire

Les résultats de ce deuxième cas sont très intéressants, et ce, à deux niveaux :

- Le QD supérieur à 1 est atteint ;
- Des zones de recouvrement sont observées.

Les QD maxima pour chacune de ces installations sont les suivants :

Tableau 12 : QD maxima observés pour les 4 installations concernant le 2ème cas d'étude (système respiratoire)

	CEDLM	VALDI	FCP	VALEO
QD Maximum	0,19	0,45	2,3	0,23
Distance par rapport à la source	600 m à 1000 m	100 m	100 m	100 m
Orientation de la rose des vents	200° et 240°	220°	220°	220°

Il est à noter cependant qu'en prenant FCP seul, il y a déjà un dépassement de la valeur seuil de 1, puisque le QD maximum (retrouvé à 100 mètres de la source et orienté à 220°) est égal à 2,3. Les molécules qui contribuent le plus à cette valeur du QD de FCP sont principalement trois métaux (cadmium, cuivre et nickel). Ces trois éléments possédant tous des VTR consolidées, c'est-à-dire que ces dernières existent et n'ont pas été estimées via une dérivation voie à voie ou à partir de VLEP.

Bien qu'il soit possible d'estimer un QD global (résultats du tableau n°12) pour une installation (en sommant les QD respectifs de chaque molécule entrant en jeu dans le cas étudié), l'estimation en revanche du QD cumulé le plus grand de la zone d'étude ne peut être estimée que graphiquement, via les courbes d'Iso-QD.

En effet, sur la figure n°8, il n'a pas été possible de sommer les QD au niveau de VALDI et FCP (lieu principal des zones de recouvrement), car les courbes d'Iso-QD étaient trop rapprochées.

Dans un cas comme celui là, il faut réitérer les calculs en prenant des hypothèses plus réalistes de façon à déterminer si le risque est bien inacceptable ou si les hypothèses prises étaient trop majorantes.

Le QD dépendant de la CI et de la VTR, il faut donc regarder si un de ces deux facteurs a pu être majoré, entraînant ainsi un franchissement de la valeur seuil de 1. Une ré-estimation plus réelle des flux serait donc utile pour recalculer les QD au moyen d'hypothèses plus vraisemblables.

De plus, au vu de la dispersion des polluants, il serait plus judicieux de sélectionner la population du Palais-Sur-Vienne à la place de celle du quartier de Beaubreuil.

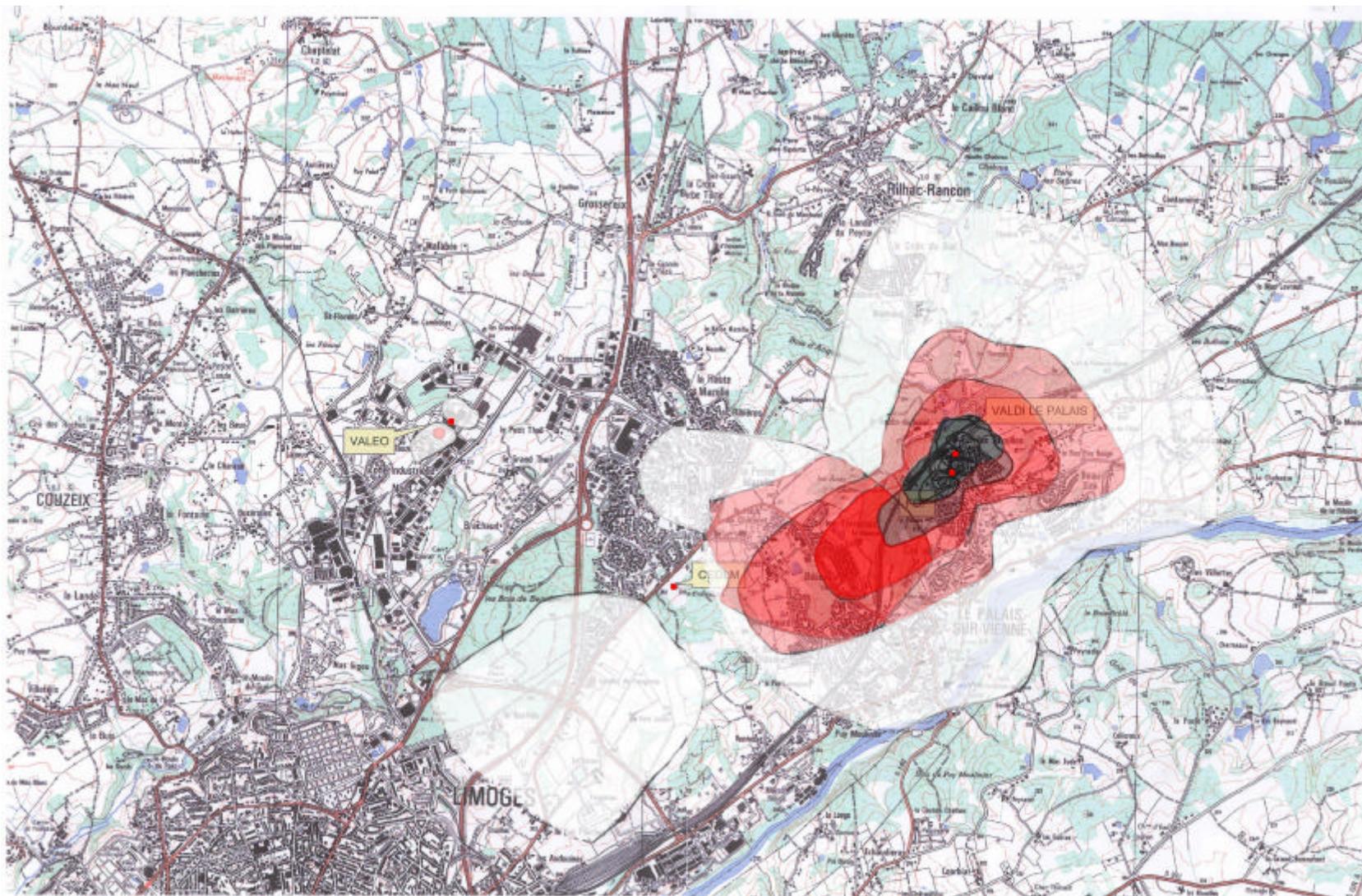


Figure 8 : Courbes d'Iso-Quotient de Danger pour le système respiratoire – Zone industrielle Nord de la ville de Limoges

3.4.2 Cas des molécules sans effets de seuil : estimation des ERI

A) Cas n°3 : étude du benzène

Les ERI maxima pour chacune de ces installations sont les suivants :

Tableau 13 : ERI maxima observés pour les 4 installations concernant le 3ème cas d'étude (benzène)

	CEDLM	VALDI	FCP	VALEO
ERI Maximum	$3,1 \cdot 10^{-11}$	$2,8 \cdot 10^{-10}$	$7,6 \cdot 10^{-11}$	$8,1 \cdot 10^{-8}$
Distance par rapport à la source	600 m et 700 m	100 m	100 m	100 m
Orientation de la rose des vents	220°	220°	220°	220°

Tout d'abord, il faut observer que le risque calculé ici pour le benzène, avec toutes les hypothèses majorantes et les incertitudes qu'il comporte, est très inférieur à la valeur repère de 10^{-6} , donc le risque est jugé comme acceptable.

L'ERI calculé le plus important est celui pour VALEO, plus de 10 fois inférieur à ce repère.

Cette installation n'est pas la seule à rejeter du benzène, mais les trois autres ICPE du site possèdent des ordres de grandeur d'ERI 100 à 1 000 fois plus faibles que VALEO. C'est pourquoi les courbes d'Iso-ERI sont à peines visibles pour la CEDLM, VALDI LE PALAIS et FCP.

ERI = 5.10^{-8}

1.10^{-8} = ERI < 5.10^{-8}

5.10^{-9} = ERI < 1.10^{-8}

2.10^{-10} = ERI < 5.10^{-9}

3.10^{-11} = ERI < 2.10^{-10}

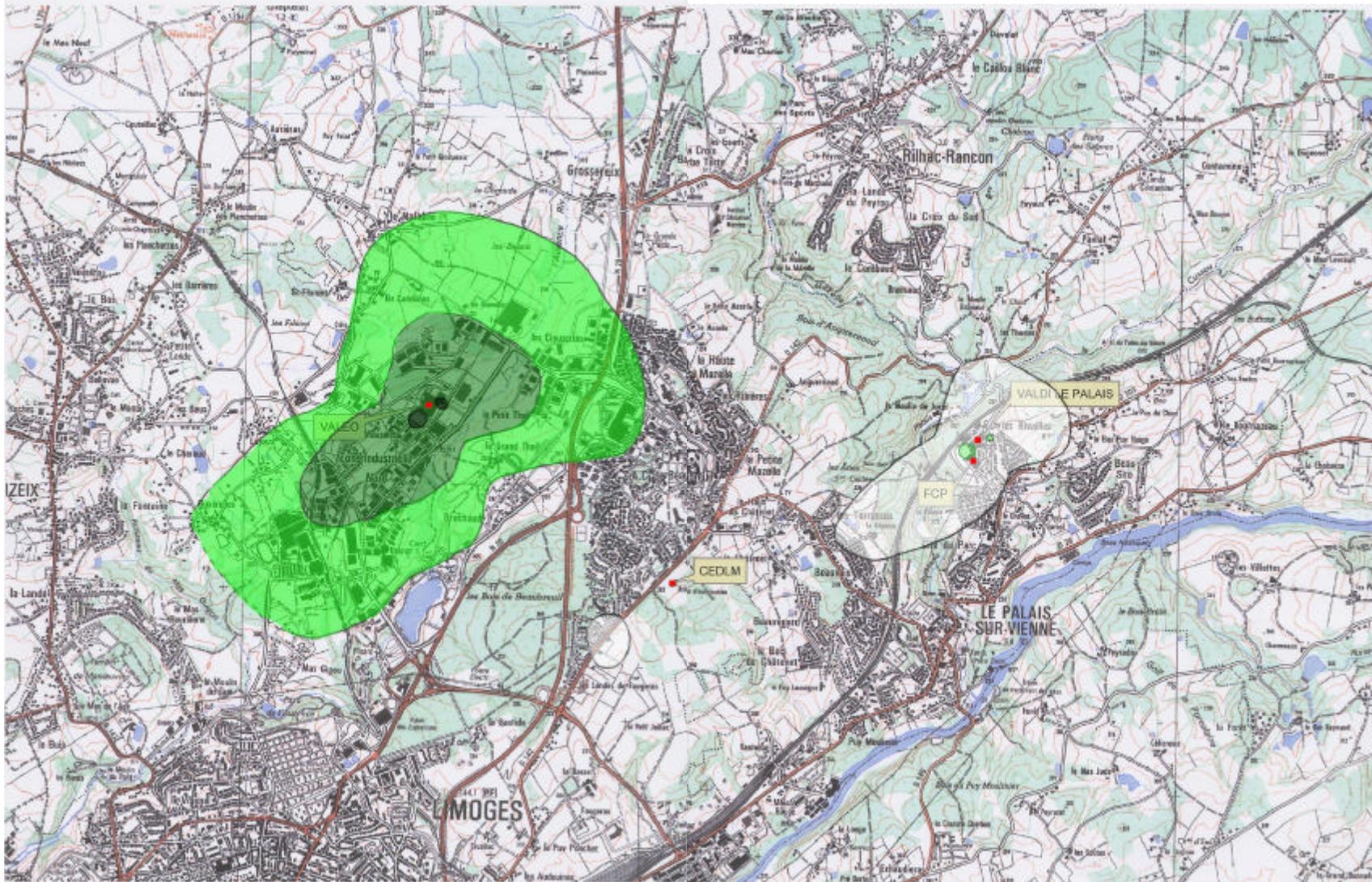


Figure 9 : Courbes d'Iso-Excès de Risque Individuel pour le benzène – Zone industrielle Nord de la ville de Limoges

B) Cas n°4 : étude du système sanguin

Les ERI maxima pour chacune de ces installations sont les suivants :

Tableau 14 : ERI maxima observés pour les 4 installations concernant le 4ème cas d'étude (système sanguin)

	CEDLM	VALDI	FCP	VALEO
ERI Maximum	$3,1 \cdot 10^{-11}$	$2,8 \cdot 10^{-10}$	$7,0 \cdot 10^{-11}$	$2,2 \cdot 10^{-7}$
Distance par rapport à la source	600 m et 700 m	100 m	100 m	100 m
Orientation de la rose des vents	220°	220°	220°	220°

Le tableau 14 présente pour le système sanguin, la même allure que pour le cas précédent (cas n°3 : benzène).

Ceci vient du fait que les molécules possédant les plus grands ratios (flux moyen \times durée / VTR) étaient le TCE et le benzène (les deux rejetées seulement par VALEO). Déjà dans le cas n°3, VALEO était l'installation entraînant le plus grand risque. Si on lui ajoute le TCE (ce dernier et le benzène agissant sur le système sanguin), la prédominance de VALEO par rapport aux autres installations ne fait qu'augmenter (on passe pour VALEO d'un ERI maximum égal à $8,1 \cdot 10^{-8}$ pour la cas n°3, à $2,2 \cdot 10^{-7}$ pour le cas présent, alors que les trois autres ICPE n'ont pas vu leur ERI augmenter de façon significative).

L'ordre de grandeur des ERI entre les 3 ICPE et VALEO est encore une fois de 1 pour 1 000 (respectivement 10^{-10} et 10^{-7}).

Cependant, il n'y a pas non plus de risque concernant le système sanguin (ERI calculé inférieur dans ce cas à 10^{-6}).

ERI = 2.10^{-7}

1.10^{-7} = ERI < 2.10^{-7}

5.10^{-8} = ERI < 1.10^{-7}

1.10^{-8} = ERI < 5.10^{-8}

2.10^{-10} = ERI < 1.10^{-8}

3.10^{-11} = ERI < 2.10^{-10}

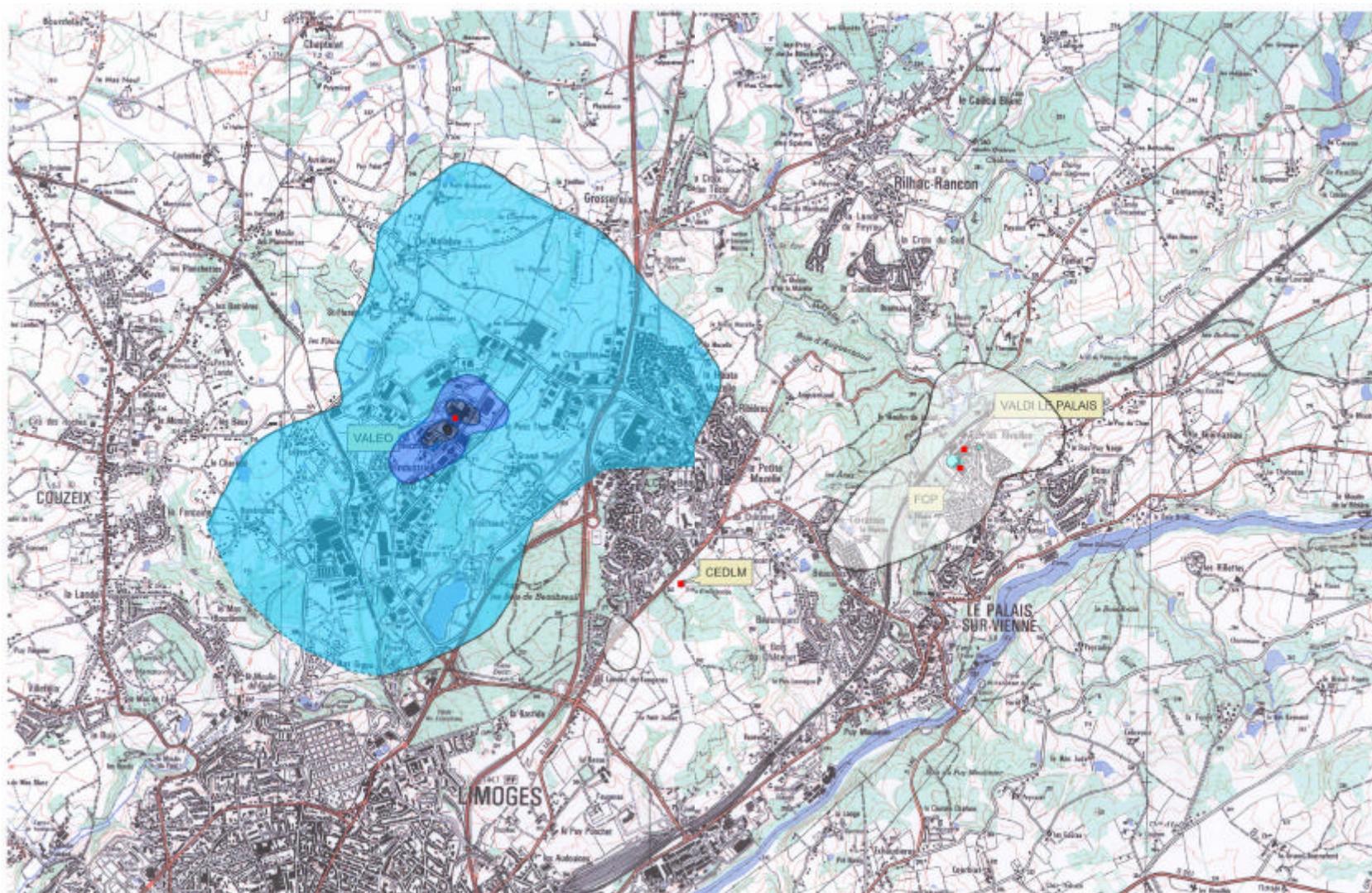


Figure 10 : Courbes d'Iso-Excès de Risque Individuel pour le système sanguin – Zone industrielle Nord de la ville de Limoges

- C) Cas n°5 : étude du risque cancérigène global pour l'inhalation, quel que soit l'organe cible

Les ERI maxima pour chacune de ces installations sont les suivants :

Tableau 15 : ERI maxima observés pour les 4 installations concernant le 5ème cas d'étude (risque cancérigène global pour l'inhalation)

	CEDLM	VALDI	FCP	VALEO
ERI Maximum	$3,6.10^{-11}$	$3,3.10^{-10}$	$5,6.10^{-9}$	$2,3.10^{-7}$
Distance par rapport à la source	600 m et 700 m	100 m	100 m	100 m
Orientation de la rose des vents	220°	220°	220°	220°

Là encore, le risque se situe principalement au niveau de VALEO, cette dernière émettant plusieurs cancérigènes : SO₂, poussières, formaldéhyde, benzène, trichloréthylène ou encore phénol.

Cependant, même en sommant tous les ERI des molécules sans effet de seuil, l'ERI global reste toutefois inférieur à 10⁻⁶.

$ERI = 1.10^{-7}$

$5.10^{-8} = ERI < 1.10^{-7}$

$1.10^{-8} = ERI < 5.10^{-8}$

$2.10^{-10} = ERI < 1.10^{-8}$

$3,5.10^{-11} = ERI < 2.10^{-10}$

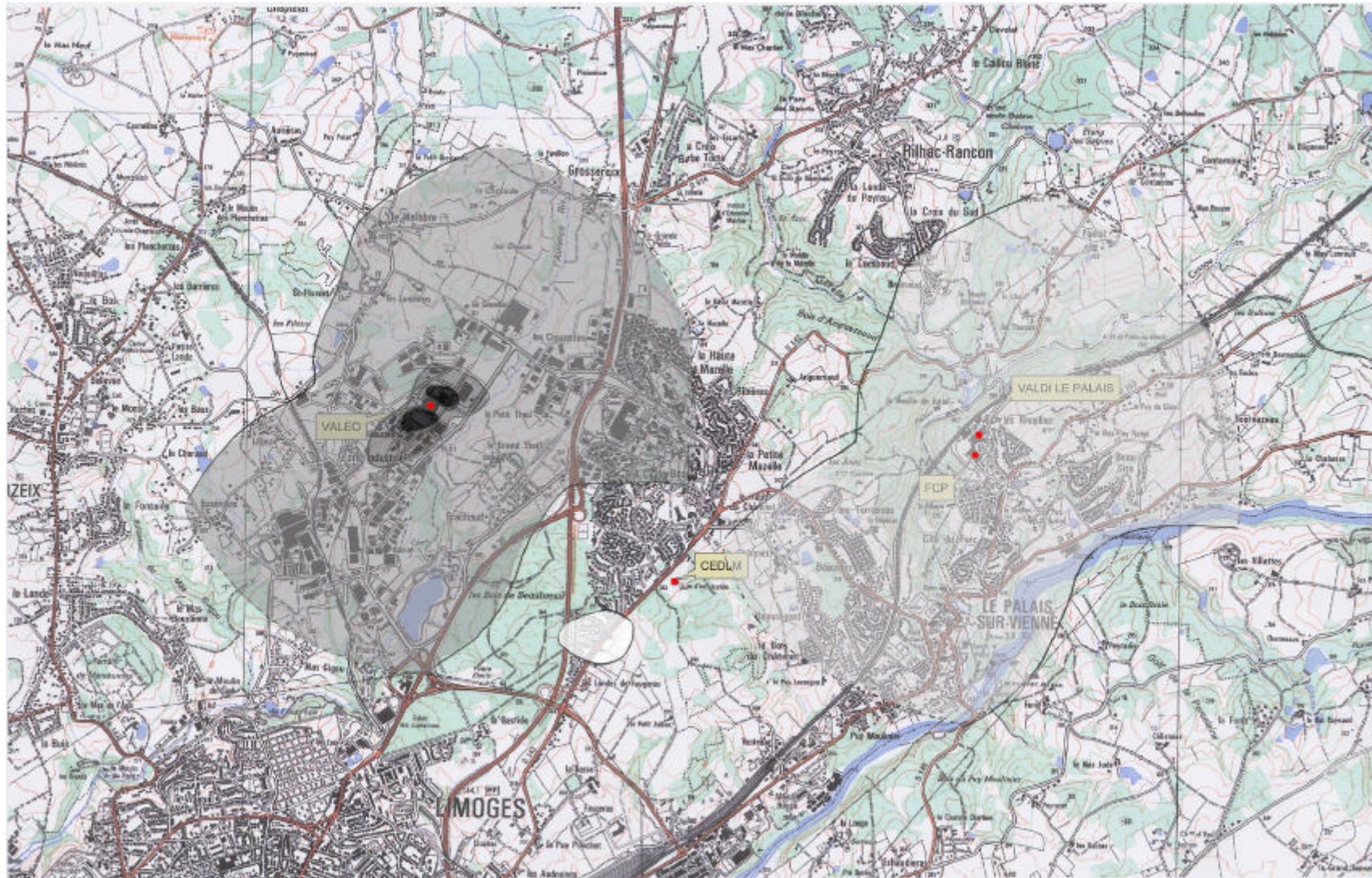


Figure 11 : Courbes d'Iso-Excès de Risque Individuel pour le risque cancérigène global – Zone industrielle Nord de la ville de Limoges

3.5 Synthèse de l'étude des risques cumulés

3.5.1 Synthèse sur l'exemple d'application au niveau de la zone industrielle de Limoges

Des 5 cas qui ont été pris comme exemple pour appliquer la démarche mise en oeuvre pour estimer les risques cumulés (le chrome et le système respiratoire pour les molécules à effet de seuil ; le benzène, le système sanguin et le risque cancérigène global pour les molécules sans effet de seuil), 4 ont des résultats en dessous des valeurs communément acceptées.

Seul le cas sur le système respiratoire (cas n°2) présente un QD cumulé supérieur à 1, ce qui correspond dans ces zones à une sur-exposition de la population. L'installation FCP dépasse à elle seule ce seuil. Il faut cependant nuancer en précisant que des hypothèses majorantes peuvent amener à ce résultat, et que de façon plus générale, la majorité des molécules agissent sur le système respiratoire. De ce fait, un grand nombre de QD de ces molécules a pu être ajouté, entraînant un QD global maximal, forcément plus important. Il sera donc nécessaire de réaliser une deuxième étude avec des hypothèses plus justes afin d'obtenir des résultats plus proches de la réalité.

Il n'a pas été possible durant ce travail d'étudier plus de 5 cas, alors que des dizaines existent... Un manque de temps, de moyens techniques (surtout informatiques), et de données scientifiques (interactions synergiques, antagonistes, additives ou indépendantes des molécules entre elles) n'ont pas permis de traiter tous les cas existants.

Dans le cadre de cette étude, la modélisation de la dispersion atmosphérique a pu mettre en évidence deux populations impactées par la pollution engendrée par la présence de ces installations : le quartier de Beaubreuil (5 286 habitants) et la commune du Palais-Sur-Vienne (5 722 habitants).

Au vu des résultats des courbes d'Iso-QD ou d'Iso-ERI, elles ne subissent pas les mêmes impacts sanitaires : le quartier de Beaubreuil serait plus soumis aux effets cancérigènes, alors que pour la deuxième population, il s'agirait principalement d'effets systémiques. Ce qui laisse entendre une hétérogénéité au niveau des expositions.

Le temps de latence de la survenue de ces effets est différent : il faut plusieurs années pour qu'un cancer se développe, alors que les pathologies dues aux effets systémiques surviennent beaucoup plus rapidement. Le nombre de cancers qui est observé aujourd'hui correspondrait à une exposition ancienne (10, voire 20 ans), alors que les effets systémiques observés seraient plutôt dus à une exposition plus récente.

Si la population venait à s'interroger sur l'impact sanitaire engendré par la présence de ces installations, il ne serait donc pas évident de mettre en place une surveillance sanitaire au niveau de ce secteur, vu que les effets ne sont pas les mêmes suivant les populations exposées.

L'historique du site devait être considéré lors de cette étude. Le présent et le futur présentant moins de difficultés, le travail s'est révélé plus difficile sur la réflexion à mener pour la prise en compte du passé. Or, des difficultés ont été rencontrées : d'une part lors de l'acquisition des données (notamment pour les flux de polluants rejetés), mais également du point de vue méthodologique :

- Pour le premier point, des données relativement complètes étaient disponibles pour les années les plus récentes, mais plus on remontait dans le temps, plus elles étaient rares, avec peu de substances analysées. Des hypothèses ont donc dû être faites pour pouvoir remonter jusqu'en 1975. Comme ce domaine de l'ERS est désormais incontournable, des fichiers d'archives des données nécessaires pourraient être créés ;

- Concernant le deuxième point, des interrogations ont vu le jour par rapport à la méthode adoptée. En effet, l'historique de chaque ICPE est différente : étalement dans le temps des années de fonctionnement (de 1920 à aujourd'hui), entreprise qui s'est scindée en 1999 en deux entreprises distinctes (FCP et VALDI), process suivant les années qui ont évolué, d'où des flux dont la valeur augmentait ou diminuait selon la période, apparition ou disparition, de ce fait, de certains composés émis dans l'atmosphère...

Même si la méthode pour intégrer le temps doit être affinée, elle a cependant le mérite d'essayer d'estimer le risque encouru pour les expositions passées. En effet, prendre les émissions d'une seule année pour estimer le risque sanitaire passé, ne permet pas de représenter la réalité des flux qui ont pu être émis au cours du temps (car les process ont pu évoluer, des installations nouvelles voir le jour et d'autres, par contre, cesser).

Une solution simplificatrice et majorante a été choisie en prenant pour chaque polluant de l'étude :

- ✓ Dans le cas des molécules à effet de seuil : pour chaque polluant et chaque année (depuis 1975), une addition des flux pour chaque ICPE a été effectuée. Puis, pour ces 30 années (de 1975 à 2005), n'a été gardé que le plus grand flux annuel émis durant cette période, en considérant donc qu'il a été le même durant cette durée, ce qui est une approche plutôt majorante ;
- ✓ Dans le cas des molécules sans effet de seuil : la même méthodologie a été appliquée, sauf qu'au lieu d'utiliser le flux maximal émis durant ces 30 années, une moyenne annuelle des flux a été calculée, et c'est cette moyenne qui a été utilisée dans les calculs (notamment dans le modèle de dispersion atmosphérique).

Il existe un certain nombre d'incertitudes liées à l'utilisation de la démarche d'évaluation des risques. Celles-ci sont dues à la fois à la modélisation de la dispersion atmosphérique et à la démarche utilisée dans le cadre de l'évaluation des risques.

Facteurs de sous-estimation des risques

- La liste des substances rejetées par les installations est-elle bien exhaustive ? ;
- Les infrastructures routières n'ont pu être considérées dans les calculs : en effet, la zone étudiée possède en plus de l'autoroute A20, une multitude de voies routières. La pollution qui est engendrée par la circulation automobile n'est certes pas négligeable et vient s'ajouter à celle dues aux ICPE avoisinantes ;
- Le temps de résidence est calculé à partir des données sur les déménagements. Il n'est donc pas tenu compte du fait que certaines personnes peuvent déménager dans la même commune et donc continuer à être exposées.

Facteurs de surestimation des risques

- Il n'a pas toujours été possible de différencier les composés pour la famille des COV. L'hypothèse majorante a été de considérer les COV entièrement sous forme de benzène, forme qui est la plus toxique. Ce qui augmente le risque par rapport à la réalité ;
- Estimation des flux : lorsque le flux pour un composé n'était pas connu pour une année, il était majoré, en prenant pour une même période de temps de découpage, le flux maximum de cette période ;
- Pour les molécules à effet de seuil, il a été pris le plus grand flux émis durant 30 ans d'exposition ;

- L'exposition des personnes est considérée, dans une hypothèse majorante, comme permanente dans le domaine d'étude, soit 24heures/24, 7jours/7 et 365 jours/an. Ce n'est certainement pas le cas, puisque les personnes peuvent être amenées à résider hors du domaine d'étude quotidiennement ou pendant certaines périodes de l'année, comme les vacances ;
- Lors de l'identification des dangers, le fait de considérer un effet, même si l'existence de cet effet peut être controversé par d'autres études épidémiologiques ou toxicologiques (approche extrêmement majorante) peut engendrer une surestimation des risques ;
- Choix des VTR : certaines VTR sont fondées sur des niveaux de risque qui ont été établis en extrapolant à l'homme des données obtenues chez l'animal par application de facteurs d'incertitudes. Les modèles mathématiques sont mis en œuvre de façon à ce que les incertitudes inhérentes à cette démarche viennent systématiquement majorer le risque évalué.

Facteurs dont l'influence des résultats n'est pas connue

- Une première incertitude concerne la validité du modèle utilisé ici pour estimer les concentrations dans l'environnement ;
- La topographie n'est introduite dans le modèle que via l'altitude du rejet et celle de la population exposée, mais pas entre les deux. Le modèle de dispersion atmosphérique utilisé ici ne prend pas en compte la topographie précise du site. Or, le site étudié se situe sur une zone vallonnée, entraînant une dispersion différente. Il demandera donc d'être affiné afin de tendre le plus justement possible vers la réalité ;
- Une autre incertitude : le fait de sommer les QD lorsque l'organe cible est le même, ou les ERI quel que soit l'organe cible ;
- Le chrome a été entièrement considéré comme étant sous forme de chrome VI. Or dans l'environnement, c'est sous sa forme trivalente qu'il prédomine ;
- La majorité des VTR choisies est fondée sur des études humaines, ce qui limite l'incertitude liée à l'extrapolation de données animales à l'homme. Par contre, la causalité des effets observés lors d'études épidémiologiques est moins certaine que celle observée expérimentalement chez des animaux, car les populations étudiées sont souvent soumises à un mélange de polluants et présentent des conditions de vie (médicaments, tabagisme) qui ne sont pas toujours maîtrisées. De même que l'extrapolation des VTR qui a été faite ici, entraîne une incertitude supplémentaire : dérivation voie à voie, utilisation des VLEP ;
- Enfin, lors du cumul des QD, il a été pris un système-cible (système respiratoire ou sanguin) comme première approche. Une approche plus fine pourrait consister à sélectionner non plus un système-cible, mais une pathologie : fréquence d'apparition dans une population (incidence ou prévalence), niveau de traitement possible ou de réversibilité, importance du niveau de handicap induit.

3.5.2 Synthèse sur la méthode développée pour l'analyse des risques cumulés

Tout d'abord, la prise en compte de l'impact global que peuvent engendrer plusieurs installations est une approche totalement émergente. De ce fait, peu d'études existent à ce jour et il n'existe pas non plus de démarche clairement établie à ce sujet.

Les forces de l'ERS

L'évaluation des risques sanitaires offre la possibilité de structurer les connaissances après avoir rassemblé différents éléments, d'avoir une vision des conséquences sur la santé humaine générées par le fonctionnement d'une installation, malgré un grand nombre d'incertitudes.

Elle permet d'avoir une idée, au cours du temps, de l'impact que cette installation a eu, a, ou aura : la modélisation et les hypothèses formulées permettent de connaître les effets dus aux rejets de l'installation dans le passé, d'évaluer actuellement ce à quoi les populations sont exposées, mais aussi, d'estimer les expositions futures et les répercussions qui leur sont liées.

Les faiblesses de l'ERS

L'évaluation des risques sanitaires est, comme son nom l'indique, une évaluation, c'est à dire une estimation des risques sur la santé, générés par l'inhalation, l'ingestion et/ou le contact cutané avec des substances.

Sous ce terme d'évaluation, est associé le terme d'incertitudes, qui sont nombreuses et de natures variées :

- D'une manière générale, l'état des connaissances scientifiques et techniques est limité de nos jours. L'étude des molécules présentes sur Terre est loin d'être entièrement terminée, de même que les dangers qu'elles peuvent engendrer. De ce fait, lors de la détermination des VTR, des facteurs de sécurité sont appliqués (lors par exemple de l'extrapolation de l'animal à l'homme) ;
- De plus, l'ERS doit certes être réalisée avec des données scientifiques, mais elle doit surtout être faite avec des données propres au site étudié, sans quoi, elle n'a aucun intérêt. Or, il est impossible de disposer de données locales complètes. En effet, l'accès à ces données n'est pas toujours aisé, l'exhaustivité des données qualitatives (nature des substances) et/ ou quantitatives (valeurs des flux rejetés, nombre d'années de fonctionnement d'une installation) est généralement difficile à obtenir ;
- Enfin, la problématique nouvelle de la co-exposition à un cocktail de substances émises par une ou plusieurs installation(s) suscite de nombreuses interrogations : la connaissance des propriétés physico-chimiques, toxicologiques ne concerne qu'une faible proportion des substances existantes. Il reste alors beaucoup de chemin à parcourir avant de connaître la toxicologie de toutes les molécules, et encore plus, les mécanismes d'action qu'engendre la co-exposition à un mélange de molécules ;
- Concernant l'additivité des QD et des ERI, des incertitudes demeurent : par exemple, en cas de synergisme, il ne faudrait peut-être pas qu'additionner les QD, mais peut-être envisager une relation multiplicative, exponentielle ou quelque'autre relation mathématique plus complexe qu'une simple addition. Pour cela, les recherches scientifiques doivent donc être poursuivies afin de gagner en connaissances et permettre à l'évaluation des risques sanitaires de prendre toute sa dimension, notamment dans le rôle d'aide à la décision.
De plus, le calcul d'ERI total pour un scénario est fondé sur l'indépendance d'action des substances en l'état actuel des connaissances, et peut conduire de plus à sommer de manière identique le risque cancérigène lié à des substances dont le niveau de preuve associé à leur pouvoir cancérigène est différent (par exemple, somme d'une substance de classe A avec une substance de classe C).

Les résultats chiffrés du risque qui, estimés, sont donc toujours à prendre avec une extrême prudence : de multiples hypothèses sont prises tout au long de la réalisation de l'étude. Ce qui fait de l'évaluation des risques, une aide à la prise de décisions, et non une fin en soi.

Enfin, en ce qui concerne la réalisation de telles études, les DDASS, Direction Régionale des Affaires Sanitaires et Sociales (DRASS) ou encore CIRE peuvent difficilement le faire. En effet, les DDASS sont chargées de formuler pour le Préfet un avis sanitaire sur les études d'impact, et non de les réaliser. De plus, elles n'ont ni le temps, ni les moyens humains et/ou techniques pour pouvoir mener à bien ce genre d'études. Ce genre de travail ne peut pas être fait non plus par une seule personne : il nécessite dans l'idéal plutôt une équipe pluridisciplinaire constituée par exemple, d'un toxicologue, d'un épidémiologiste, d'un chimiste, d'un rédacteur..., mais également d'un ou de plusieurs modèles informatiques de dispersion atmosphérique performant(s) pour apporter à l'étude une certaine puissance.

CONCLUSION

Une autre étude sur le risque global lié à l'exposition à plusieurs polluants a été réalisée également en 2005 au niveau de la zone industrielle de Dunkerque, à la demande du SPPPI Côte d'Opale-Flandre. Globalement, ces deux études suivent la même démarche pour estimer les risques sanitaires cumulés.

À l'heure où émerge une problématique grandissante sur l'estimation des risques résultants de la co-exposition à un mélange de substances, parallèlement, apparaissent les premières limites dans la réflexion à mener, notamment en ce qui concerne la connaissance des mécanismes de toxicité des cocktails de molécules. Ce qui permet de ne répondre que partiellement à cette question.

Il faut donc que les recherches scientifiques, épidémiologiques ou encore toxicologiques se poursuivent, pour pouvoir répondre au mieux à cette problématique, et ainsi permettre à l'évaluation des risques sanitaires d'être pleinement un outil dans l'aide à la décision.

Bibliographie

Sources bibliographiques :

[1] Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments (AFSSA), Institut de Veille Sanitaire (InVS). *65 questions réponses sur les incinérateurs et les dioxines*. 2005. 26 p.

[2] ARIA TECHNOLOGIES, CAREPS, SPPPI Côte d'Opale-Flandre. *Étude de l'impact des rejets industriels sur la santé des populations de l'agglomération dunkerquoise*. 2005. 74p.

[3] ARIA TECHNOLOGIES, CAREPS. *Étude de la dispersion des polluants atmosphériques et évaluation des risques sanitaires d'une installation industrielle à Limoges*. 2002. 67p.

[4] Arrêté préfectoral du 19 novembre 1986, autorisant la ville de Limoges à exploiter sur un terrain situé en bordure de l'avenue de Faugeras (CD 142) un incinérateur de résidus urbains.

[5] Association Régionale pour la Surveillance de la Qualité de l'Air en Limousin (ARQAL). *Étude de simulation de pollution atmosphérique de proximité liée au trafic routier de la ville de Limoges*. 2001. 59p.

[6] Association Scientifique et Technique de l'Eau et de l'Environnement (ASTEE). *Guide pour l'évaluation du risque sanitaire dans le cadre de l'étude d'impact d'une UIOM*. 2003. 60p.

[7] BUREAU VÉRITAS. *Volet sanitaire avec intégration de l'historique depuis 1997 de la Centrale Énergie Déchets Limoges Métropole (87)*. 2005, révision 0. 215p.

[8] Centre d'Études Techniques de l'Équipement (CETE). *Présentation des études d'impact Air et Santé lors des projets routiers réalisés : principaux polluants, effets et contributions*. Journée scientifique et technique organisée par le CETE Méditerranée : conduite et réalisation des études air et santé dans les projets routiers. 2004. 11p.

[9] Centre d'Études Techniques de l'Équipement (CETE). *Les études d'impact Air et Santé lors des projets routiers : les études d'environnement et les études d'impact sur les thèmes de l'air et la santé*. Journée scientifique et technique organisée par le CETE Méditerranée : conduite et réalisation des études air et santé dans les projets routiers. 2004. 13p.

[10] Circulaire interministérielle n°DGS/SD7B/2005/273 du 25 février 2005 relative à la prise en compte des effets sur la santé de la pollution de l'air dans les études d'impact des infrastructures routières.

[11] Demande d'autorisation de poursuivre l'exploitation d'une fonderie de cuivre au Palais-Sur-Vienne. Conseil Départemental d'Hygiène, séance du 29 mars 2005.

[12] DESBORDES C., LIVERTOUT V. La mosaïque des quartiers de Limoges et Brive-La-Gaillarde. *INSEE limousin "la revue"*, Octobre 2000, n°24, pp. 4-10.

[13] EOG, AEDIA CONSEIL MANAGEMENT ENVIRONNEMENTAL. *Valdi le Palais, Demande d'autorisation d'exploiter, site du Palais-sur-Vienne*. 2000. Premier classeur, pièce n°5, *Etude de danger, Effets des activités sur le site VALDI LE PALAIS sur la santé des populations*. pp. 144-163.

[14] Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS). *Référentiel : Évaluation des risques sanitaires dans les études d'impact des ICPE – substances chimiques*. Verneuil en Halatte. 2003. 152p.

[15] Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS). *Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France*. 3^e éd. 2005. 19p.

[16] Institut de Veille Sanitaire (InVS). *Guide pour l'analyse du volet sanitaire des études d'impact*. 2000. 49 p.

[17] Institut de Veille Sanitaire (InVS). *Valeurs Toxicologiques de Référence : méthode d'élaboration*. 2002. 84 p.

[18] Loi n° 76-629 du 10 juillet 1976, Loi relative à la protection de la nature.

[19] Loi n° 76-663 du 19 juillet 1976, Loi relative aux installations classées pour la protection de l'environnement.

[20] Loi n° 96-1236 du 30 décembre 1996, Loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie.

[21] Ministère de la Santé et de la Protection sociale, Ministère de l'Écologie et du Développement durable, Ministère de l'Emploi, du Travail et de la Cohésion sociale, Ministère délégué à la Recherche, *Plan National Santé Environnement 2004-2008*, 2004, 85p.

[22] NEDELLEC V., D. COURGEAU, P. EMPEREUR-BISSONNET. *La durée de résidence des français et l'évaluation des risques liés aux sols pollués*. *Énergie Santé* n°9, 1998. pp. 503-515.

[23] NORISKO ENVIRONNEMENT, B.R.E.U.I.L. CONSULTANT S.A.. Fonderie du Palais – Le Palais-sur-Vienne – Volet d'impact sanitaire. 2003. 47p.

[24] Organisation Mondiale de la Santé. *Particulate matter air pollution : how it harms health*. Berlin, Copenhagen, Rome, 2005.

[25] Projet d'arrêté complémentaire Centrale Énergie Déchet de Limoges. Conseil Départemental d'Hygiène, séance du 27 juillet 2004. 5p.

Sites Internet consultés :

[26] Fichier National des Établissements Sanitaires et Sociaux (FINESS). Disponible sur :
<<http://finess.sante.gouv.fr/finess/>>

[27] Site de l'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS).
Disponible sur :
<<http://www.ineris.fr/>>

[28] : Site de l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS). Disponible sur :
<<http://www.inrs.fr/>>

[29] : Site de l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE).

Disponible sur :

<http://www.insee.fr/fr/home/home_page.asp>

[30] : Site de l'International Toxicity Estimates for Risk Database (ITER). Disponible sur :

<<http://www.tera.org/iter/>>

[31] Site du Ministère de l'Équipement. Disponible sur :

<<http://www.limousin.equipement.gouv.fr/>>

[32] Site de l'Observatoire des Pratiques de l'Évaluation des Risques Sanitaires dans les Études d'Impact (OPERSEI), disponible sur :

<http://www.sante.gouv.fr/hm/dossiers/etud_impact/sommaire.htm>

[33] Site de l'Office of Environmental Health Hazard Assessment (OEHHA). Disponible sur

:

<<http://www.oehha.ca.gov/>>

[34] Site de l'Office of Environmental Health Hazard Assessment (OEHHA). Disponible sur

:

<http://www.incineration.org/svdu/liste_usine>

Glossaire

Cancérogène : Une substance est cancérogène si :

- Elle induit des tumeurs (bénignes ou malignes) ;
- Elle augmente leur incidence ;
- Elle accélère leur apparition.

Classification de l'Union Européenne (JOCE L110A) :

- **Première catégorie** : substances que l'on sait être cancérogènes pour l'homme. On dispose de suffisamment d'éléments pour établir l'existence d'une relation de cause à effet entre l'exposition de l'homme à de telles substances et l'apparition d'un cancer.
- **Deuxième catégorie** : substances devant être assimilées à des substances cancérogènes pour l'homme. On dispose de suffisamment d'éléments pour justifier une forte présomption que l'exposition de l'homme à de telles substances peut provoquer un cancer. Cette présomption est généralement fondée, sur des études à long terme sur l'animal et sur d'autres informations appropriées.
- **Troisième catégorie** : substances préoccupantes pour l'homme en raison d'effets cancérogènes possibles mais pour lesquels les informations disponibles ne permettent pas une évaluation satisfaisante. Il existe des informations issues d'études adéquates sur les animaux, mais elles sont insuffisantes pour classer la substance dans la deuxième catégorie.

Classification du Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC/IARC/OMS) :

- **Groupe 1** : l'agent (ou le mélange) est cancérogène pour l'homme.
- **Groupe 2A** : l'agent (ou le mélange) est probablement cancérogène pour l'homme. Il existe des indices limités de cancérogénicité chez l'homme et des indices suffisants de cancérogénicité pour l'animal de laboratoire.
- **Groupe 2B** : l'agent (ou le mélange) pourrait être cancérogène pour l'homme.
- **Groupe 3** : l'agent (ou le mélange) ne peut être classé pour sa cancérogénicité pour l'homme.
- **Groupe 4** : l'agent (ou le mélange) n'est probablement pas cancérogène pour l'homme.

Classification de l'Agence américaine de Protection de l'Environnement (US-EPA) :

- **Classe A** : substance cancérogène pour l'homme.
- **Classe B1** : substance probablement cancérogène pour l'homme. Des données limitées chez l'homme sont disponibles.
- **Classe B2** : substance probablement cancérogène pour l'homme. Il existe des preuves suffisantes chez l'animal et des preuves non adéquates ou pas de preuves chez l'homme.
- **Classe C** : cancérogène possible pour l'homme.
- **Classe D** : substance non classable quant à sa cancérogénicité pour l'homme.
- **Classe E** : substance pour laquelle il existe des preuves de non cancérogénicité pour l'homme.

Caractérisation du risque : Expression qualitative et quantitative du risque. Elle doit fournir aux décideurs l'ensemble des éléments permettant de comprendre ce que représente le risque évalué. Elle doit faire la part entre ce qui est connu et ce qui est incertain.

Concentration inhalée (CI) : Concentration par inhalation, à laquelle la cible est exposée en moyenne sur la durée d'exposition. Elle s'exprime en masse (mg ou µg) par unité de volume d'air (m³).

Concentration tolérable (CT) : Concentration à laquelle peut être exposée en permanence une cible par inhalation, sans apparition d'effet néfaste. Elle s'exprime comme la concentration inhalée : RfC pour l'US-EPA, MRL pour l'ATSDR, REL pour l'OEHHA.

COV : Molécules organiques dont la décomposition n'a pas été totale lors de la combustion. Elles comportent des atomes de carbone et d'hydrogène, pouvant contenir d'autres hétéroatomes comme l'oxygène, le chlore ou encore l'azote. Parmi cette famille, le sous-groupe composé par les hydrocarbonés aromatiques polycycliques (HAP) est fréquemment retrouvé, comprenant notamment le benzène (substance la plus toxique de la famille des COV) ou encore le naphthalène. Mais d'autres sous-groupes appartiennent également à cette famille, comme les cétones, les acides, les hydrocarbures saturés ou insaturés.

Danger : Effet sanitaire indésirable comme le changement d'une fonction ou d'une valeur biologique, de l'aspect ou de la morphologie d'un organe, une malformation fœtale, une maladie transitoire ou définitive, une invalidité ou une incapacité, un décès.

Dose : Quantité d'agent dangereux mise en contact avec un organisme vivant. Pour l'exposition humaine ou animale aux substances chimiques, elle s'exprime généralement en mg/kg de poids corporel/j.

Effet cancérigène : Toxicité qui se manifeste par l'apparition de cancers.

Effet systémique : Effet résultant de l'action du toxique après absorption et distribution dans différentes parties de l'organisme humain.

Emissions : Concentrations mesurées à la sortie d'une source.

Excès de Risque (ER) : Risque supplémentaire dû à une exposition spécifique par rapport au risque dans une population de référence (en général non exposée).

Excès de Risque Collectif (ERC) : Appelé aussi "impact", il représente une estimation du nombre de cancers en excès, liés à l'exposition étudiée, qui devrait survenir au cours de la vie d'un groupe d'individus.

Excès de Risques Individuel (ERI) : Probabilité que la cible a, de développer l'effet associé à une substance cancérigène pendant sa vie, du fait de l'exposition considérée.

Excès de Risques Unitaire (ERU) : Probabilité supplémentaire, par rapport à un sujet non exposé, qu'un individu contracte un cancer s'il est exposé pendant sa vie entière à une unité de dose (ou de concentration) d'une substance cancérigène. L'ERU s'exprime en (mg/kg/j)⁻¹ pour les voies orale et cutanée, ou en (mg/m³)⁻¹ pour la voie par inhalation. Cet indice est la valeur toxicologique de référence (VTR) pour les effets toxiques sans seuil. Il représente en général la pente de la borne supérieure de l'intervalle de confiance de la courbe dose-réponse.

Exposition : Désigne, dans le domaine sanitaire, le contact entre une situation ou un agent dangereux et un organisme vivant. L'exposition peut aussi être considérée comme la concentration d'un agent dangereux dans le ou les milieux pollués mis en contact avec l'homme.

Évaluation de l'exposition : Détermination ou estimation des voies d'exposition, de la fréquence, de la durée et de l'importance de l'exposition.

Évaluation de la relation dose-effet : Définit une relation quantitative entre la dose ou la concentration administrée ou absorbée et l'incidence de l'effet délétère.

Évaluation du risque sanitaire : Processus en quatre étapes qui comprend l'identification du potentiel dangereux des substances, l'évaluation de la relation dose-effet, l'évaluation de l'exposition et la caractérisation des risques.

Exposition aiguë : De quelques secondes à quelques jours.

Exposition chronique : De quelques années à la vie entière.

Exposition subchronique : De quelques jours à quelques années.

Facteurs d'incertitude : Facteurs multiplicatifs appliqués à des données toxicologiques expérimentales ou à des résultats d'études épidémiologiques pour construire une valeur toxicologique de référence.

I-TEQ : Parmi les 210 dioxines et furannes, seuls 17 présentent une toxicité, pouvant être différente d'une substance à une autre. Pour traduire cette toxicité, il a été établi un coefficient de pondération allant d'un facteur 1 pour l'élément le plus toxique (la 2,3,7,8-TCDD) à 0,0001 et ce, pour chacun des 17 composés toxiques. La mesure de toxicité d'un échantillon passe obligatoirement par la mesure quantitative de ces 17 composés toxiques, auquel est appliqué le facteur d'équivalent toxique, ce qui permet d'obtenir pour un échantillon donné sa "Teneur en Équivalent Toxique Dioxines et Furannes ou I-TEQ". La même démarche est appliquée pour les HAP, dans ce cas là, le composé le plus toxique est le benzo(a)pyrène et prend donc le coefficient de 1.

Identification du potentiel dangereux des substances : Consiste à identifier les effets indésirables qu'une substance est intrinsèquement capable de provoquer chez l'homme en s'attachant à la nature et à la force des preuves de causalité relevées entre la substance et l'effet induit.

Immissions : Concentrations dans l'air ambiant.

Modélisation : Équation mathématique permettant de reproduire un phénomène physique, biologique ou chimique. Elle est notamment utilisée pour : i) simuler le devenir et le transfert des polluants dans les différents compartiments environnementaux ; ii) quantifier l'exposition humaine pour les voies orale, cutanée et respiratoire ; iii) extrapoler la courbe dose-réponse, pour les effets cancérigènes, des fortes doses vers les faibles doses ; iv) quantifier l'excès de risque individuel ou collectif.

Quotient de Danger (QD) : Utilisé pour caractériser le risque lié aux toxiques systémiques. Il correspond à la dose (ou la concentration) journalière d'exposition divisée par la dose (ou concentration) de référence.

Organe cible : Organe ou système présentant une sensibilité particulière à une substance donnée.

Risque : Probabilité d'apparition d'un effet néfaste dans des conditions d'exposition données.

Scénario d'exposition : Définit toutes les caractéristiques physiologiques et comportementales de l'être humain qui sont utilisées pour modéliser l'exposition, notamment : l'âge, le poids, le sexe, le volume respiratoire, la surface cutanée, le budget espace-temps, l'activité réalisée sur le site, la consommation alimentaire, l'ingestion de sol, etc.

Seuil d'effet : Niveau d'exposition au-dessous duquel aucun effet n'est attendu.

Substance dangereuse : Molécule capable de provoquer un effet toxique chez l'homme et faisant l'objet d'une classification internationale au titre de la directive européenne 67/548/CE.

VLE : Valeur Limite de Moyenne d'exposition à court terme, dont le respect permet d'éviter le risque d'effets toxiques immédiats ou à court terme. La VLE est une valeur plafond mesurée sur une durée maximale de 15 minutes.

VME : Valeur Limite de Moyenne d'Exposition destinée à protéger les travailleurs des effets à terme, mesurée ou estimée sur la durée d'un poste de travail de 8 heures. La VME peut être dépassée sur de courtes périodes sous réserve de ne pas dépasser la VLE lorsqu'elle existe.

VTR : Les Valeurs Toxicologiques de Référence sont des indices toxicologiques établis par des instances internationales (OMS) ou des structures nationales (ATSDR, US-EPA, Health Canada, RIVM, ...). Elles sont généralement spécifiques d'un effet donné, d'une voie et d'une durée d'exposition.

Liste des annexes

Annexe 1 : Description du mode de fonctionnement et de l'historique des installations présentes sur le site de la zone industrielle Nord de la ville de Limoges et faisant l'objet de la présente étude

Annexe 2 : Force et directions du vent sur le secteur d'étude

Annexe 3 : Dérivation voie à voie – Estimation des VTR à partir des VLEP

Annexe 4 : Dénomination des VTR des bases de données toxicologiques utilisées dans le cadre de cette étude

Annexe 5 : Analyse du potentiel dangereux des éléments émis sur le secteur d'étude

Annexe 6 : Description du modèle de dispersion atmosphérique utilisé (paramètres et équations utilisés)

Annexe 7 : Résultats de la modélisation pour la zone industrielle Nord

Annexe 1 : Description du mode de fonctionnement et de l'historique des installations présentes sur le site de la zone industrielle Nord de la ville de Limoges et faisant l'objet de la présente étude

CEDLM : Centrale Énergie Déchets de Limoges Métropole

1. Caractérisation du site et de son environnement

La CEDLM est l'Usine d'Incinération des Ordures Ménagères (UIOM), propriété de la Communauté d'Agglomération de Limoges. Elle est gérée par la société STVL, appartenant au groupe ONYX.

Son implantation se situe au niveau de la zone industrielle Nord de Limoges, dans une zone péri-urbaine. Le terrain est délimité au Nord/Nord-Ouest par la départementale 142 et par des bois dans les autres directions [7].

2. Historique du site

La CEDLM a commencé à fonctionner en 1986. Plusieurs arrêtés préfectoraux se sont succédés. De 2 fours d'incinération à ses débuts, avec une capacité de fonctionnement de 75 000 t/an, elle est passée à 3 fours sans accroissement de capacité en 1991, puis en octobre 1997, une augmentation de la capacité a permis d'incinérer 90 000 t/an. Dernièrement, l'arrêté du 20 septembre 2002 a entraîné la mise en conformité de l'usine au 1^{er} janvier 2005, la capacité de fonctionnement passant quant à elle à 110 000 t/an [25], [4].

3. Fonctionnement de l'installation et le process mis en œuvre

Cette installation incinère les DIB (Déchets Industriels Banals) et les ordures ménagères et assimilées via trois lignes de fours, dont la capacité de traitement est d'environ 5 t/h chacune [34]. La période de fonctionnement est de 8170 h/an pour chaque ligne.

Chaque ligne d'incinération est composée de la manière suivante :

- Une trémie de chargement de four ;
- Un four équipé d'une chambre de combustion et d'une chambre de post-combustion des gaz ;
- Une chaudière permettant de récupérer la chaleur sous forme d'énergie électrique et thermique ;
- Un dispositif de traitement des fumées
 - Pour les lignes 1 et 2 : le traitement des fumées commence par une neutralisation par voie humide (injection de lait de chaux), suivie d'un dépoussiérage au moyen d'un électrofiltre ;
 - Pour la ligne 3 : le traitement des fumées se fait par voie semi-humide (neutralisation des gaz issus de la combustion des déchets dans la tour d'atomisation dans laquelle du lait de chaux est injecté), puis captation des poussières au moyen d'un filtre à manches. ;
- Un ventilateur permettant l'extraction des fumées vers les cheminées.

Chaque ligne d'incinération est arrêtée une fois tous les 3 à 4 mois pendant une semaine pour effectuer la maintenance. Par ailleurs, l'usine est totalement arrêtée durant 3 à 7 jours chaque année en septembre.

4. Substances émises et flux rejetés

a) *Substances émises*

Les polluants se retrouvent en quantité et en qualité variables dans les fumées d'incinérateur. Leur présence peut provenir de la combustion incomplète des déchets, mais elle peut être également inhérente à la nature des déchets incinérés.

Les progrès dans les techniques d'incinération, de même que les traitements effectués sur les fumées en sortie de four de l'incinérateur ont permis de réduire de façon considérable les polluants rejetés dans l'atmosphère [6].

Les polluants retrouvés dans les fumées peuvent être regroupés en trois grandes catégories : les polluants gazeux, les polluants solides des fumées (dont les poussières et les métaux lourds) et les composés organiques volatils (COV).

Les substances émises par la CEDLM sont regroupées dans le tableau n°16 :

Tableau 16: Substances émises par la CEDLM

Centrale Énergie Déchets de Limoges Métropole	Substances	
	Gaz de combustion	Oxydes d'azote (NOx)
		Dioxyde de soufre (SO ₂)
		Monoxyde de carbone (CO)
		Acide chlorhydrique (HCl)
		Acide fluorhydrique (HF)
	COV totaux	
	Poussières	
	Métaux particuliers (et gazeux pour certains)	Arsenic (As)
		Cadmium (Cd)
		Chrome (Cr)
		Cuivre (Cu)
		Mercuré (Hg)
		Nickel (Ni)
Plomb (Pb)		
Dioxines-furannes		

b) Estimation des flux rejetés

Dans le cadre de la présente étude, trois périodes principales ont été considérées pour estimer les flux rejetés par la CEDLM. Ces périodes représentent des évolutions dans le fonctionnement et les capacités de traitement de l'installation :

1. Période n°1 : 1986 - 1996 : usine fonctionnant avec deux lignes de four avec une capacité de 75 000 t/an ;
2. Période n°2 : 1997 - 2004 : accroissement de la capacité de l'installation à 90 000 t/an et mise aux normes suite à l'arrêté ministériel du 25 janvier 1991 ;
3. Période n°3 : 2005 et après : augmentation de la capacité de fonctionnement à 110 000 t et mise en conformité de l'installation selon l'arrêté du 20 septembre 2002.

Les estimations des rejets atmosphériques de la CEDLM pour ces trois périodes sont déterminées grâce aux données disponibles. Or, ces dernières sont très hétérogènes suivant les années, certaines années ne possédant même pas de valeurs chiffrées. Une revue des données existantes, ainsi qu'une hiérarchisation de celles-ci sont donc nécessaires pour permettre d'estimer le plus justement possible les rejets de l'incinérateur durant ces trois périodes.

Plusieurs documents font référence aux rejets atmosphériques de la CEDLM :

- Les mesures annuelles réalisées par un organisme indépendant (elles sont faites principalement par AIF Services) sur certains paramètres comme les teneurs en O₂, CO₂, CO, H₂O, NOx, poussières, HCl, métaux, etc... Les données sont plus nombreuses en terme de polluants analysés que pour l'autosurveillance. Par contre, les campagnes de mesures ne sont généralement réalisées qu'une seule fois dans l'année pour chacun des fours, et elles sont donc

moins représentatives du fonctionnement de l'usine que des mesures ponctuelles mensuelles ;

- Les mesures d'auto-surveillance mensuelles réalisées par la CEDLM pour les paramètres suivants : poussières, O₂, HCl et oxyde de carbone, données fournies par la DRIRE.

L'avantage de l'auto-surveillance réside dans le fait que ce sont des données mensuelles, donc représentant bien le fonctionnement de l'usine. Cependant, seuls les paramètres concernant les poussières, les rejets en HCl et en O₂ sont disponibles, ce qui est loin d'être exhaustif en ce qui concerne les rejets que peut occasionner une usine d'incinération. De plus, ces mesures étant réalisées par la CEDLM, il sera judicieux de comparer ces données à celles réalisées par l'organisme de contrôle indépendant ;

- Les rejets atmosphériques étudiés lors de l'ERSEI datant de février 2005 et rédigé par le bureau d'études VERITAS. Il s'agit d'une synthèse des valeurs des flux de 1997 à 2004 réalisée par les organismes indépendants de contrôle (AIF, APAVE notamment), puis une estimation de ces flux à partir de 2005.

Remarque : il est à noter que le point de départ retenu pour réaliser cet ERSEI correspond à la date du 13 octobre 1997, et ne prend donc pas en compte l'impact des rejets dus aux premières années de fonctionnement (de 1986 à 1996 compris).

Aussi, doit être réalisé un compromis pour pallier au mieux ce manque de données : les mesures annuelles de l'organisme indépendant de contrôle seront utilisées en priorité, car un plus grand nombre de polluants est mesuré.

Période n°1 : 1986 – 1996

Pour cette première période, des lacunes dans les données disponibles sont relativement importantes.

En effet, les principales données sont issues de l'auto-surveillance réalisées par la CEDLM (sur les seuls paramètres : poussières, HCl, O₂, et certaines fois, oxyde de carbone), ainsi que des mesures annuelles réalisées par un organisme indépendant de contrôle (nombre de paramètres analysés supérieurs à celui de l'auto-surveillance).

Cependant, dans un souci de simplification, les données retenues seront celles de l'année 1996 qui étaient les plus complètes et seront appliquées à cette période.

Pour obtenir les flux annuels rejetés par la CEDLM pour cette période, il faut multiplier les concentrations trouvées précédemment par le débit horaire des fumées (données fournies par le constructeur) et par le nombre annuel d'heures de fonctionnement de l'usine. Soit :

$$\text{Flux annuel} = \text{Concentration} \times \text{Débit des fumées} \times \text{Nombre annuel d'heures de fonctionnement}$$

Avec :

- **Concentration** (mg/Nm³) : les valeurs retenues pour les concentrations par le bureau d'études correspondent au minimum entre les valeurs limites d'émission de l'arrêté du 20 septembre 2002 et celles issues du guide de l'ASTEE [6] ;
- **Débit horaire des fumées** (Nm³/h) : pour les lignes 1 et 2, le débit sec à 11% d'O₂ est égal à 21 736,5 Nm³/h, et pour la ligne 3, il vaut quant à lui 21 768,2 Nm³/h, d'après les données des constructeurs ;
- **Nombre annuel d'heures de fonctionnement** : 8170 h (d'après les calculs réalisés par le bureau d'études VERITAS).

Tableau 17 : Flux de polluants émis par la CEDLM durant la première période de fonctionnement

Substances rejetées par la CEDLM durant la première période de fonctionnement	Flux estimé (t/an)
SO ₂	6,16.10 ⁰
NO ₂	2,74.10 ¹
CO	5,44.10 ⁰
HCl	2,72.10 ⁰
HF	1,63.10 ⁻¹
Poussières	5,08.10 ⁰
Benzène	7,25.10 ⁻¹
Arsenic	3,63.10 ⁻⁴
Cadmium	7,25.10 ⁻⁴
Chrome	4,17.10 ⁻³
Cobalt	1,27.10 ⁻⁴
Cuivre	1,99.10 ⁻³
Manganèse	1,45.10 ⁻³
Mercuré	1,81.10 ⁻⁵
Nickel	3,08.10 ⁻³
Plomb	8,52.10 ⁻³

Pour les substances dont il est communément admis qu'elles sont rejetées par ce type d'installation, mais qui à l'époque n'étaient pas mesurées (cas des dioxines, de l'antimoine et du naphthalène notamment), le choix a été fait d'estimer leur flux tout de même, en considérant la valeur maximale émise lors des deux périodes suivantes (périodes n°2 et3) afin de ne pas sous-estimer le risque.

Période n° 2 : 1997 – 2004

Pour ces sept années, les données de l'organisme indépendant de contrôle sont disponibles, et les mesures de l'auto-surveillance le sont pour les années 2000 à 2003.

Le bureau d'étude VERITAS (ERSEI de février 2005) a récupéré les mesures réalisées par les organismes indépendants de contrôle des rejets atmosphériques pour les trois lignes de four de la CEDLM durant ces sept années. Puis il a effectué la moyenne des flux horaires entre les années 1997 et 2004 inclus.

Pour obtenir les flux annuels de chaque polluant rejeté par la CEDLM pour cette période, il faut multiplier les flux horaires déterminés par VERITAS par le nombre annuel d'heures de fonctionnement de l'usine. Soit :

Flux annuel = Flux horaire × Nombre annuel d'heures de fonctionnement
--

Avec :

- **Flux horaire** (Nm³/h) : le flux horaire est calculé pour chaque polluant ;
- **Nombre annuel d'heures de fonctionnement** : 8170 h (d'après les calculs réalisés par le bureau d'études VERITAS).

Tableau 18 : Flux de polluants émis par la CEDLM durant la deuxième période de fonctionnement

Substances rejetées par la CEDLM durant la deuxième période de fonctionnement	Flux total rejeté (t/an)
NOx	$1,3.10^2$
SOx	$5,3.10^1$
CO	$2,7.10^1$
HCl	$8,2.10^0$
HF	$2,0.10^{-1}$
Poussières	$1,3.10^1$
Benzène	$1,6.10^0$
Naphtalène	$1,6.10^0$
Antimoine	$2,7.10^{-1}$
Arsenic	$6,3.10^{-3}$
Cadmium	$7,5.10^{-3}$
Chrome total	$6,0.10^{-2}$
Chrome VI	$6,0.10^{-3}$
Cobalt	$2,2.10^{-4}$
Cuivre	$1,5.10^{-2}$
Manganèse	$2,6.10^{-2}$
Mercure	$3,4.10^{-2}$
Nickel	$5,9.10^{-3}$
Plomb	$8,9.10^{-2}$
Vanadium	-
Dioxines - Furannes	$7,1.10^{-7}$

Période n°3 : 2005 et après

Pour cette période, les données utilisées s'appuieront sur la modélisation des concentrations estimées par le bureau d'études VERITAS [7] pour les rejets de la CEDLM à partir du 1^{er} janvier 2005.

Pour cela, ce bureau a dû formuler certaines hypothèses, car il n'avait pas à sa connaissance les futurs procédés de traitement des fumées, donc les performances exactes en termes de rejets atmosphériques au moment de la rédaction de son étude. En considérant que les caractéristiques thermodynamiques des trois lignes d'incinération restent inchangées, il a pu faire une estimation des teneurs en polluant dans les rejets atmosphériques :

Tableau 19 : Flux de polluants émis par la CEDLM durant la troisième période de fonctionnement

Substances rejetées par la CEDLM durant la troisième période de fonctionnement	Flux total rejeté (t/an)
NOx	$1,1.10^2$
SOx	$2,7.10^1$
CO	$2,7.10^1$
HCl	$5,4.10^0$
HF	$5,4.10^{-1}$
Poussières	$5,4.10^0$

Benzène	$5,9.10^0$
Naphtalène	$5,6.10^0$
Antimoine	$2,7.10^{-1}$
Arsenic	$5,3.10^{-3}$
Cadmium	$2,7.10^{-2}$
Chrome total	$1,6.10^{-2}$
Chrome VI	$1,6.10^{-3}$
Cobalt	-
Cuivre	-
Manganèse	$1,1.10^{-2}$
Mercure	$2,7.10^{-2}$
Nickel	$2,7.10^{-2}$
Plomb	$1,3.10^{-1}$
Vanadium	-
Dioxines - Furannes	$5,3.10^{-8}$

FCP : Fonderie de Cuivre du Palais

1. Caractérisation du site et de son environnement

Le site FCP (Fonderie de Cuivre du Palais) jouxte le site de VALDI LE PALAIS, au Nord-Est de la ville de Limoges. La superficie totale du site est de 29 395 m², pour une surface totale bâtie de l'usine de 7 400 m² comprenant :

- Un bâtiment principal abritant notamment les deux fours ;
- Deux bâtiments annexes pour le stockage des réfractaires et vestiaires, bureaux ;
- Et un bâtiment de 176 m² pour le stockage des matières premières.

2. Historique du site

L'histoire de FCP est commune à celle de VALDI LE PALAIS jusqu'en 1999. En effet, ces deux installations appartenaient toutes deux à la CGE (Compagnie Générale d'Électricité) au moment de leur vente.

En 1917, la Société Hydro-Électrique et Métallurgique du Palais (SHEMP) est créée pour fonder une unité de raffinage électrolytique de cuivre. La fonderie d'anodes et l'atelier d'électrolyse sont exploités à partir de 1920.

De 1920 à 1926, l'usine développe une activité de fonderie d'argent et de traitement de nitrate d'argent. En contrebas du site, au sud, une activité de production de ferro-cérium a été exploitée.

En 1927, une fonderie (2 fours à arcs) produit des wire-bars, billettes et plateaux, à l'Ouest du futur hall de stockage.

Une fonderie de métaux légers est construite en 1931, située à l'emplacement actuel de FCP, son activité cesse en 1956.

À partir de 1932, la Compagnie Générale d'Électrometallurgie (CGEM), filiale de la Compagnie Générale d'Électricité (CGE) contrôle cette unité.

En 1942, un troisième four électrique est exploité pour la fonderie de billettes et de plateaux.

En 1968, une nouvelle fonderie de wire-bars est exploitée, avec l'implantation d'un four ASARCO à l'Est du site. Depuis 1976, ce four est utilisé pour la fabrication de billettes.

En 1994, CGEP démarre l'exploitation d'une activité de valorisation de déchets cuivreux et de régénération de l'acide sulfurique.

En 1999, suite à la chute du cours du cuivre, la société CGEP revend une partie de ses installations à FCP (filiale de la CGEP) qui reprend les activités et le périmètre de la Fonderie Produits Finis, initialement exploitée par la CGEP, et une autre partie est revendue à VALDI LE PALAIS (filiale à 100% de la société VALDI).

3. Fonctionnement de l'installation et le process mis en œuvre [11], [23]

FCP a pour vocation la production de billettes de cuivre destinées à l'industrie des pièces électriques. Il est à noter que le produit fini contient plus de 99,9% de cuivre, mais la présence d'autres métaux à l'état de trace n'est pas à exclure : cadmium, mercure, thallium, plomb, chrome, etc...

La capacité de la production s'élève à 56 000 tonnes de billettes par an.

a. Matières premières

Les matières premières utilisées par FCP sont principalement des pièces de cuivre (cathodes ou chutes de fabrications nobles). Il arrive que la matière première soit un alliage cuprophosphoré destiné à certaines applications sanitaires (7% de la production annuelle).

b. Process utilisé

Ces matières premières sont fondues dans le four vertical ASARCO, équipé de 15 brûleurs à gaz. Le cuivre liquide qui sort de ce four à 1 100°C est acheminé vers le four électrique à induction qui le maintient à une température de 1 200°C.

A la sortie de ce four, la machine de coulée semi-continue fait la mise en forme par la production simultanée de 3 à 5 billettes de 7 mètres de long et de diamètre variant de 175 à 300 mm.

c. Le traitement des poussières

Les vapeurs produites par le four de fusion ASARCO sont extraites par aspiration. Ces rejets circulent dans un échangeur de chaleur et sont ensuite traitées par filtration dans une unité équipée de manchons filtrants. Ce procédé permet d'abattre la majorité des polluants particuliers. Ces derniers sont dans des big-bags d'une tonne, puis sont ensuite fermés et collectés par une société spécialisée.

Remarque : De la chaux (Ca(OH)₂) peut être injectée dans la gaine de sortie des gaz en aval du four ASRACO et en amont de l'échangeur à plaques.

4. Substances émises et flux rejetés

a) Substances émises

Dans le dossier de l'ERSEI de FCP [23], la liste des substances qui seraient rejetées à l'atmosphère propose les éléments suivants :

Tableau 20 : Substances émises par FCP

FCP	Substances	
	Gaz de combustion	Oxydes de soufre (SO ₂)
		Oxydes d'azote (NOx)
		Acide fluorhydrique (HF)
		Acide chlorhydrique (HCl)
	Poussières	
	COV totaux	Benzène
		Toluène
		Xylène
	Métaux particuliers (et gazeux pour certains)	Antimoine (Sb)
		Arsenic (As)
		Cadmium (Cd)
		Chrome (Cr)
		Cobalt (Co)
		Cuivre (Cu)
		Étain (Sn)
		Manganèse (Mn)
		Mercure (Hg)
		Nickel (Ni)
		Plomb (Pb)
		Sélénium (Se)
		Tellure (Te)
	Thallium (Tl)	
Vanadium (V)		
Zinc (Zn)		
Dioxines-furannes		

b) *Estimation des flux rejetés*

Deux périodes sont à considérer : de 1920 à 1998 (exploitation par CGEP), puis à partir de 1999 (fonctionnement de FCP).

Première période : 1920-1998

Pour cette première période, les seuls résultats disponibles sont ceux fournis par la DRIRE : il s'agit des résultats de l'auto-surveillance de la CGEP entre les années 1992 et 1998. Les poussières, le cuivre, le plomb, le zinc, le nickel et le cadmium sont les paramètres mensuellement mesurés.

FCP se rapprochant le plus de part son process aux activités de la CGEP, les valeurs des rejets seront entièrement attribués à FCP pour cette première période (on considérera donc pour VALDI que ses rejets ne débiteront qu'après 1999).

Tableau 21 : Flux de polluants émis par FCP durant la première période de fonctionnement

Substances rejetées par FCP durant la première période de fonctionnement	Flux total rejeté (t/an)
SOx (exprimé en SO ₂)	6,1.10 ⁻¹
NOx (exprimé en NO ₂)	1,1.10 ¹
HF	3,4.10 ⁻²
HCl	7,5.10 ⁻²
Poussières	3,6.10 ⁻¹
Benzène	1,6.10 ⁻¹
Toluène	4,3.10 ⁻²
Xylène	3,9.10 ⁻²
Antimoine	8,8.10 ⁻⁵
Arsenic	7,3.10 ⁻³
Cadmium	1,2.10 ⁻¹
Chrome	8,8.10 ⁻⁵
Cobalt	1,8.10 ⁻⁴
Cuivre	2,6.10 ⁰
Étain	1,8.10 ⁻⁴
Mercuré	7,0.10 ⁻³
Manganèse	2,5.10 ⁻³
Nickel	4,8.10 ⁻¹
Plomb	1,9.10 ⁰
Sélénium	8,8.10 ⁻⁵
Tellure	8,8.10 ⁻⁵
Thallium	8,8.10 ⁻⁵
Vanadium	2,6.10 ⁻⁴
Zinc	6,7.10 ⁻¹
Dioxines-furannes	1,8.10 ⁻⁷

Les mesures réalisées lors de l'auto-surveillance remontent jusqu'en 1992. Pour les années ne possédant pas de valeurs pour certaines molécules, le flux maximum mesuré lors de la deuxième période de fonctionnement leur sera automatiquement attribué pour celles-ci (si la valeur est mesurée).

Deuxième période : à partir de 1999

Différents rapports d'inspection réalisés par Norisko permettent de disposer de certaines données concernant les substances rejetées par FCP.

Mais les valeurs des émissions retenues sont celles contenues dans l'ERSEI réalisé en 2002 [14], c'est à dire les concentrations en sortie de la cheminée du four de fusion ASARCO.

Tableau 22 : Flux de polluants émis par FCP durant la deuxième période de fonctionnement

Substances rejetées par FCP durant la deuxième période de fonctionnement	Flux total rejeté (t/an)
SOx (exprimé en SO ₂)	6,1.10 ⁻¹
NOx (exprimé en NO ₂)	1,1.10 ⁻¹
HF	3,4.10 ⁻²
HCl	7,5.10 ⁻²
Poussières	1,4.10 ⁻¹
Benzène	1,6.10 ⁻¹
Toluène	4,3.10 ⁻²
Xylène	3,9.10 ⁻²
Antimoine	8,8.10 ⁻⁵
Arsenic	8,8.10 ⁻⁵
Cadmium	8,8.10 ⁻⁵
Chrome	8,8.10 ⁻⁵
Cobalt	1,8.10 ⁻⁴
Cuivre	2,8.10 ⁻³
Étain	1,8.10 ⁻⁴
Mercuré	7,0.10 ⁻³
Manganèse	2,5.10 ⁻³
Nickel	1,8.10 ⁻⁴
Plomb	5,3.10 ⁻⁴
Sélénium	8,8.10 ⁻⁵
Tellure	8,8.10 ⁻⁵
Thallium	8,8.10 ⁻⁵
Vanadium	2,6.10 ⁻⁴
Zinc	1,8.10 ⁻³
Dioxines-furannes	1,8.10 ⁻⁷

VALDI LE PALAIS

1. Caractérisation du site et de son environnement

Le site de la société VALDI LE PALAIS se situe dans le secteur dit "Des Rivailles" à 1 km du centre de la commune du Palais-sur-Vienne. Elle-même se situe à environ 5 km au Nord-Est de la ville de Limoges.

L'usine est entourée de zones boisées au Nord et à l'Ouest, et d'une zone d'habitations au Sud. Au-delà des bois, à 4 km à l'Ouest du site se trouve la zone industrielle Nord de la ville de Limoges et la zone d'habitations de Beaubreuil.

La superficie du site est de 38 672 m², dont 14 669 m² de zones bâties et 38 000 m² de surfaces couvertes totales.

2. Historique du site

Le début du fonctionnement de VALDI commence en 1999, à la suite de la fission de la CGEP.

3. Fonctionnement de l'installation et le process mis en œuvre [13]

Le but des activités de VALDI LE PALAIS est la valorisation des éléments métalliques et des éléments minéraux issus des industries diverses, comme la sidérurgie, la chimie, la pétrochimie ou encore la mécanique.

Le métal est vendu aux utilisateurs pour la fabrication d'acier à outils sous forme d'alliage titré, c'est à dire comportant des compositions connues de fer, cobalt, molybdène, nickel, vanadium, tungstène. Les alliages fabriqués sont par exemple : le ferro-nickel, le ferro-nickel-chrome, le ferro-nickel-molybdène, le ferro-nickel-molybdène-chrome, le ferro-bore ou encore les alliages nickelés.

Les éléments minéraux sont à quant à eux valorisés soit en interne pour la constitution du laitier, soit en externe en substitution de matériaux extrait du milieu naturel, soit en remblaiement.

Selon la note descriptive contenue dans le dossier de demande d'autorisation d'exploiter du site du Palais-sur-Vienne en date d'octobre 2000, la production des alliages était de 309 tonnes sur la période d'exploitation de 3 mois en 1999, et les perspectives estimées au moment de l'élaboration de ce dossier étaient une production de 9 500 tonnes en 2004.

a. Les co-produits reçus sur le site de VALDI LE PALAIS

Les co-produits pré-traités, valorisés sur le site forment 8 grandes familles :

- Les piles ;
- Les boues d'hydroxydes métalliques (BHM) ;
- Les catalyseurs ;
- Les crasses et battitures ;
- Les composés d'oxydes métalliques ;
- Les composés du carbone ;
- Les boues organiques contenant des métaux et des minéraux ;
- Les co-produits minéraux (secs ou humides).

La quantité annuelle maximale valorisée est de 60 000 tonnes.

b. Les pré-traitements de ces co-produits

En fonction de la nature des co-produits, ils vont subir différents pré-traitements de façon à optimiser les phases de valorisation aval :

- Co-produits autres que les piles (produits minéraux grossiers et laitiers) : le concassage, le broyage, le déferrailage, le criblage ;
- Pour ce qui concerne les piles, les techniques voisines à celles vues précédemment sont également employées : le tri, le broyage, le déferrailage et le criblage. ;
- La pelletisation : elle est utilisée pour les co-produits secs de très faible granulométrie auxquels on rajoute les liants (eau, mélasse, liant minéral de type silicate) dans le but de reconstituer des granulés aux caractéristiques physiques adaptées à leur valorisation. Cette opération a l'avantage de limiter l'envol des produits de faibles densités ;
- Le filtre-presse : cette technique est adoptée pour les boues provenant du traitement des boues de la station d'épuration de la CGEP, ou encore des boues organiques contenant des métaux, voire des boues contenant des minéraux. Ces boues sont placées entre deux filtres verticaux du filtre-presse, puis pressées pour les compacter, ce qui leur enlève une forte proportion d'eau ;
- Le four de séchage (BHM) et le four de séchage-fusion : ces deux fours de séchage permettent de réduire la teneur en eau contenue dans les co-produits. Il est à noter que lors de ce process, des fines particules sèches peuvent être formées, mais elles sont captées par un des systèmes de filtration présents sur le site ;
- Le grillage : enfin, la dernière méthode fait référence au phénomène de calcination. Il s'agit de l'élimination des teneurs en soufre et en carbone présentes dans les co-produits destinés au four de fusion, ceci est réalisé à haute température (850-900°C) et en milieu oxydant.

c. La valorisation des co-produits

- Le briquetage : cette opération consiste à faire une transformation d'éléments minéraux (contenant de la chaux, de l'alumine de la silice ou encore de la magnésie) sous forme de briquettes de ciment ;
- La calcination pré-réduction : l'objectif de ce procédé est de modifier la structure des co-produits (broyat de piles, BHM, composés d'oxydes) pour favoriser la phase ultérieure de fusion. Cette modification est obtenue par une augmentation progressive de la température en présence de réducteurs ;
- La fusion : ce procédé permet de fondre les co-produits à près de 1 600 °C, puis d'effectuer une réduction qui assure le transfert des éléments métalliques oxydés du laitier vers le métal ;
- Le four d'affinage : l'objectif est d'obtenir à partir d'un alliage présentant des caractéristiques "grossières" de composition, un alliage possédant des paramètres bien précis sur la teneur en métaux.

d. Le traitement des fumées

Plusieurs traitements des fumées sont présents sur le site :

- La post-combustion : elle se réalise en présence d'un excès d'air et à une température de 850°C permettant d'assurer une combustion complète des gaz ;

- L'injection de produits pulvérulents (bicarbonate de sodium, chaux ou charbon actif) dans la veine gazeuse. Ceux-ci captent les polluants par des phénomènes physico-chimiques d'absorption, complexation et/ou neutralisation ;
- Le refroidissement : La température des gaz est abaissée par injection d'air additionnel jusqu'à près de 150°C pour éviter une détérioration des manches du filtre ;
- Filtration : à l'aide d'un filtre à manches (filtration des fumées par voie sèche). Une aspiration est créée à l'intérieur des manches en tissus composant le filtre, et les poussières se colmatent à l'extérieur des manches, l'air filtré est évacué.

La température de ces gaz à l'exhaure de la cheminée est de 105°C maximum.

Les origines des différents rejets sont les suivants :

- Pour les prétraitements des co-produits : le four de séchage BHM, le four de séchage-fusion et le grillage ;
- Pour la valorisation des co-produits: la calcination pré-réduction, le four de fusion et le four d'affinage.

4. Substances émises et flux rejetés

a) *Substances émises*

Les substances rejetées par VALDI LE PALAIS ont été étudiées lors de la rédaction de l'ERSEI réalisée en octobre 2000 [13], et lors des mesures réalisées par un organisme indépendant de contrôle (notamment NORISKO). Par rapport à ces sources de données disponibles, les substances émises dans l'atmosphère par le site du Palais sont donc les suivantes :

Tableau 23 : Substances émises par VALDI LE PALAIS

VALDI LE PALAIS	Substances	
	Gaz de combustion	Dioxyde de soufre (SO ₂)
		Monoxyde de carbone (CO)
		Oxydes d'azote (NO _x)
		Acide fluorhydrique (HF)
		Acide chlorhydrique (HCl)
	Poussières	
	COV totaux	
	Métaux particuliers (et gazeux pour certains)	Antimoine (Sb)
		Arsenic (As)
		Cadmium (Cd)
		Chrome (Cr)
		Cobalt (Co)
		Cuivre (Cu)
		Étain (Sn)
		Manganèse (Mn)
		Mercure (Hg)
		Nickel (Ni)
		Plomb (Pb)
		Sélénium (Se)
Tellure (Te)		
Thallium (Tl)		
Vanadium (V)		
Zinc (Zn)		
Dioxines-furannes		

b) *Estimation des flux rejetés*

Le début de fonctionnement de VALDI LE PALAIS date de 1999. Aucun changement dans le process n'est connu à ce jour, donc il n'y a qu'une seule période de fonctionnement à considérer : celle débutant à partir de 1999.

Période de fonctionnement : à partir de 1999

Depuis 1999, relativement peu de données sont disponibles quant aux rejets de la société VALDI LE PALAIS : des mesures réalisées par un organisme tiers compétent (Norisko dans le cas présent) en 2002, ainsi que quelques données d'auto-surveillance entre octobre 2003 et janvier 2004 sur les paramètres suivants : température, débit, teneurs en O₂, CO, COV_{totaux} et en poussières.

Les analyses effectuées par Norisko en 2002 sont les plus complètes, ce seront donc celles qui seront prises en compte pour estimer les flux annuels rejetés par l'installation lors de cette période.

Tableau 24 : Flux de polluants émis par VALDI LE PALAIS durant la période de fonctionnement à partir de 1999

Substances rejetées par FCP durant la période de fonctionnement	Flux total rejeté (t/an)
SO ₂	2,4.10 ¹
CO	5,9.10 ⁰
NOx	ND ^(*)
Acide fluorhydrique	6,1.10 ⁻²
Acide chlorhydrique	9,6.10 ⁻²
Poussières	1,7.10 ¹
COV totaux	2,2.10 ⁰
Antimoine	3,0.10 ⁻⁴
Arsenic	5,3.10 ⁻⁴
Cadmium	4,6.10 ⁻⁴
Chrome	2,0.10 ⁻³
Cobalt	3,3.10 ⁻²
Cuivre	2,4.10 ⁻³
Étain	1,2.10 ⁻²
Manganèse	2,2.10 ⁻²
Mercure	1,8.10 ⁻⁴
Nickel	1,2.10 ⁻²
Plomb	5,7.10 ⁻³
Sélénium	3,9.10 ⁻⁴
Tellure	1,9.10 ⁻³
Thallium	3,8.10 ⁻⁴
Vanadium	9,3.10 ⁻³
Zinc	2,8.10 ⁻²
Dioxines-furannes ^(**)	5,4.10 ⁻¹⁰

(*) ND : non déterminé

(**) : estimation des rejets en dioxines : dans les résultats des prélèvements utilisés pour estimer les flux en polluants rejetés, il n'y avait pas eu d'analyses en dioxines. Cependant, durant cette même année, des analyses avaient été faites quelques mois plus tard. Seuls le four électrique et le convertisseur ont été prélevés pour déterminer la teneur en dioxines. Une estimation du flux annuel en dioxines a donc été réalisée à partir de ces données.

VALEO

1. Caractérisation du site et de son environnement

La société VALEO est située dans la zone industrielle Nord, à 5 km de la ville de Limoges. L'ensemble du site possède une superficie de 12,5 ha, mais la partie bâtie ne l'est que sur 2,5 ha.

2. Historique du site

Fondée en 1923, la Société Anonyme FERODO, regroupement de plusieurs fabricants français d'équipement automobiles, change en 1980 et devient le groupe VALEO qui est aujourd'hui parmi les principaux équipementiers mondiaux, travaillant avec les constructeurs automobiles et de véhicules industriels.

L'usine de Limoges fait partie de l'activité Matériaux de Friction, appartenant à la branche Transmission parmi les 10 branches existantes.

Jusqu'en 1986, l'usine fabriquait des garnitures de freins (en majorité) et d'embrayages. Depuis 1987, l'usine s'est spécialisée sur les Matériaux de Friction pour les garnitures d'embrayages. Cette activité Matériaux de Friction est le principal producteur mondial de couronnes d'embrayages.

La capacité de production pour l'usine de Limoges est d'environ 37 millions de pièces par an [3].

3. Fonctionnement de l'installation et le process mis en œuvre [3]

a. Matières premières

Les produits utilisés sont de différentes natures :

- Les produits entrant dans la composition du ciment (avant la phase d'imprégnation) : soufre, baryte, résine phénolique, noir de carbone, oxyde de zinc, caoutchoucs, latex, trichloréthylène (TCE), litharge, gilsonite, résine mélamine, hexaméthylène tétramine, talc, zircon, adipate d'octyle, pétrole ;
- Les fils textiles (composés de fibres minérales, synthétiques et métalliques) ;
- Les produits de base des colles : méthyléthylcétone, alcool éthylique et colle thermodurcissable ;
- Les produits qui entrent dans la composition de bain anti-poussières : solution de latex et solution de polyvinylalcool ;
- Et enfin, des produits divers comme l'acide phosphorique, de la potasse, de l'huile hydraulique, du trichloréthylène ou encore de l'anti-collant.

b. Process utilisé

Les garnitures d'embrayage sont réalisées par la compression à chaud d'un fil (constitué à base de fibres de verre, de fibres textiles et de fil de cuivre) imprégné dans un liant.

Première étape : préparation du liant.

Le liant est préparé à partir des différents produits (sous forme de poudre) : soufre, résine phénolique et mélamine, noir de carbone, oxyde et sulfure de plomb, baryte et caoutchouc synthétique préalablement découpé.

Comme le liant est un liquide visqueux, il sera utilisé comme solvant du liant du trichloréthylène (TCE).

Deuxième étape : l'imprégnation.

Le fil va s'imprégner du liant ainsi préparé lors de son passage dans la tour d'imprégnation, puis il va passer dans une phase de séchage (chauffage à 120°C) où le trichloréthylène est évaporé. ce fil est alors récupéré dans des fûts cylindriques.

Depuis 1993, VALEO a développé une technique qui, au lieu de prendre le trichloréthylène comme solvant du liant, utilise de l'eau. L'application de ce processus en phase aqueuse fonctionne depuis 2001. Les composants constitutifs du liant sont les mêmes que précédemment, à la différence qu'il n'y a plus dans ce cas précis d'oxyde et du sulfure de plomb, et que le caoutchouc est remplacé par du latex.

Troisième et dernière étape : la fabrication de la pièce.

Le fil imprégné va être moulé par des presses hydrauliques via une compression à chaud (200°C) dans les préformes définies. Puis, après l'enlèvement des bavures de cuisson, les couronnes d'embrayage vont subir une surcuisson dans des étuves électriques ou dans un four tunnel où la résine se polymérise et le caoutchouc se vulcanise. Ce traitement thermique s'effectue par palier de température. Après rectification et perçage de la couronne, une double surcuisson facultative peut avoir lieu. Enfin ont lieu un traitement anti-poussières pour supprimer les "émissions de poussières" sur le produit final, ainsi que l'assemblage par collage des couronnes d'embrayage sur des supports en acier de faible épaisseur.

Il est à noter que certains supports subissent avant le collage, un dégraissage en phase vapeur dans un bac (1m³) de trichloréthylène.

c. Traitement des fumées

Les effluents gazeux passent par un système de traitement thermique qui élimine par pyrolyse les COV (formol et phénol) présents lors de la phase d'imprégnation.

Lors de la phase de fabrication, certaines mesures sont prises pour limiter la diffusion de poussières ou des effluents gazeux :

- les presses hydrauliques de même que les étuves lors de la surcuisson possèdent des extracteurs de fumées, le four tunnel est quant à lui équipé d'un système de traitement thermique par pyrolyse des effluents gazeux et odorants) ;
- lors de l'ébavurage, de la rectification et du perçage des couronnes, les poussières sont aspirées.

4. Substances émises et flux rejetés

c) Substances émises

Différentes opérations génèrent des rejets gazeux ou des poussières.

Les seules données disponibles en ce qui concerne les substances rejetées dans l'atmosphère par VALEO sont contenues dans le ERSEI de l'étude d'impact de l'installation [3]. Cet ERSEI, réalisé en janvier 2002 par ARIA Technologie et le CAREPS, a pris en compte les polluants suivants lors de l'étude de dispersion :

Tableau 25 : Substances émises par VALEO

VALEO	Substances	
	Gaz de combustion	Oxydes d'azote (NOx)
		Dioxyde de soufre (SO ₂)
	Poussières	
	COV	Formol (formaldéhyde)
		Phénol
		TCE
	Ammoniaque (NH ₃)	
	Dioxines-furannes	

d) *Estimation des flux rejetés*

Concernant cette installation, deux périodes sont à envisager :

- Depuis le début du fonctionnement de VALEO (depuis 1923) jusqu'à l'année 2001, date de mise en application du process en phase aqueuse d'imprégnation du fil, où le solvant du liant n'est plus à base de TCE mais à base d'eau ;
- La période à partir de 2002.

Les données des rejets qui ont pu être récupérées sont donc les suivantes :

- Les rejets de TCE de 2000 à 2004 inclus fournis par la DRIRE ;
- Les flux en poussières, SO₂, cuivre, plomb, COV et NOx (assimilé aux SO₂) pour l'année 2000 ;
- Les données de rejets de 2000 utilisées dans l'ERSEI [3] pour réaliser l'étude de dispersion des polluants ;
- Le rapport d'inspection du contrôle des rejets atmosphériques des installations de l'extraction fosse et de la tour d'imprégnation par Norisko, effectué du 09/12/02 au 30/01/03.

Première période : 1923-2001

A défaut de posséder les valeurs des rejets de cette installation depuis le début de son fonctionnement, il faut pouvoir tout de même les estimer. L'année 2000 étant une année de forte production, la prendre en compte permettra d'avoir des résultats les plus majorants possibles concernant les rejets dans l'atmosphère. Les émissions seront considérées identiques pour les autres années de cette période.

Tableau 26 : Flux de polluants émis par VALEO durant la première période de fonctionnement

Substances rejetées par VALEO durant la première période de fonctionnement	Flux total rejeté (t/an)
TCE	708,2
Phénol	2,7
Formaldéhyde	3,2
NH ₃	5,5
SO ₂	17,7
Poussières	8,7
COV	201,4
NOx	27,3

Deuxième période : à partir de 2002

Seul le rapport d'inspection fournit des données valables pour la deuxième période de fonctionnement. Tous les équipements n'ont pas été analysés : il n'y a que l'extraction fosses et les modules n° 3 et 4 de la tour d'imprégnation qui aient fait l'objet de prélèvements, et ce, pour les paramètres poussières, COV totaux et TCE. A défaut de posséder d'autres données, les résultats suivants seront retenus pour la suite de l'étude.

Tableau 27 : Flux de polluants émis par VALEO durant la deuxième période de fonctionnement

Substances rejetées par VALEO durant la deuxième période de fonctionnement	Flux total rejeté (t/an)
TCE	444,3
Poussières	0,1
COV	85,3

Certaines substances n'ont pas pu être mesurées durant cette deuxième période. Il faut tout de même estimer leur flux au risque sinon de sous-estimer l'impact, puisque ces composés sont tout de même rejetés. Pour cela, l'approximation qui sera faite sera d'affecter les valeurs des mesures, pour les composés qui ont fait l'objet de mesures lors de la première période de fonctionnement, à cette deuxième période.

Autoroute A 20

1. Caractérisation du site et de son environnement

Cette autoroute – l'Occitane A 20 –, débute à Vierzon et se prolonge jusqu'au sud de Brive. Elle traverse donc cinq départements et deux régions sur une longueur de 280 km [31]. Le tronçon concerné par la présente étude se situe au Nord de Limoges sur une dizaine de km.

2. Historique du site

Cette portion d'autoroute a été construite durant les années 1989-1990.

3. Substances émises et flux rejetés

a) *Substances émises*

Les documents élaborés d'une part par LIMAIR (anciennement ARQAL) durant l'été 2001 [5], ainsi que la présentation des études d'impact Air et Santé lors des projets routiers réalisés, organisée par le CETE (Centre d'Études Techniques de l'Équipement) [8], [9] présentent les principaux polluants atmosphériques émis par les véhicules :

- **CO₂** : produit par l'oxydation complète du carbone contenu dans les carburants ;
- **CO** : provient d'une combustion imparfaite (défaut d'air) ou réalisée dans de mauvaises conditions (températures trop basses) ;
- **NO_x** : ce sont principalement les **NO** et **NO₂** qui sont retrouvés en sortie du pot d'échappement, suite à une combinaison à haute température de l'azote et de l'oxygène de l'air dans la chambre de combustion des moteurs thermiques. Le NO est généralement retrouvé à hauteur de 60 à 80% ;
- **O₃** : Cette molécule est retrouvée dans la stratosphère où elle permet de filtrer les rayons ultraviolets. Mais dans la troposphère, ce polluant est appelé polluant secondaire par suite de réactions photochimiques, notamment à partir des NO_x.
- **COV** : les plus importants du point de vue sanitaire sont les aldéhydes (**formaldéhyde** et **acétaldéhyde**), le **benzène** et le **1,3-butadiène** ;
- Les **particules** proviennent soit d'une combustion incomplète du carburant et du lubrifiant, soit de phénomènes d'usures et de frottement. Certains HAP peuvent se retrouver à la surface de ces particules ;
- **SO₂** : formé à partir du soufre contenu dans le carburant ;
- Des métaux, le principal retenu étant le **plomb**, mais également le **chrome**, le **cuivre**, le **nickel** ou encore le **sélénium**.

Tableau 28 : Substances émises par les véhicules circulant sur l'A 20

AUTOROUTE A20	Substances		
	Monoxyde d'azote (NO)		
	Dioxyde de d'azote (NO ₂)		
	Dioxyde de carbone (CO ₂)		
	Dioxyde de soufre (SO ₂)		
	Monoxyde de carbone (CO)		
	Ozone (O ₃)		
	COV	formaldéhyde	
		acétaldéhyde	
		benzène	
		1,3-butadiène	
	Particules		
	Métaux	Chrome	
Cuivre			
Nickel			
Plomb			
Sélénium			

b) Estimation des flux rejetés

Lors de la rédaction de l'étude de simulation de pollution atmosphérique de proximité liée au trafic routier sur la ville de Limoges (ARQAL, 2001), une campagne de mesures avait été effectuée sur 55 points au niveau de la ville et dans ses proches environs [5]. Sur ces mesures, deux concernent la portion Nord de l'autoroute A20 correspondant au secteur de cette étude (un premier point de prélèvement au niveau de l'échangeur de la Technopôle, l'autre au niveau de la rue Aristide Briant).

Les résultats des mesures ne concernent que les paramètres suivants : benzène, particules PM 10, NO₂, CO et COV. Les autres substances rejetées par les automobiles circulant sur l'A 20 n'ont pas été mesurées lors de cette campagne d'analyses. L'avantage de ces mesures réside dans le fait que les valeurs sont le reflet réel de ce qui se passe à l'échelle locale. A noter également que les données présentées dans le tableau XXX sont des concentrations (en µg/m³) et non des flux, contrairement aux quatre ICPE étudiées.

Tableau 29 : Flux de polluants émis par les véhicules circulant sur l'A20

Substances rejetées par les automobiles circulant sur l'autoroute A 20	Moyenne des concentrations rejetées des deux sites (µg/m ³)
Benzène	6
PM 10	23,45
NO ₂	117,5
CO	1163
COV	42,75

Annexe 2 : Force et direction du vent sur le secteur d'étude

La moyenne entre les années 1998 à 2002 de la force et la direction du vent pour le secteur sont les suivants (source Météo-France Limoges) :

Orientation du vent (°)	2 à 5 m.s ⁻¹ en % du temps	5 à 8 m.s ⁻¹ en % du temps	> 8 m.s ⁻¹ en % du temps	Total En % du temps
20	3,1	1,7	0,1	4,9
40	3,3	1,7	0,1	5,2
60	3,7	1,5	0,1	5,4
80	4,3	1,3	0,1	5,7
100	3,9	1,1	0,1	5,0
120	2,6	0,4	0,0	3,0
140	2,2	0,4	0,0	2,6
160	3,1	0,6	0,0	3,6
180	3,6	0,8	0,0	4,4
200	4,5	1,3	0,0	5,7
220	5,7	2,4	0,1	8,2
240	5,9	1,5	0,0	7,8
260	3,5	0,6	0,0	4,1
280	2,2	0,2	0,0	2,4
300	2,4	0,3	0,0	2,7
320	2,5	0,5	0,0	3,0
340	2,9	1,1	0,1	4,1
360	3,2	1,5	0,1	4,8
Total	62,5	18,9	1,0	82,4

Annexe 3 : Dérivation voie à voie – Estimation des VTR à partir des VLEP

DÉRIVATION VOIE À VOIE :

- Pour les substances à effet de seuil :

La valeur toxicologique pour l'inhalation dérive de la VTR pour l'ingestion comme le montre la formule suivante :

$$VT_i = \frac{VTR_o \times P \times FA_o}{V_{resp} \times FA_i}$$

avec :

- VTR_o : Valeur toxicologique de référence par voie orale (mg/kg/j) ;
- VT_i : Valeur toxicologique par inhalation dérivée de la VTR par voie orale (VTR_o) en mg/m^3 ;
- V_{resp} : volume respiratoire de la cible en m^3/j ;
- P : poids corporel de la cible en kg ;
- FA : facteur d'absorption – fraction de la dose d'exposition qui passe dans le corps à travers les barrières de la peau, du système digestif, des poumons ;

De même, la valeur toxicologique par voie orale dérivée de la VTR par inhalation est la suivante :

$$VTo = \frac{VTR_i \times V_{resp} \times FA_i}{P \times FA_o}$$

Remarque : Il sera considéré dans le cadre de cette étude – dans un souci de simplification, qu'il y a une absorption dans l'organisme de 100% aussi bien pour les substances inhalées que pour les substances ingérées, et ce dans le but de se placer dans une approche majorante. Donc $FA_i = FA_o = 1$.

Les calculs seront effectués pour une personne pesant 70kg.

- Pour les substances à effets sans seuil, les formules de dérivation sont les suivantes :

$$ERU_i \text{ extrapolé} = \frac{ERU_o \times V_{resp} \times FA_i}{P \times FA_o}$$

et

$$ERU_o \text{ extrapolé} = \frac{ERU_i \times P \times FA_o}{V_{resp} \times FA_i}$$

Remarque : à noter que si une substance est classée cancérigène pour une voie et non cancérigène pour une autre, il n'y a pas lieu de réaliser une dérivation voie à voie pour les effets cancérigènes.

DÉTERMINATION D'UNE VTR À PARTIR DES VLEP (Valeur Limite d'Exposition Professionnelle).

Elle se détermine à partir de la formule suivante :

$$VT_{VLEP} = VLEP \times \frac{VR_{8h}}{VR_{24h}} \times \frac{JE_T}{JE_D} \times \frac{DE_T}{DE_D} \times \frac{1}{Fa}$$

avec :

- **VLEP** : Valeur Limite d'Exposition Professionnelle (mg/m^3) ;
- **VT_{VLEP}** : Valeur Toxicologique issue des VLEP (mg/m^3) ;
- **VR_{8h}** : Volume Respiratoire moyen pendant une journée de travail (10 m^3) ;
- **VR_{24h}** : Volume Respiratoire moyen sur 24 heures (20 m^3) ;
- **JE_T** : Nombre de jours au travail pendant la semaine (5 j) ;
- **JE_D** : Nombre de jours au domicile pendant la semaine (7 j) ;
- **DE_T** : Nombre d'années d'exposition sur le lieu de travail (40 ans) ;
- **DE_D** : Nombre d'années possibles d'exposition à l'installation (70 ans) ;
- **Fa** : Facteur d'ajustement pour la prise en compte des individus sensibles absents de la population des travailleurs et pour la qualité des données (= 100).

Il existe une différence entre l'évaluation des risques sanitaires pour les travailleurs sur site de celle de la population riveraine. Cependant, lorsque aucune VTR n'existe pour la population générale, et qu'il est impossible de faire une dérivation de VTR voie à voie, il peut-être admis de pouvoir prendre en compte (lorsqu'elle existe) la valeur limite d'exposition professionnelle.

Les VLEP utilisées ici sont celles proposées par l'INRS en tant que VME (Valeur Moyenne d'exposition) [15], par l'ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) via les TLV (Threshold Limit Value) et les TWA (Time Weighted Average) pour les Etats-Unis ou encore les valeurs allemandes MAK (Maximale ArbeitsplatzKonzentrationen). Une dérivation pour une autre voie d'exposition est interdite, sauf dans le cas où il est possible de justifier que les données disponibles autorisent cette pratique.

Cependant, bien que cette méthode des VLEP s'appuie sur les données toxicologiques et épidémiologiques existantes, son mode d'élaboration par les organismes compétents dans ce domaine manque de transparence, de même la justification des valeurs retenues. De ce fait, une incertitude émaille donc la valeur toxicologique qui en découle pour la population générale, de même que le Quotient de Danger qui sera évalué.

Annexe 4 : Dénomination des VTR des bases de données toxicologiques utilisées dans le cadre de cette étude

Organismes	Effets à seuil – déterministes – non cancérigènes		Effets sans seuil – probabilistes – cancérigènes	
	<i>Inhalation</i> (mg/m ³)	<i>Ingestion</i> (mg/kg/j)	<i>Inhalation</i>	<i>Ingestion</i>
US-EPA http://www.epa.gov/iris/index.html	Reference Concentration (RfC)	Reference Dose (RfD)	Excès de Risque Unitaire par inhalation (ERU_i) (mg/m ³) ⁻¹	Excès de Risque Unitaire par ingestion (ERU_o) (mg/kg/j) ⁻¹
ATSDR http://www.atsdr.cdc.gov/toxpro2.html	Minimal Risk Level (MRL)	Minimal Risk Level (MRL)		
OMS http://www.who.int/en/	Concentration Admissible dans l'Air (CAA)	Dose Journalière Admissible ou Tolérable (DJA ou DJT) Tolerable Daily Intake (TDI)	Excès de Risque Unitaire par inhalation (ERU_i) (mg/m ³) ⁻¹	Excès de Risque Unitaire par ingestion (ERU_o) (mg/kg/j) ⁻¹
RIVM http://www.rivm.nl/en/	Tolerable Concentration in Air (TCA)	Tolerable Daily Intake (TDI)	Cancer Risk from Inhalation Exposure (CR_i mg/m ³)	Cancer Risk from Oral Exposure (CR_o en mg/kg/j)
Health Canada http://www.hc-sc.gc.ca/hecs-sesc/exsd/psap.htm	Concentration Admissible dans l'Air (CAA)	Dose Journalière Admissible (DJA)	Concentration Tumorigène : concentration totale dans l'air induisant une augmentation de 5% de l'indice des tumeurs ou de la mortalité attribuable à des tumeurs	Dose Tumorigène : dose totale ingérée induisant une augmentation de 5% de l'indice des tumeurs ou de la mortalité attribuable à des tumeurs (CT_{0,05} en mg/kg/j)

			(DT _{0,05} en mg/m ³)	
OEHHA (Office of Environmental Health Hazard Assessment) http://www.oehha.ca.gov/	Reference Exposure Levels (REL _i aiguë et REL _i chronique)	Reference Exposure Levels (REL _o aiguë et REL _o chronique)	Unit Risk factor (URF)	CPF
	IR = Concentration inhalée / VTR	IR = Dose ingérée / VTR	ERI = ERU × Concentration inhalée	ERI = ERU × Dose ingérée

La base de données TERA (<http://www.tera.org/iter>) reprend les VTR des bases de données suivantes : OMS, ATSDR, US-EPA (IRIS), Health Canada et RIVM

Annexe 5 : Analyse du potentiel dangereux des éléments émis sur le secteur d'étude

1. Les effets avec seuil
 - a) Voie d'exposition : inhalation
 - b) Voie d'exposition : ingestion

2. Les effets sans seuil
 - a) Voie d'exposition : inhalation
 - b) Voie d'exposition : ingestion

Inhalation, effets systémiques					
Substances		n° CAS	Systèmes cibles (organes cibles)	Pathologies	VTR
Gaz de combustion	SO ₂	7446-09-5	Système respiratoire	Maux de gorge, toux, irritation de la trachée et des bronches	MRL _{aigu} = 2,3.10 ⁻² mg/m ³ (ATSDR, 1998)
			Système cardiaque	Augmentation du rythme cardiaque	
			Système gastro-intestinal	Nausées, vomissements	
			Système sanguin	Augmentation du taux de méthémoglobine	
		Système oculaire	Irritations		
	NO ₂	10102-44-0	Système respiratoire	Emphysème, infection pulmonaire	Objectif de qualité du Décret n°2002-213 du 15 Février 2002 = 4,0.10 ⁻² mg/m ³
			Système immunitaire	Diminution des immunoglobulines (IgG)	
CO	630-08-0	Système cardio-vasculaire	Ischémie myocardique à l'effort, infarctus du myocarde	VME = 55 mg/m ³ (INRS, 2005) Donc VLEP calculé = 1,12.10 ⁻¹ mg/m ³	
		Effet foetotoxique	Séquelles neurologiques du fœtus si intoxication grave de la mère		

	CO ₂	124-38-9	Système respiratoire	Augmentation de la ventilation pulmonaire	VME = 9 000 mg/m ³ (INRS, 2005) Donc VLEP calculé = 1,84.10 ¹ mg/m ³
	HCl	7647-01-0	Système respiratoire	Ulcération des muqueuses, saignements de nez	RfC = 2.10 ⁻² mg/m ³ (US-EPA, 1994)
	HF	7664-39-3	Système respiratoire	Irritation respiratoire (muqueuses nasales notamment)	REL = 14 µg/m ³ (OEHHA, 2003)
Système gastro-intestinal			Nausées, vomissements		
Système oculaire			Conjonctivite		
Effets possibles sur les systèmes nerveux, rénal, cardiovasculaire et hématologique			Arythmie cardiaque, diminution du taux d'hémoglobine		
	NH ₃	7664-41-7	Système respiratoire (voies aériennes supérieures)	Augmentation des symptômes respiratoires (inflammation, toux, irritation, asthme)	RfC = 100 µg/m ³ (US-EPA, 1991)
			Système endocrinien		
			Système cutané	Irritations	
			Système oculaire	Irritations	
	Ozone	10028-15-6	Système respiratoire	Bronchopathies, emphysème, fibrose, dyspnées asthmatiformes	VME = 0,2 mg/m ³ (INRS, 2005)
			Système nerveux	Troubles de la mémoire, maux de tête, faiblesse, accroissement de l'excitabilité musculaire	Donc VLEP calculé = 4,08.10 ⁻⁴ mg/m ³
Poussières (*)		-	Système respiratoire (particules fines)	Asthme, bronchite, toux, réaction inflammatoire	VME = 5 mg/m ³ (INRS, 2005)
			Système cardiovasculaire (particules fines)		Donc VLEP calculé = 1,02.10 ⁻² mg/m ³
COV	Benzène	71-43-2	Système sanguin	La plupart des effets sanguins (anémie aplasique, pancytopenie, thrombocytopenie, granulopenie, lymphopenie, ...)	RfC = 3.10 ⁻² mg/m ³ (US-EPA, 2003)

			Système immunitaire	Diminution du nombre de lymphocytes, de leucocytes	
Naphtalène	91-20-3		Système sanguin	Anémie hémolytique	RfC = 3.10^{-3} mg/m ³ (US-EPA, 1998)
			Système gastro-intestinal	Nausées, vomissements	
			Système hépatique	Ictère	
			Système oculaire	Cataracte	
			Système nerveux central	Confusion	
Toluène	108-88-3		Système nerveux	Dysfonctionnements cérébraux, pyramidaux et cognitifs (tremblements, ataxie, troubles de la mémoire, atrophie du cervelet), neurasthénie	MRL = 0,3 mg/m ³ (ATSDR, 2000)
			Système auditif	Perte d'audition	
			Système hépatique		
			Développement		
Xylène	1330-20-7		Système respiratoire (voies aériennes supérieures, poumons)	Irritations des voies aériennes supérieures, altération des fonctions pulmonaires	MRL = 0,435 mg/m ³ (ATSDR, 1995)
			Système cardiovasculaire	Palpitations cardiaques	
			Système nerveux	Vertiges, perte de mémoire, anxiété	
			Système immunitaire	Diminution du nombre de lymphocytes	
			Systèmes hématologique et rénal (possible)		
Trichloréthylène	79-01-6		Système nerveux central	Anesthésie, vertiges	REL = 0,6 mg/m ³ (OEHHA, 2003)
			Système gastro-intestinal	Nausées, vomissements	
			Système oculaire	Irritations	
			Système hépatique	Hépatite	
			Système cardiovasculaire	Arythmie ventriculaire	
			Système rénal		
Formaldéhyde	50-00-0		Système respiratoire (voies aériennes supérieures)	Irritations des voies aériennes supérieures, destruction des cellules nasales (chez les enfants : diminution de la fonction respiratoire, asthme, bronchite)	REL = 3.10^{-3} mg/m ³ (OEHHA, 2003)
			Système nerveux		
Acétaldéhyde	75-07-0		Système respiratoire	Broncho-pneumopathies	RfC = 9 µg/m ³ (US-EPA, 1991)
Phénol	108-95-2		Système cardio-vasculaire		REL = 0,2 mg/m ³ (OEHHA, 2003)
1, 3 - butadiène	106-99-0		Système respiratoire	Irritation des voies aériennes supérieures et des poumons, toux	RfC = 2.10^{-3} mg/m ³ (US-EPA, 1993)
			Système cardiaque	Maladie artérioscléreuse	
			Système sanguin	Diminution du nombre de globules rouges, de l'hémoglobine, des plaquettes et des neutrophiles	
			Système oculaire	Irritations des yeux	

Métaux	Antimoine	7440-36-0	Système nerveux	Léthargie, somnolence	Dérivation voie à voie : VTR = $1,4 \cdot 10^{-3}$ mg/m ³
			Système respiratoire	Pneumoconiose, bronchite et emphysème chroniques, toux, inflammation	
			Système cardiaque	Augmentation de la pression sanguine	
			Système gastro-intestinal	Douleurs abdominales, diarrhée, vomissements, ulcères	
			Système oculaire		
			Système nerveux		
			Développement		
	Arsenic	7440-38-2	Système cardiovasculaire		TCA = 10^{-3} mg/m ³ (RIVM, 2001)
			Système nerveux central	Neuropathologie, encéphalopathie	
			Système cutané	Hyperkératose, hyper-pigmentation, hypopigmentation	
			Système gastro-intestinal	Nausées, vomissements, diarrhée	
	Cadmium	7440-43-9	Système respiratoire (poumons)	Diminution des capacités respiratoires, rhinites, bronchite, emphysème	REL = $2 \cdot 10^{-2}$ µg/m ³ (OEHHA, 2003)
			Système rénal	Dysfonctionnement rénal	
			Système nerveux	Neuropathie périphérique	
	Cr VI	18540-29-9	Système respiratoire	Épistaxis, rhinorrhée chronique, irritations et démangeaisons nasales, atrophie de la muqueuse nasale, ulcération du septum nasal, bronchite, pneumoconiose, pneumonies, asthme	MRL = $5 \cdot 10^{-6}$ mg/m ³ (ATSDR, 2000)
			Système gastro-intestinal	Douleurs stomacales, crampes, ulcères gastro-duodénaux, gastrites	
	Cobalt	7440-48-4	Système respiratoire	Diminution de la ventilation pulmonaire, irritation respiratoire, asthme, pneumonie, fibrose	MRL = $1 \cdot 10^{-4}$ mg/m ³ (ATSDR, 2001)
			Système cardiovasculaire (effets faibles cependant pour cette voie d'exposition)	Cardiomyopathie	
	Cuivre	7440-50-8	Système hépatique	Cirrhose micronodulaire, fibrose, angiosarcome, hypertension portale	TCA = 1 µg/m ³ (RIVM, 2001)
			Système respiratoire (poumons et voies aériennes supérieures)	Irritations des voies aériennes supérieures, pneumopathie : "Vineyard Sprayers' Lung"	
			Système gastro-intestinal	Anorexie, nausées, diarrhée	
Etain	7440-31-5	Système respiratoire	Pneumoconiose	Dérivation voie à voie : VTR = $1,05 \cdot 10^0$ mg/m ³	

	Manganèse	7439-96-5	Système nerveux	Diminution des fonctions motrices, confusion, fatigue ...	RfC = 5.10^{-5} mg/m ³ (US-EPA, 1993)
			Système respiratoire	Inflammation des poumons, œdème, toux, bronchite, pneumonie	
			Système cardiaque	Diminution de la pression sanguine	
			Système sanguin		
			Système endocrinien		
			Reproduction		
	Possibles effets sur les systèmes immunologique et lymphoréticulaire				
	Mercure	7439-97-6	Système nerveux central	Lésions du cervelet, tremblements, irritabilité, "Pink Disease" chez les enfants	MRL = 2.10^{-4} mg/m ³ (ATSDR, 2001)
			Système rénal	Protéinurie, lésions des tubes proximal et terminal, lésions glomérulaires	
	Nickel	7440-02-0	Système respiratoire	Bronchite, emphysème, asthme	TCA = 0,05 µg/m ³ (RIVM, 2001)
			Système immunitaire		
			Système rénal		
	Plomb	7439-92-1	Reproduction et développement		Dérivation voie à voie : VTR = $1,23.10^{-2}$ mg/m ³
			Système nerveux central	Encéphalopathie saturnine, troubles neurocomportemental et psychomoteur	
			Système nerveux périphérique	Paralysie des membres supérieurs, paresthésie	
			Système sanguin	Anémie	
			Système rénal	Insuffisance rénale	
			Système cardiovasculaire	Hypertension artérielle	
			Système thyroïdien		
	Système osseux (observé chez les enfants)				
	Sélénium	7782-49-2	Système immunitaire (possible)		REL = 20 µg/m ³ (OEHHA, 2001) Valeur basée sur la RfD chronique par voie orale de l'US-EPA de 1996) VME = 0,1 mg/m ³ (INRS, 2005) Donc VLEP calculé = $2,04.10^{-4}$ mg/m ³
Système respiratoire (poumons et voies aériennes supérieures)			Trachéo-bronchite, irritation du nez		
Système gastro-intestinal			Gastralgies		
Tellure	-	Système nerveux	Irritabilité, malaise		

	Thallium	7440-28-0	Système nerveux	Paresthésie, crampes musculaires	VME = 0,1 mg/m ³ (INRS, 2005) Donc VLEP calculé = 2,04.10 ⁻⁴ mg/m ³
	Vanadium (**)	7440-62-2	Système respiratoire	Détresse respiratoire, toux, maux de gorge	MRL = 2.10 ⁻⁴ mg/m ³ (ATSDR, 1992)
			Système gastro-intestinal	Nausées, vomissements	
			Système oculaire	Conjonctivite, irritations	
Zinc	7440-66-6	Système gastro-intestinal	Douleurs abdominales ou épigastriques, nausées, vomissements, ulcères, constipation	Dérivation voie à voie : VTR = 1,05.10 ⁰ mg/m ³	
Dioxines – Furannes (***)	1746-01-6 (dioxine) 5120-73-19 (furanne)	Système cutané	Acné, hyperpigmentation, hirsutisme, hypertrichose	REL = 40 pg/m ³ (OEHHA, date non répertoriée)	
		Système hépatique	Hypercholestérolémie, taux en gamma GT élevé		
		Système endocrinien	Altération de la fonction thyroïdienne, altération du métabolisme du glucose (diabète)		
		Système nerveux (central et périphérique)	Polyneuropathie, encéphalopathie, neuropathie périphérique, désordre mental, somnolence, maux de tête		
		Possibles effets sur le système cardiovasculaire, système oculaire (irritations), système immunologique, reproduction			

(*) Concentration moyenne en poussières inhalables, inhalée par une personne, évaluée sur une période de 8 heures (valeurs concernant les poussières sans effets spécifiques, c'est à dire qui ne sont pas en mesure de provoquer seules sur les poumons ou sur tout autre organe ou système du corps humain d'autre effet que celui de surcharge.

(**) Cette valeur de VME pour le vanadium a été estimée pour les poussières et fumées de vanadium, exprimée en V₂O₅.

(***) Il est à noter que les effets des dioxines et des furannes présentés ici – que ce soit pour les effets systémiques ou les effets cancérigènes –, proviennent des fiches de l'ATSDR (fiche datant de décembre 1998), que ce soient pour les effets sans seuil ou avec. Cependant, il y est bien précisé que comme peu de données existent dans les études humaines concernant les voies d'exposition (inhalation, ingestion ou contact cutané), les informations présentées dans ces fiches sont regroupées par effets sur la santé (systémique, immunologique, neurologiques, cancérigène, etc ...), données discutées en fonction de périodes d'exposition de durées différentes.

Ingestion, effets systémiques					
Substances		n° CAS	Systèmes cibles (organes cibles)	Pathologies	VTR
Gaz de combustion	SO ₂	7446-09-5	Non recherché	Non recherché	Non recherché
	NO ₂	10102-44-0	Non recherché	Non recherché	Non recherché
	CO	630-08-0	Non recherché	Non recherché	Non recherché
	CO ₂	124-38-9	Non recherché	Non recherché	Non recherché
	HCl	7647-01-0	Non recherché	Non recherché	Non recherché
	HF	7664-39-3	Non recherché	Non recherché	Non recherché
	NH ₃	7664-41-7	Non recherché	Non recherché	Non recherché
Ozone	10028-15-6	Non recherché	Non recherché	Non recherché	
Poussières		-	Les grosses particules pénètrent mal dans les bronchioles les plus fines du système respiratoire. Elles sont très peu transportées, se déposent rapidement, et c'est alors la toxicité des substances adsorbées sur les particules qui intervient pour une exposition par ingestion		-
COV	Benzène	71-43-2	Non recherché	Non recherché	Non recherché
	Naphtalène	91-20-3	Non recherché	Non recherché	Non recherché
	Toluène	108-88-3	Non recherché	Non recherché	Non recherché
	Xylène	1330-20-7	Non recherché	Non recherché	Non recherché
	Trichloréthylène	79-01-6	Non recherché	Non recherché	Non recherché
	Formaldéhyde	50-00-0	Non recherché	Non recherché	Non recherché
	Acétaldéhyde	75-07-0	Non recherché	Non recherché	Non recherché
	Phénol	108-95-2	Non recherché	Non recherché	Non recherché
1, 3 - butadiène	106-99-0	Non recherché	Non recherché	Non recherché	
Métaux	Antimoine	7440-36-0	Système gastro-intestinal	Vomissements	RfD = 4.10 ⁻⁴ mg/kg/j (US-EPA, 1987)
	Arsenic	7440-38-2	Système cardiovasculaire	Maladie de Raynaud, cyanose doigts et pieds, augmentation de la pression sanguine	MRL = 3.10 ⁻⁴ mg/kg/j (ATSDR, 2000)
			Système gastro-intestinal	Nausées, vomissements, diarrhée, diabète sucré	
			Système sanguin	Anémie, leucopénie	
			Système hépatique		
			Système nerveux central (nerfs moteurs et sensoriels)	Paresthésie	
	Système cutané	Hyperkératose, hyper-pigmentation, hypopigmentation, maladie des pieds noirs			
Cadmium	7440-43-9	Système rénal	Dysfonctionnement rénal	MRL = 2.10 ⁻⁴ mg/kg/j (ATSDR, 2004)	
	Système osseux (squelette : interférence avec le métabolisme du calcium)	Ostéomalacie, ostéoporose, maladie "Itaï Itaï" au Japon			

Cr VI	18540-29-9	Système gastro-intestinal	Diarrhée, ulcères buccaux, douleurs abdominales, indigestions, vomissements	RfD = 3.10^{-3} mg/kg/j (US-EPA, 1998)
Cobalt	7440-48-4	Système respiratoire	Œdème pulmonaire	TDI = $1,4.10^{-3}$ mg/kg/j (RIVM, 2001)
		Système cardiovasculaire	Cardiomyopathie	
		Système gastro-intestinal		
		Système sanguin	Polyglobulie	
		Système hépatique	Atteinte hépatique nécrotique	
		Système rénal		
		Système oculaire	Atrophie optique	
Cuivre	7440-50-8	Système hépatique	Cirrhose micronodulaire, insuffisance hépatique aiguë, hépato-splénomégalie, nécrose hépatique	TDI = 140 µg/kg/j (RIVM, 2001)
		Système gastro-intestinal		
		Système rénal	Nécrose rénale	
Etain	7440-31-5	Système gastro-intestinal	Diarrhées, douleurs gastro-intestinales, nausées, gastro-entérites	MRL provisoire= 0,3 mg/kg/j (ASTDR, 2003)
Manganèse	7439-96-5	Système nerveux	Démence, déficience neuromusculaire, ...	RfD = $1,4.10^{-1}$ mg/kg/j (US-EPA, 1993)
		Développement		
Mercure	7439-97-6	Système nerveux central		Dérivation voie à voie : VTR = $5,71.10^{-5}$ mg/kg/j
		Système cardiovasculaire		
		Système gastro-intestinal		
		Système rénal		
Nickel	7440-02-0	Système gastro-intestinal		TDI = 5 µg/kg/j (OMS, 2004)
Plomb	7439-92-1	Système nerveux central	Encéphalopathie saturnine, troubles neurocomportemental et psychomoteur	DJT = 3,5 µg/kg/j (OMS, JECFA 1993)
		Système nerveux périphérique	Paralysie des membres supérieurs, paresthésie	
		Système sanguin	Anémie	
		Système rénal	Insuffisance rénale	
		Système cardiovasculaire	Hypertension artérielle	
		Système thyroïdien		
		Système osseux (observé chez les enfants)		
		Système immunitaire (possible)		
Système gastro-intestinal				

	Sélénium	7782-49-2	Système gastro-intestinal	Nausées, vomissements, diarrhées, douleurs abdominales	MRL = $5 \cdot 10^{-3}$ mg/kg/j (ATSDR, 2003)
			Système sanguin	Diminution du taux d'hémoglobine et d'hématocrite	
			Système endocrinien	Effet sur les taux d'hormones thyroïdiennes	
			Système cutané	Alopécie, déformation et perte des ongles, décoloration de la peau, perte des cheveux, carie et décoloration des dents	
			Système nerveux	Convulsion, anesthésie, paralysie, hémiplégie, sclérose amyotrophique latérale	
	Tellure	-	-	-	-
	Thallium	7440-28-0	Système respiratoire	Broncho-pneumonie	Pas de VTR
			Système cardiovasculaire	Réaction inflammatoire, nécrose	
			Système gastro-intestinal	Gastro-entérite, diarrhées, constipation, vomissements, douleurs abdominales	
			Système musculaire	Nécrose des fibres musculaires	
			Système hépatique (foie)		
			Système rénal (rein)	Altération de la fonction rénale	
			Système cutané	Perte des cheveux	
Vanadium	7440-62-2	Système gastro-intestinal	Crampes abdominales, diarrhées, nausées et vomissements	MRL = $3 \cdot 10^{-3}$ mg/kg/j (ATSDR, 1992)	
		Zinc	7440-66-6	Système gastro-intestinal	Crampes d'estomac, nausées, vomissements
		Système sanguin	Anémie		
		Système immunitaire			
Dioxines – Furannes	1746-01-6 (dioxine) 5120-73-19 (furanne)	Système cutané	Acné, hyperpigmentation, hirsutisme, hypertrichose	MRL = $1 \cdot 10^{-9}$ mg/kg/j (ATSDR, 1998)	
		Système hépatique	Hypercholestérolémie, taux en gamma GT élevé		
		Système endocrinien	Altération de la fonction thyroïdienne, altération du métabolisme du glucose (diabète)		
		Système nerveux (central et périphérique)	Polynéuropathie, encéphalopathie, neuropathie périphérique, désordre mental, somnolence, maux de tête		
		Possibles effets sur le système cardiovasculaire, système oculaire (irritations), système immunologique, reproduction			

Inhalation, effets cancérigènes					
Substances	n° CAS	Systèmes cibles (organes cibles)	Pathologies	VTR	
Gaz de combustion	SO ₂	7446-09-5	Système respiratoire (possible)	Cancer du poumon	Pas de VTR
	NO ₂	10102-44-0		Classé non cancérigène	
	CO	630-08-0		Classé non cancérigène	
	CO ₂	124-38-9		Classé non cancérigène	
	HCl	7647-01-0		Classé non cancérigène	
	HF	7664-39-3	Des études ont relaté l'existence possible de cancers sur plusieurs systèmes : système respiratoire, système hépatique, système sanguin et système reproducteur	Cancer du poumon, cancer du pancréas, cancer lymphohématopoïétique, cancers génitaux	Pas de VTR
	NH ₃	7664-41-7		Classé non cancérigène	
Ozone	10028-15-6		Classé non cancérigène		
Poussières	-	Système respiratoire	Cancer du poumon	Des études américaines récentes permettent l'estimation d'un ERU de 10%, associé à un écart d'exposition chronique de 10 µg/m ³ pour des PM 2,5 (d'après les études américaines de survie [Pope et al., 1995 ; Beeson et al., 1998 ; Abbey et al., 1999])	
COV	Benzène	71-43-2	Système hématopoïétique	Lymphome non Hodgkinien	ERU _i = entre 2,2 et 7,8.10 ⁻⁶ (µg/m ³) ⁻¹ (US-EPA, 1998)
			Système lymphopoiétique	Leucémie	
			Système respiratoire	Cancers du poumon, du nez	
	Naphtalène	91-20-3		Classé non cancérigène	
	Toluène	108-88-3	Système respiratoire	Cancer du tractus respiratoire	Pas de VTR
			Système gastro-intestinal	Cancers de l'estomac, colo-rectal	
	Xylène	1330-20-7		Classé non cancérigène	
Trichloréthylène	79-01-6	Système génito-urinaire	Cancer du col de l'utérus chez la femme, cancer de la prostate chez l'homme	ERU _i = 4,3.10 ⁻⁷ (µg/m ³) ⁻¹ (OMS, 2000)	
		Système hépatique	Cancer du foie		
		Système gastro-intestinal	Cancer de l'estomac		
		Système sanguin	Cancer des tissus hématopoïétiques		

			Système nerveux	Astrocytome	
	Formaldéhyde	50-00-0	Système respiratoire (voies aériennes supérieures, cavités buccales et nasales, nasopharynx, poumons)	Cancer	ERU _i = 6.10 ⁻⁶ (µg/m ³) ⁻¹ (OEHHA, 2002)
	Acétaldéhyde	75-07-0	Possibles effets sur le système respiratoire	Tumeur bronchique et tumeur buccale	ERU _i = 2,2.10 ⁻⁶ (µg/m ³) ⁻¹ (US-EPA, 1991)
	Phénol	108-95-2	Cancers possibles au niveau de l'œsophage et du rein et maladie de Hodgkin possible également		Pas de VTR
	1, 3 - butadiène	106-99-0	Système respiratoire		ERU _i = 3.10 ⁻⁵ (µg/m ³) ⁻¹ (US-EPA, 2002)
Système gastro-intestinal			Cancer de l'estomac, cancer de l'œsophage		
Système urinaire			Cancer de la vessie		
Système sanguin			Cancer lympho-hématopoïétique, néoplasme lymphatique, lymphosarcome, leucémie, sarcome des cellules réticulaires		
Métaux	Antimoine	7440-36-0	Classé non cancérigène		
	Arsenic	7440-38-2	Système respiratoire	Cancer du poumon	ERU _i = 3,3.10 ⁻³ (µg/m ³) ⁻¹ (OEHHA, 2002)
	Cadmium	7440-43-9	Système respiratoire	Cancer du poumon	ERU _i = 1,8.10 ⁻³ (µg/m ³) ⁻¹ (US-EPA, 1992)
			Système urinaire	Cancer de la prostate	
			Une étude a observé une action cancérigène possible sur les systèmes hépatique et gastro-intestinal	Cancers du foie et de l'estomac	
	Cr VI	18540-29-9	Système respiratoire	Cancer du poumon Cancer à petites cellules, carcinomes épithélioïdes	ERU _i = 1,2.10 ⁻² (µg/m ³) ⁻¹ (US-EPA, 1998)
			Autres cancers observés : os, estomac, prostate, organes génitaux, rein, vessie, cavité nasale, larynx, sang (lymphomes, maladie de Hodgkin, leucémie)		
	Cobalt	7440-48-4	Système respiratoire (mais souvent du à la co-exposition à d'autres cancérogènes)	Cancer	Pas de VTR
	Cuivre	7440-50-8	Classé non cancérigène		
	Étain	7440-31-5	Classé non cancérigène		
	Manganèse	7439-96-5	Classé non cancérigène		
	Mercure	7439-97-6	Système respiratoire	Cancer du poumon	Pas de VTR
			Système nerveux central	Cancer du cerveau	
Système rénal possible			Cancer du rein		
Nickel	7440-02-0	Système respiratoire	Cancers du poumon et du nez	ERU _i = 2,4.10 ⁻⁴ (µg/m ³) ⁻¹ (US-EPA, 1991)	

	Plomb	7439-92-1	Système respiratoire	Cancer bronchique	ERUi = $1,2 \cdot 10^{-5} (\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$ (OEHHA, 2002)
			Système rénal	Cancer du rein	
			Système gastro-intestinal	Cancers gastriques, vésicaux	
			Système nerveux	Gliome	
	Sélénium	7782-49-2	Classé non cancérigène		
	Tellure	-	-	-	-
	Thallium	7440-28-0	Classé non cancérigène		
Vanadium	7440-62-2	Classé non cancérigène			
Zinc	7440-66-6	Classé non cancérigène			
Dioxines – Furannes	1746-01-6 (dioxine) 5120-73-19 (furanne)	Système tissulaire	Sarcome des tissus mous	Pas de VTR	
		Système lymphatique	Lymphome malin		
		Système gastro-intestinal	Cancers de l'estomac, du pancréas		
		Système hépatique	Cancer du foie		
		Système respiratoire	Cancers du poumon, du tractus respiratoire		

Ingestion, effets cancérigènes					
Substances		n° CAS	Systèmes cibles (organes cibles)	Pathologies	VTR
Gaz de combustion	SO ₂	7446-09-5	Non recherché	Non recherché	Non recherché
	NO ₂	10102-44-0	Non recherché	Non recherché	Non recherché
	CO	630-08-0	Non recherché	Non recherché	Non recherché
	CO ₂	124-38-9	Non recherché	Non recherché	Non recherché
	HCl	7647-01-0	Non recherché	Non recherché	Non recherché
	HF	7664-39-3	Non recherché	Non recherché	Non recherché
	NH ₃	7664-41-7	Non recherché	Non recherché	Non recherché
	Ozone	10028-15-6	Non recherché	Non recherché	Non recherché
Poussières		-	Pas de données concernant l'effet cancérigène des poussières par ingestion		Pas de VTR
COV	Benzène	71-43-2	Non recherché	Non recherché	Non recherché
	Naphtalène	91-20-3	Non recherché	Non recherché	Non recherché
	Toluène	108-88-3	Non recherché	Non recherché	Non recherché
	Xylène	1330-20-7	Non recherché	Non recherché	Non recherché
	Trichloréthylène	79-01-6	Non recherché	Non recherché	Non recherché
	Formaldéhyde	50-00-0	Non recherché	Non recherché	Non recherché
	Acétaldéhyde	75-07-0	Non recherché	Non recherché	Non recherché
	Phénol	108-95-2	Non recherché	Non recherché	Non recherché
	1, 3 - butadiène	106-99-0	Non recherché	Non recherché	Non recherché
Métaux	Antimoine	7440-36-0	Classé non cancérigène		
	Arsenic	7440-38-2	Système cutané	Cancer de la peau	ERUo = 1,5 (mg/kg/j) ⁻¹ (US-EPA, 1998)
			Des études ont observé des cancers au niveau de la vessie, des reins, du foie et des poumons	Cancer	
	Cadmium	7440-43-9	Système urinaire	Cancer de la prostate	Dérivation voie à voie : VTR = 6,30.10 ⁻³ (mg/kg/j) ⁻¹
			Système hépatique	Cancer	
	Cr VI	18540-29-9	Pas de données pour l'homme	Pas de données pour l'homme	ERUo = 0,42 (mg/kg/j) ⁻¹ (OEHHA, 2002)
	Cobalt	7440-48-4	Classé non cancérigène		
	Cuivre	7440-50-8	Classé non cancérigène		
	Etain	7440-31-5	Classé non cancérigène		
	Manganèse	7439-96-5	Classé non cancérigène		

	Mercure	7439-97-6	Classé non cancérigène		
	Nickel	7440-02-0	Classé non cancérigène		
	Plomb	7439-92-1	Il n'y a pas d'études chez l'homme ayant observé des effets cancérigènes du plomb via l'ingestion		ERUo = $8,5 \cdot 10^{-3}$ (mg/kg/j) ⁻¹ (OEHHA, 2002)
	Sélénium	7782-49-2	Classé non cancérigène		
	Tellure	-	-	-	-
	Thallium	7440-28-0	Classé non cancérigène		
	Vanadium	7440-62-2	Classé non cancérigène		
	Zinc	7440-66-6	Classé non cancérigène		
Dioxines – Furannes	1746-01-6 (dioxine) 5120-73-19 (furanne)	Système tissulaire	Sarcome des tissus mous		Pas de VTR
		Système lymphatique	Lymphome malin		
		Système gastro-intestinal	Cancers de l'estomac, du pancréas		
		Système hépatique	Cancer du foie		
		Système respiratoire	Cancers du poumon, du tractus respiratoire		

Annexe 6 : Description du modèle de dispersion atmosphérique utilisé (paramètres et équations utilisés)

Le modèle de dispersion atmosphérique permet de connaître les concentrations en polluants dans l'air (en moyenne annuelle), au niveau du sol. Il est tridimensionnel, de type gaussien, cartésien et est valable pour des sources d'émissions ponctuelles.

Il permet donc d'estimer les concentrations, individuellement, pour chacune des sources pour un polluant donné, à un endroit donné et à un moment donné, en tenant compte de :

- La *topographie* qui fait partie des paramètres utilisés pour modéliser la dispersion atmosphérique, en tenant compte de la différence d'altitude entre la hauteur d'émission du polluant (somme entre l'altitude de l'installation, de la hauteur du panache et de celle de la cheminée) et celle de la zone où la population est principalement exposée ;
- La *météorologie* : la météorologie locale est le paramètre déterminant pour la dispersion des polluants dans l'air. Le vent est le vecteur de la pollution, et la turbulence atmosphérique est à l'origine du processus de diffusion. Les données utilisées sont celles de la station Météo-France du site pour les paramètres suivants (intervenant également dans le modèle de dispersion) : force et direction du vent, avec le pourcentage annuel pour chacun de ces deux paramètres ;
- La *molécule* considérée (nature et flux).

Ce qui permet d'obtenir des concentrations pour des distances à la source d'émission allant de 100 m à 2 000 m, et ce, tous les 20°, de façon à couvrir la rose des vents.

Il a été conçu au sein de la DDASS de la Haute-Vienne. Il est issu du sujet de Centrale 2003 de PSI, en s'appuyant sur les connaissances de mécanique et de diffusion de particules d'un élève de classe préparatoire.

MODÈLE ET GRANDEURS UTILISÉES

VARIABLE	DESCRIPTION	UNITÉ
H	Hauteur effective	m
h	Hauteur de la cheminée	m
?H	Surhauteur du panache dû aux conditions d'éjection	m
P	Poids	g
μ_{gaz}	Masse volumique du gaz	g.m^{-3}
μ_{air}	Masse volumique de l'air	g.m^{-3}
g	Accélération due à la gravité	m.s^{-2}
M	Masse molaire	g.mol^{-1}
t	Temps	s
T	Température	°K
P	Pression du gaz	Pa
C	Concentration	g.m^{-3}
V	Vitesse du vent	m.s^{-1}
q_m	Flux de la particule	t.an^{-1}
x, y, z	Coordonnées du repère	m
D_x	Constante	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
D_y	Constante	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
D_z	Constante	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
m	Masse	g

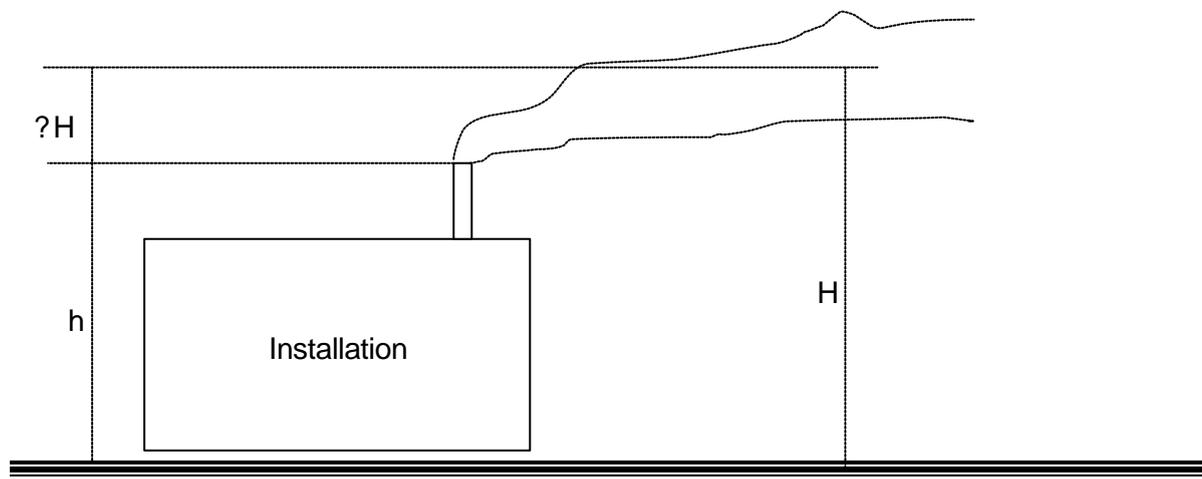
CALCUL ET PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

La présentation de ce modèle s'effectuera à travers l'application numérique pour les dioxines pour un émetteur qui sera l'incinérateur de la ville de Limoges, dont les caractéristiques sont les suivantes :

	Four 1	Four 2	Four 3
Hauteur de cheminée	60m	60m	60m
Vitesse d'éjection des gaz	15m/s	15m/s	15m/s
Température des gaz	58°C	58°C	120°C
Diamètre de la cheminée	1m	1m	1m
Débit volumique des gaz	21 000m ³ /h	22 000m ³ /h	26 000m ³ /h
Débit massique des dioxines	2.10 ⁻⁶ g/h	2.10 ⁻⁶ g/h	2.10 ⁻⁶ g/h

1. Détermination de la hauteur maximale atteinte par les gaz

Le point de départ des trajectoires est le sommet de la cheminée. Lorsque les rejets sont chauds ou que la vitesse d'éjection des fumées est importante, on peut prendre en compte une surhauteur du panache. En effet, les fumées de combustion vont s'élever au-dessus de la cheminée jusqu'à ce que leur vitesse ascensionnelle initiale et les effets de différence de densité (dus à la différence de température air/fumées) ne soient plus significatifs. Tout se passe comme si l'émission des rejets se faisait à une hauteur réelle d'émission (hauteur de la cheminée) augmentée de la surhauteur due aux conditions d'éjection. Le calcul ci-après permet de prendre en compte la surhauteur d'origine thermique et d'origine dynamique.



La hauteur effective H est calculée comme la somme de la hauteur de cheminée h et de la surélévation du panache ΔH .

$$H = h + ?h$$

On prendra comme hypothèse que les gaz rejetés ont un comportement de gaz parfait (il n'existe aucune interaction entre les molécules, hypothèse qui s'appuie sur le fait que les dioxines sont des composés très stables dans la nature). En outre, on négligera les phénomènes dissipatifs.

Le système étudié est celui de particules fluides, et le référentiel choisi est le référentiel Galiléen.

L'expression des forces se traduit par les formules suivantes :

- Poids $P = \mu_{\text{gaz}} \cdot d \cdot e \cdot g$
- Poussée d'Archimède $\pi = \mu_{\text{air}} \cdot d \cdot e \cdot g$

D'après la relation fondamentale de la dynamique, en projetant selon l'axe e_z , on a :

$$m_{\text{gaz}} \times \ddot{z} = m_{\text{air}} \cdot g - m_{\text{gaz}} \cdot g, \text{ soit : } \ddot{z} = \frac{-\Delta m}{m_{\text{gaz}}} \times g \quad (1)$$

(avec $\frac{\Delta m}{m} = \frac{m_{\text{gaz}} - m_{\text{air}}}{m}$ et $\frac{\Delta m}{m_{\text{gaz}}}$ indépendant de z).

Or comme : $\mu_{\text{gaz}} = \frac{P_{\text{gaz}} \times M_{\text{gaz}}}{RT_{\text{air}}}$ et $\mu_{\text{air}} = \frac{P_{\text{air}} \times M_{\text{air}}}{RT_{\text{air}}}$

et que : $T_{\text{air}} \approx T_{\text{gaz}}$ et $P_{\text{air}} \approx P_{\text{gaz}}$

Alors, on obtient $\frac{m_{\text{gaz}} - m_{\text{air}}}{m} = \frac{M_{\text{air}} - M_{\text{gaz}}}{m}$

Si on intègre l'expression (1) par rapport au temps, on obtient :

$$\dot{z} = -\frac{\Delta m}{m} g t + \text{Constante}$$

Pour déterminer la valeur de la constante, on se place à $t = 0$, ce qui donne :

$$\dot{z} = \text{Constante} = V_e$$

D'où : $\dot{z} = -\frac{\Delta m}{m} g t + V_e \quad (2)$

Si on intègre l'expression (2) par rapport au temps, cela donne :

$$z = -\frac{1}{2} \frac{\Delta m}{m} g t^2 + V_e t + \text{Constante}'$$

Mais à $t = 0$, on a $z = \text{Constante}' = 0$ (si on fixe le repère au sommet de la cheminée).

D'où $z = -\frac{1}{2} \frac{\Delta m}{m} g t^2 + V_e t$

z est maximal lorsque la dérivée première est nulle, soit $\dot{z} = 0$, d'où $t_0 = \frac{V_e}{g} \frac{m}{\Delta m}$

Donc $z_{\text{max}} = \Delta H = -\frac{1}{2} \frac{\Delta m}{m} g \left(\frac{V_e}{g} \frac{m}{\Delta m}\right)^2 + V_e \left(\frac{V_e}{g} \frac{m}{\Delta m}\right) = \frac{V_e^2}{2g\Delta m} \frac{m}{m}$

L'application numérique pour les dioxines permet de calculer le z_{max} correspondant :

$$z_{\text{max dioxine}} = 12,75 \text{ m}$$

(avec $M_{\text{dioxine}} = 322 \text{ g.mol}^{-1}$)

2. Etude de diffusion des gaz : dispersion des gaz

Le bilan matière pour un gaz est le suivant :

$$m(t+dt) - m(t) = \delta m \text{ entrant} = \int \frac{\partial c}{\partial t} dt dE$$

$$\delta m \text{ entrant} = \int J \cdot (-dS) dE$$

Si $\nabla \cdot \left(\frac{\partial c}{\partial t} + \text{div } \mathbf{J} \right) dE = 0$

valable pour V quelconque

Alors : $\frac{\partial c}{\partial t} + \text{div } \mathbf{J} = 0$

or $\mathbf{J} = \mathbf{J}_{\text{convectif}} + \mathbf{J}_{\text{diffusion}}$, avec $\mathbf{J}_{\text{convectif}} = C \cdot \mathbf{V}$

d'où $\mathbf{J} = C \mathbf{V}_{\text{vent}} - D_x \frac{\partial c}{\partial x}$

$= 0 - D_y \frac{\partial c}{\partial y}$

$= 0 - D_z \frac{\partial c}{\partial z}$

On néglige l'effet du transport diffusif par rapport au transport convectif beaucoup plus efficace. En conséquence :

$\mathbf{J} = C \mathbf{V}_{\text{vent}}$

$= -D_y \frac{\partial c}{\partial y}$

$= -D_z \frac{\partial c}{\partial z}$

et

$\frac{\partial c}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla c = \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \cdot \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \cdot \frac{\partial c}{\partial z} \right)$

Une des solutions de cette équation est :

$$C(x,y,z) = \frac{q_m}{2\Pi(D_y D_z)^{0.5}} \cdot \frac{1}{x} \cdot \exp\left(\frac{-y^2 V}{4D_y x} - \frac{(z-H)^2 V}{4D_z x}\right)$$

Comme, on étudie la concentration au sol dans l'axe du panache donc : z=0 et y =0

D'où $C(x,0,0) = \frac{q_m}{2\Pi(D_y D_z)^{0.5}} \cdot \frac{1}{x} \cdot \exp\left(\frac{-(-H)^2 V}{4D_z x}\right)$

Application numérique pour le cas des dioxines :

Nous avons par ligne de four :

- $q_m = 2.10^{-6} \text{ g.h}^{-1} = 5,555.10^{-10} \text{ g.s}^{-1}$
- $H = h + ?h = 60 + 12,75 = 72,75 \text{ m}$

La dispersion du polluant autour de sa trajectoire nécessite la connaissance des valeurs D_y et D_z qui pilotent la diffusion du panache. Le choix de ces valeurs relève d'un certain empirisme fonction notamment des principes suivants :

- Plus le terrain est accidenté et contient des obstacles, plus la rugosité est importante ;
- Plus la rugosité est importante, plus la turbulence est élevée ;
- Plus la turbulence est élevée, plus D_y et D_z sont importants ;
- Plus ces valeurs sont importantes, plus vite le panache se disperse.

En outre on considérera que $D_y = 36$ et que $D_z = 12$ parce que le sol est moyennement accidenté.

$$D'où C(x, 0, 0) = \frac{5,555.10^{-10}}{2\Pi(432)^{0,5}} \cdot \frac{1}{x} \cdot \exp\left(-\frac{(-72,5)^2 V}{48x}\right) = \frac{4,2558.10^{-12}}{x} \cdot \exp\left(-\frac{109,5V}{x}\right)$$

Cette formule nous permet de calculer la concentration en dioxines, en fonction d'une part de la vitesse du vent et d'autre part de x (distance à la cheminée).

3. Calcul de la concentration en dioxines en fonction des conditions météorologiques

L'application de l'équation nous permet de calculer la concentration moyenne annuelle en dioxines selon la distance au point de rejet et la direction du vent sur les bases des données météorologiques concernant le site, communiquées par Météo-France. Le tableau suivant présente les pourcentages de la vitesse du vent en fonction de l'orientation de ce dernier.

Remarque : Les 17, 6 % du temps restant regroupent les conditions météorologiques où le vent est considéré comme nul et pour lequel le modèle ci dessus ne permet pas d'évaluer les concentrations de dioxines au sol.

Orientation du vent (°)	2 à 5 m.s ⁻¹ en % du temps	5 à 8 m.s ⁻¹ en % du temps	> 8 m.s ⁻¹ en % du temps	Total En % du temps
20	3,1	1,7	0,1	4,9
40	3,3	1,7	0,1	5,2
60	3,7	1,5	0,1	5,4
80	4,3	1,3	0,1	5,7
100	3,9	1,1	0,1	5,0
120	2,6	0,4	0,0	3,0
140	2,2	0,4	0,0	2,6
160	3,1	0,6	0,0	3,6
180	3,6	0,8	0,0	4,4
200	4,5	1,3	0,0	5,7
220	5,7	2,4	0,1	8,2
240	5,9	1,5	0,0	7,8
260	3,5	0,6	0,0	4,1
280	2,2	0,2	0,0	2,4
300	2,4	0,3	0,0	2,7
320	2,5	0,5	0,0	3,0
340	2,9	1,1	0,1	4,1
360	3,2	1,5	0,1	4,8
Total	62,5	18,9	1,0	82,4

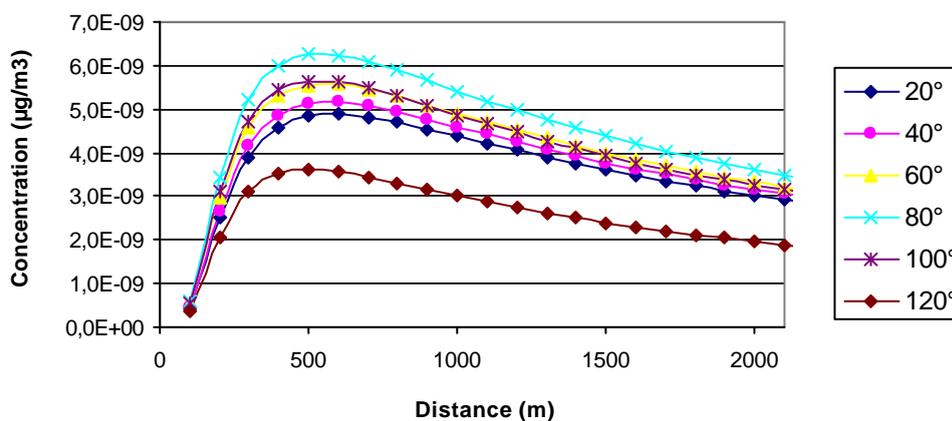
Dans l'exemple traité, les concentrations des dioxines (en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) sont synthétisées dans le tableau suivant :

Orientation (°)	100 m	200 m	300 m	500 m	1000 m	2500 m	5000 m	10000 m	20000 m
20	4,4E-10	2,5E-09	3,9E-09	4,8E-09	4,4E-09	2,6E-09	1,5E-09	7,9E-10	4,1E-10
40	4,7E-10	2,7E-09	4,1E-09	5,1E-09	4,6E-09	2,7E-09	1,5E-09	8,2E-10	4,2E-10
60	5,3E-10	3,0E-09	4,6E-09	5,6E-09	4,9E-09	2,8E-09	1,6E-09	8,6E-10	4,4E-10
80	6,1E-10	3,4E-09	5,2E-09	6,3E-09	5,4E-09	3,1E-09	1,7E-09	9,2E-10	4,8E-10
100	5,6E-10	3,1E-09	4,7E-09	5,6E-09	4,9E-09	2,8E-09	1,6E-09	8,3E-10	4,3E-10
120	3,7E-10	2,1E-09	3,1E-09	3,6E-09	3,0E-09	1,7E-09	9,3E-10	4,9E-10	2,5E-10
140	3,1E-10	1,7E-09	2,6E-09	3,1E-09	2,6E-09	1,4E-09	8,0E-10	4,2E-10	2,2E-10
160	4,4E-10	2,5E-09	3,7E-09	4,4E-09	3,7E-09	2,0E-09	1,1E-09	6,0E-10	3,1E-10
180	5,1E-10	2,9E-09	4,3E-09	5,1E-09	4,3E-09	2,4E-09	1,4E-09	7,2E-10	3,7E-10
200	6,4E-10	3,6E-09	5,5E-09	6,5E-09	5,6E-09	3,2E-09	1,8E-09	9,4E-10	4,8E-10
220	8,1E-10	4,6E-09	7,1E-09	8,6E-09	7,6E-09	4,4E-09	2,5E-09	1,3E-09	6,8E-10
240	8,4E-10	4,7E-09	7,1E-09	8,4E-09	7,2E-09	4,0E-09	2,3E-09	1,2E-09	6,2E-10
260	5,0E-10	2,8E-09	4,2E-09	4,9E-09	4,1E-09	2,3E-09	1,3E-09	6,7E-10	3,4E-10
280	3,1E-10	1,7E-09	2,6E-09	3,0E-09	2,5E-09	1,3E-09	7,4E-10	3,9E-10	2,0E-10
300	3,4E-10	1,9E-09	2,8E-09	3,3E-09	2,7E-09	1,5E-09	8,4E-10	4,4E-10	2,3E-10
320	3,6E-10	2,0E-09	3,0E-09	3,5E-09	3,0E-09	1,6E-09	9,2E-10	4,9E-10	2,5E-10
340	4,1E-10	2,3E-09	3,6E-09	4,3E-09	3,8E-09	2,2E-09	1,2E-09	6,6E-10	3,4E-10
360	4,6E-10	2,6E-09	4,0E-09	4,9E-09	4,4E-09	2,5E-09	1,4E-09	7,7E-10	4,0E-10

Les courbes représentant les concentrations en dioxines en fonction de la distance par rapport à la source, et ce pour les différentes directions du vent, peuvent alors être tracées :

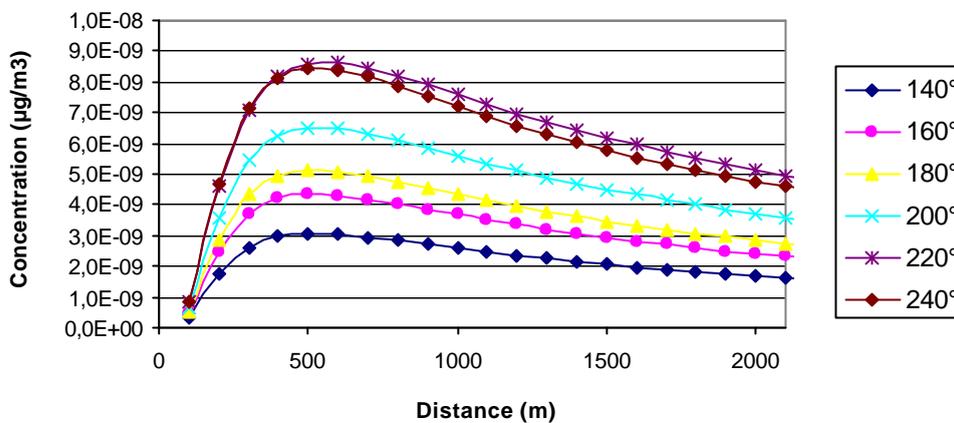
- Entre 20° et 120° :

**Concentration en dioxines pour la CEDLM entre 20° et 120°
en fonction de la distance**



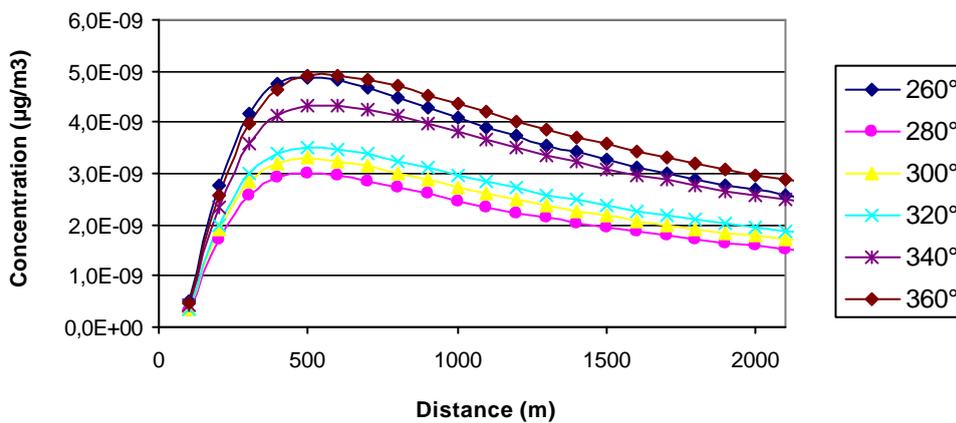
- Entre 140° et 240° :

**Concentration en dioxines pour la CEDLM entre 140° et 240°
en fonction de la distance**



- Entre 260° et 360° :

**Concentration en dioxines pour la CEDLM entre 260° et 360°
en fonction de la distance**



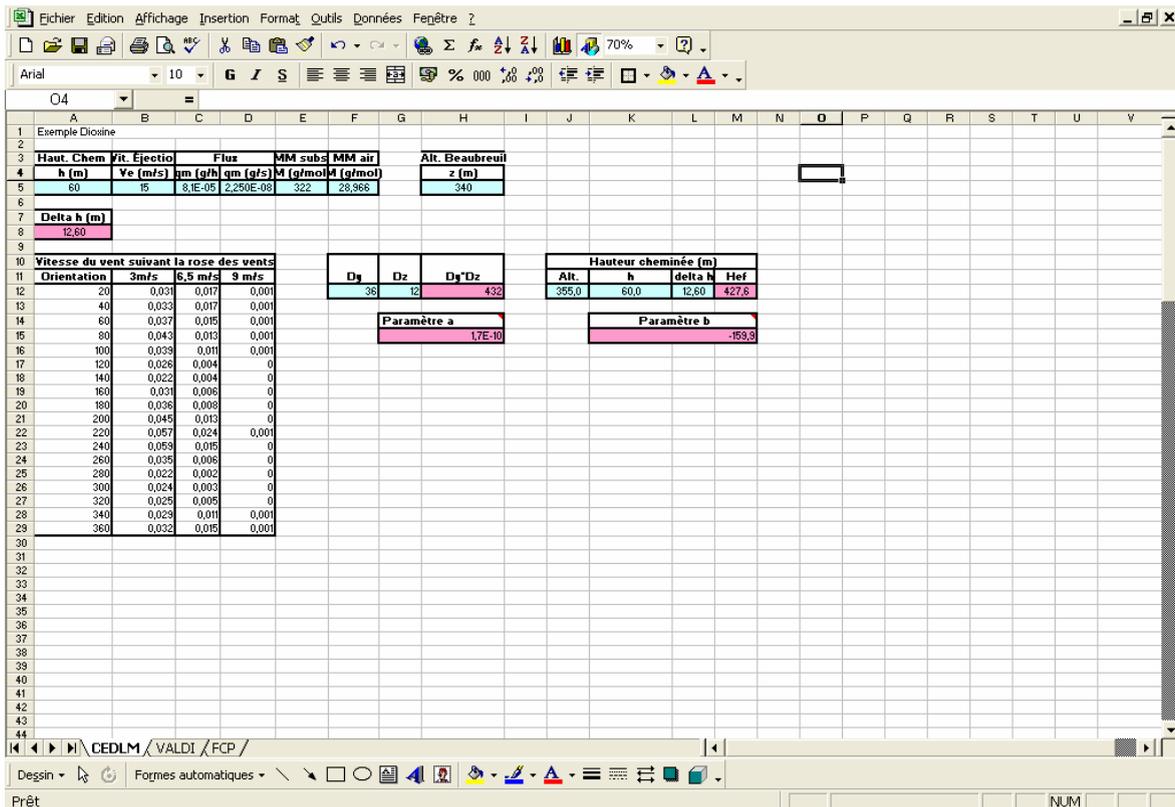


Figure 12 : Paramètres à entrer dans le modèle de dispersion atmosphérique

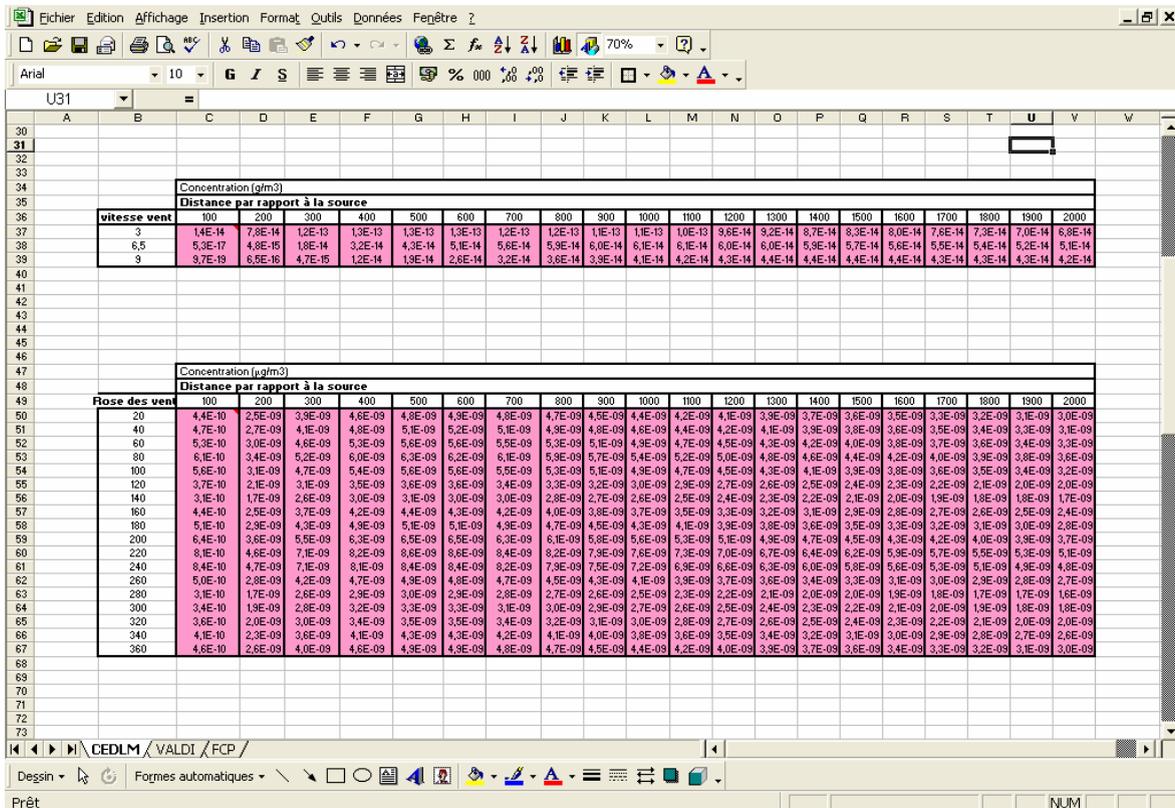
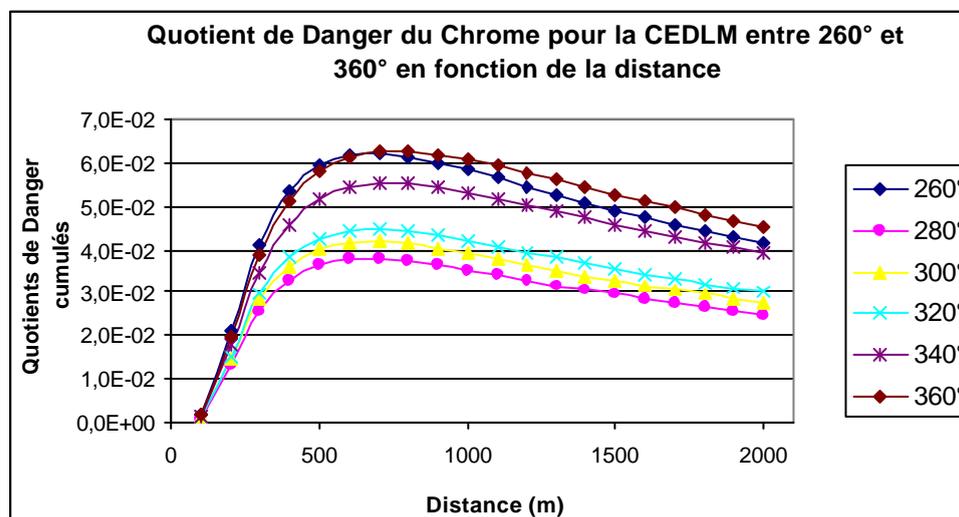
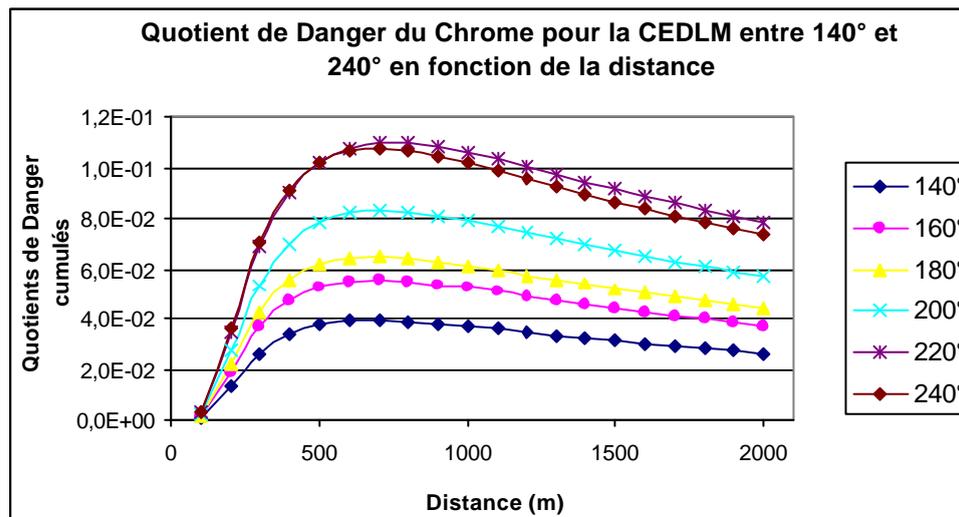
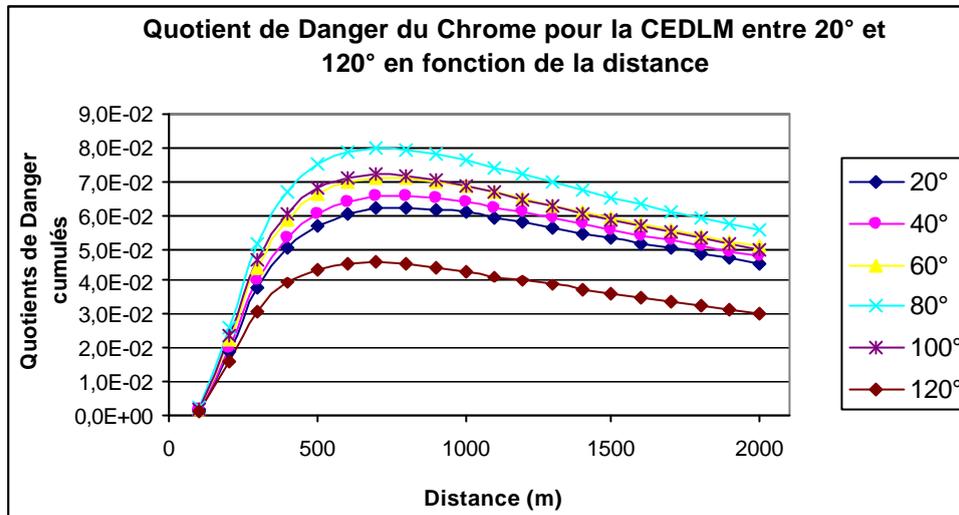


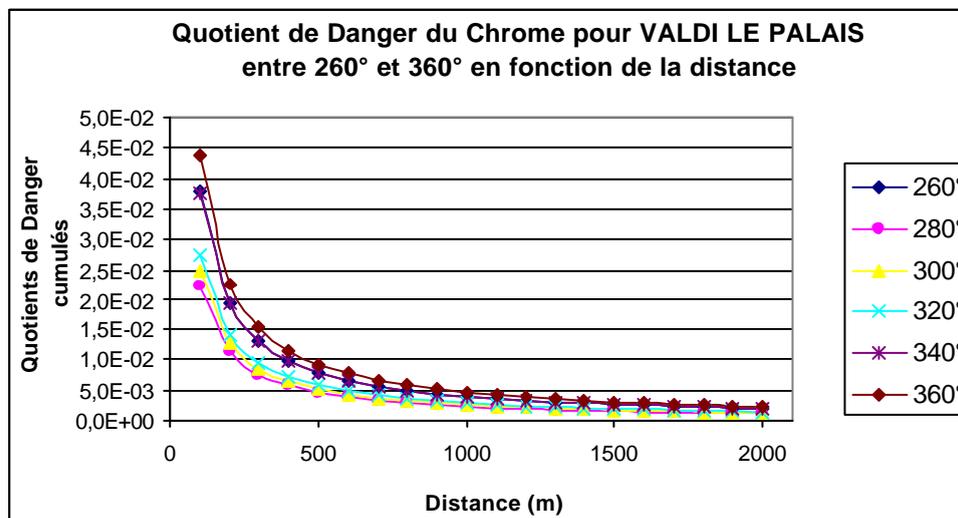
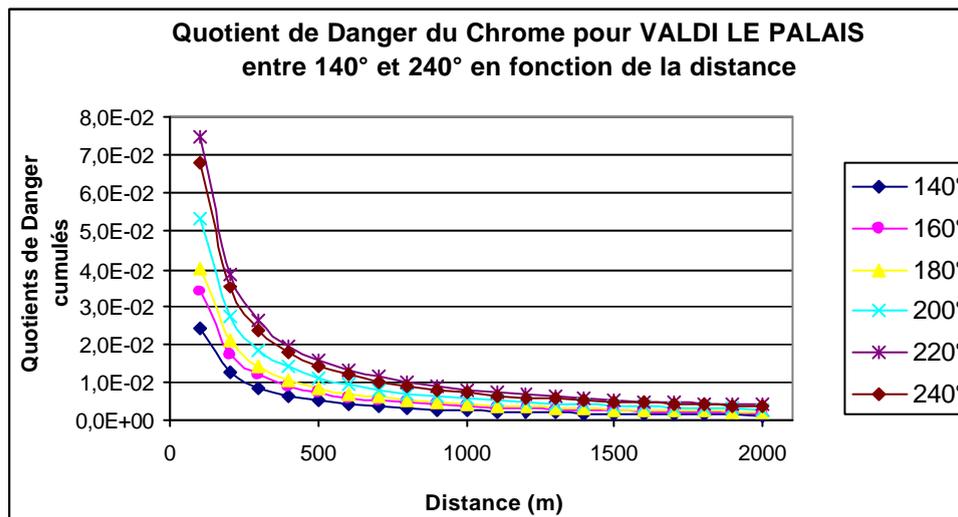
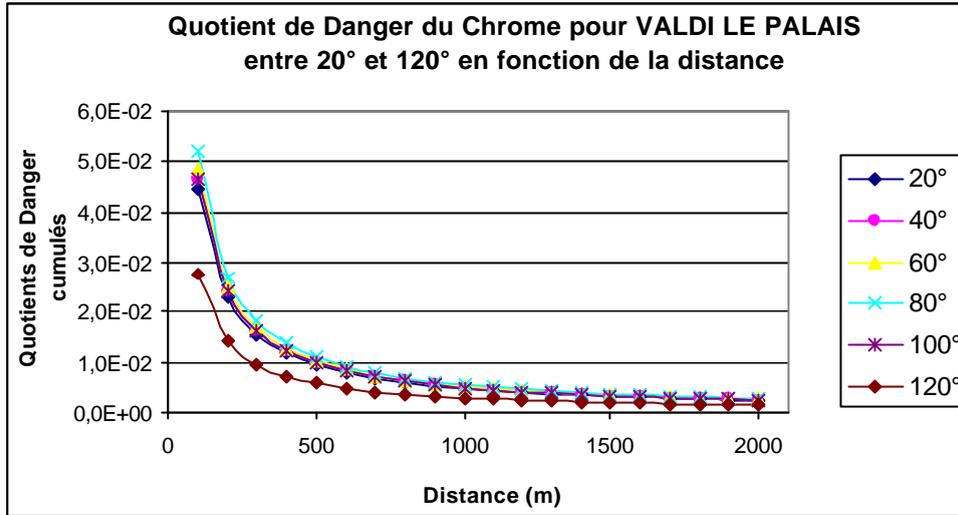
Figure 13 : Concentrations calculées via le modèle entre 100 m et 2 000 m par rapport à la source, entre 20° et 360°

Annexe 7 : Résultats de la modélisation pour la zone industrielle Nord

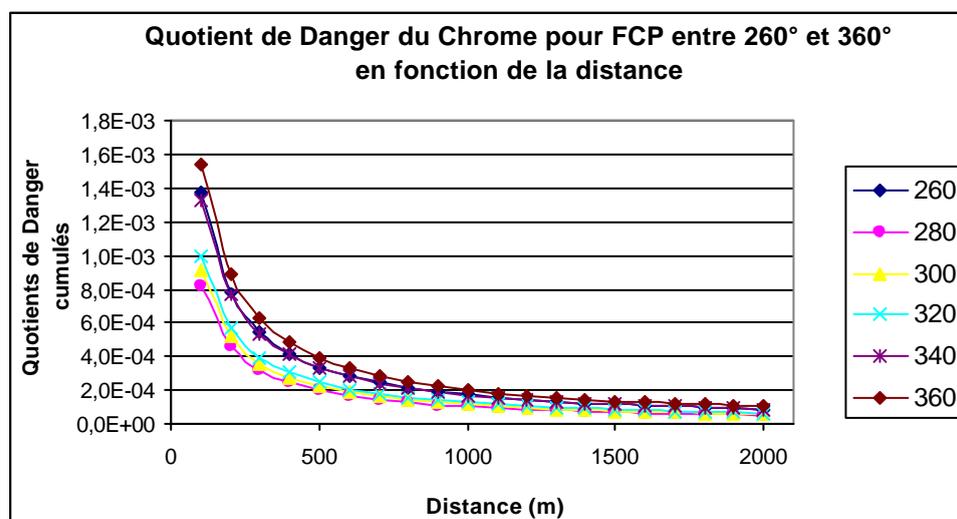
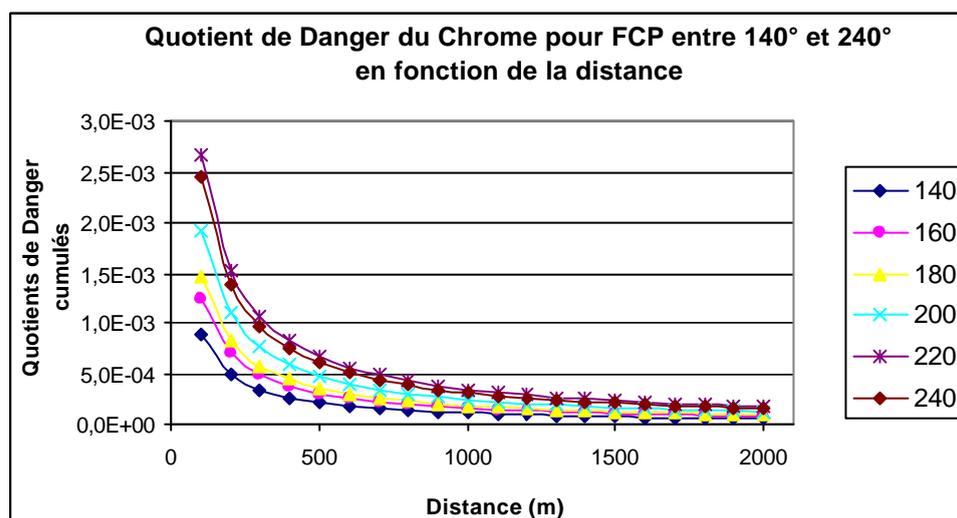
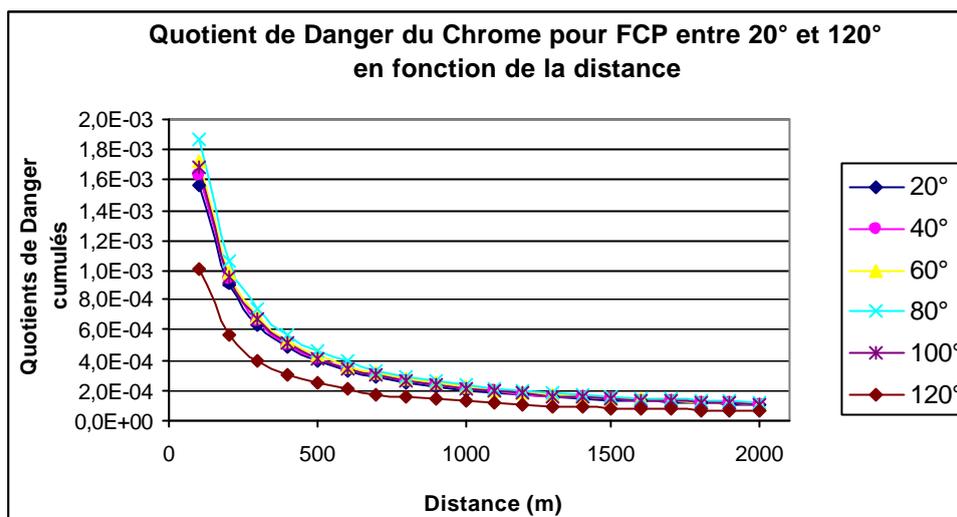
Effets systémiques – Chrome – CEDLM



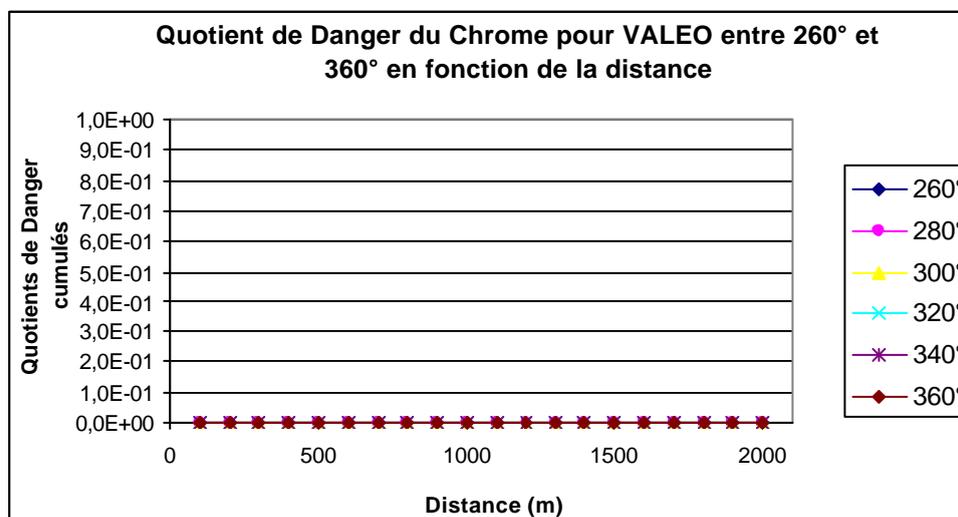
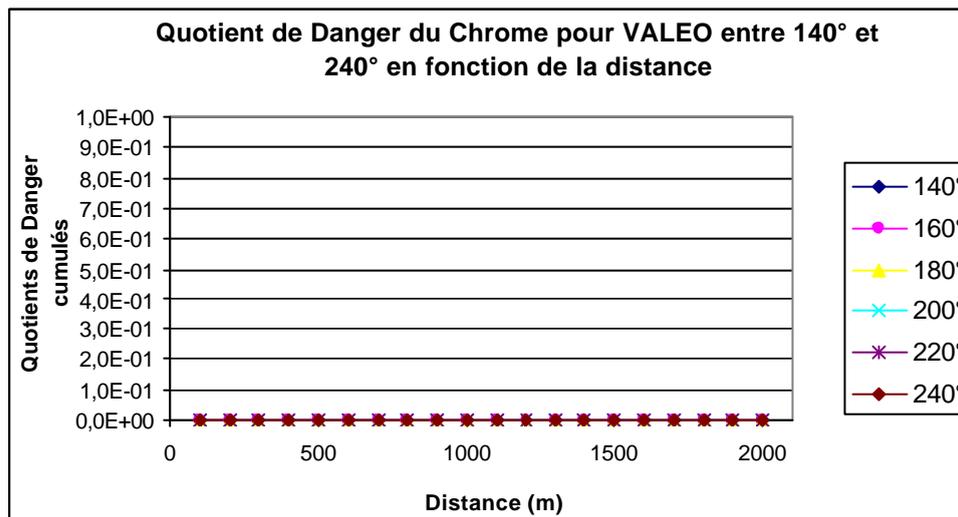
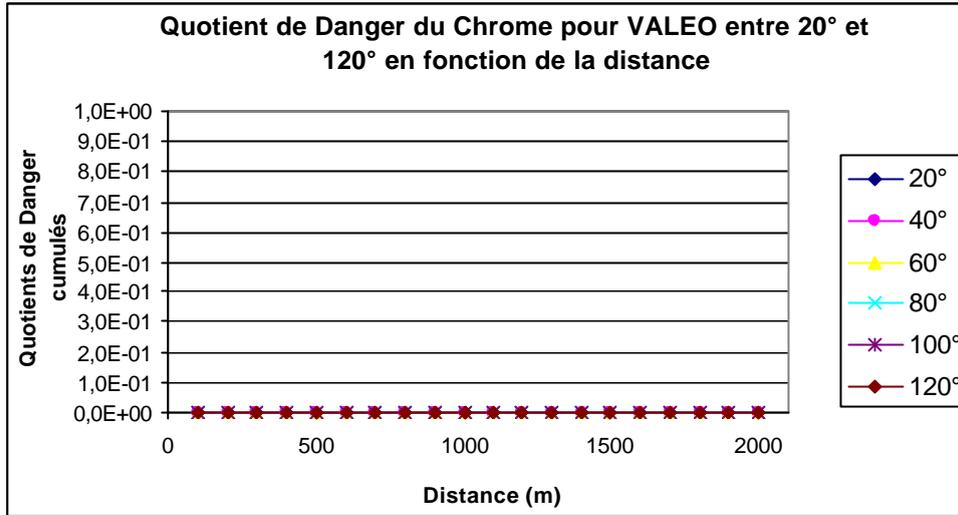
Effets systémiques – Chrome – VALDI LE PALAIS



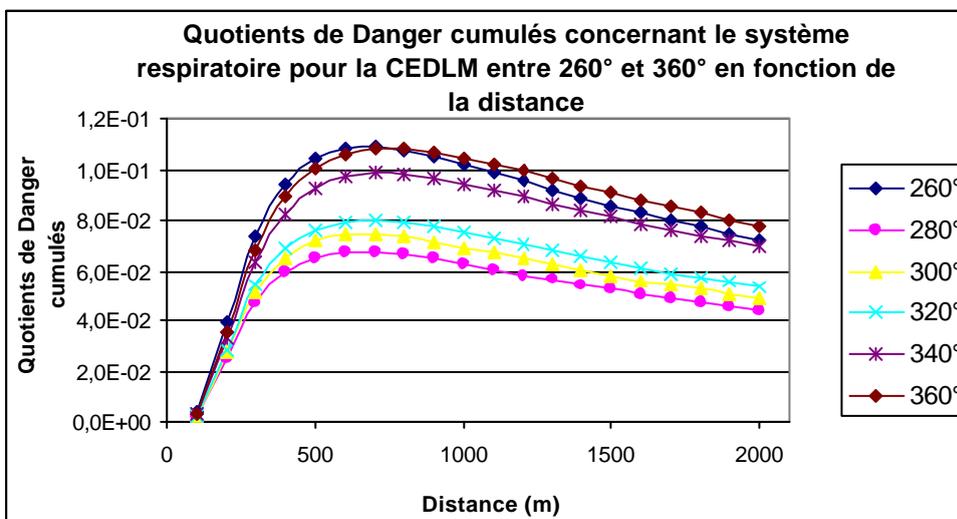
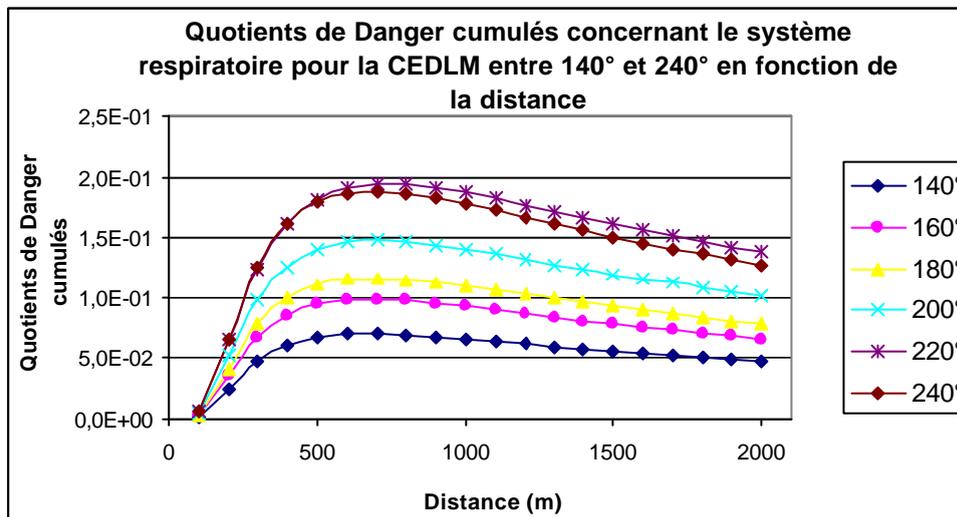
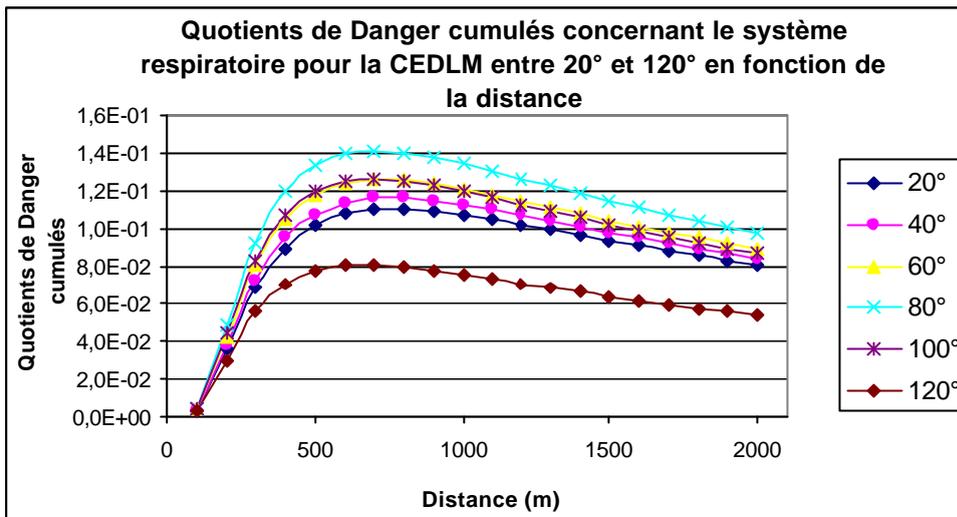
Effets systémiques – Chrome – FCP



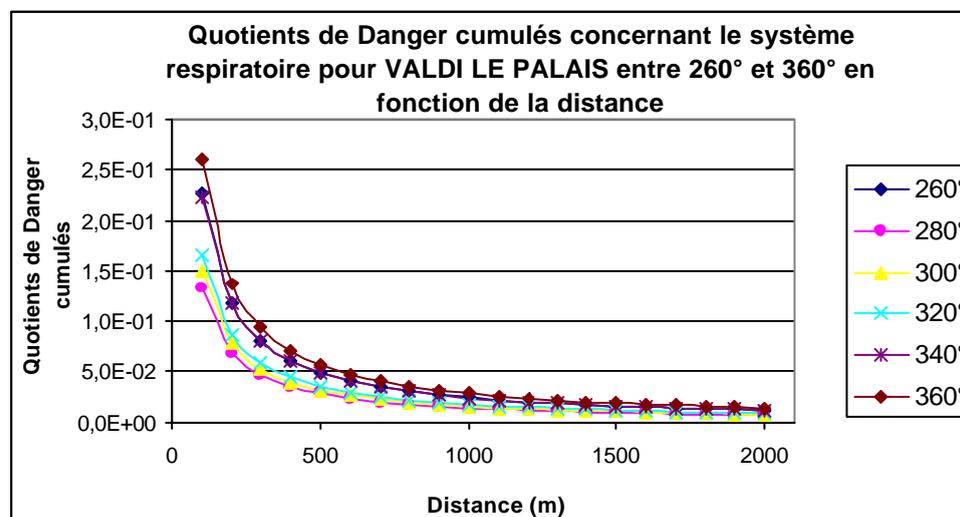
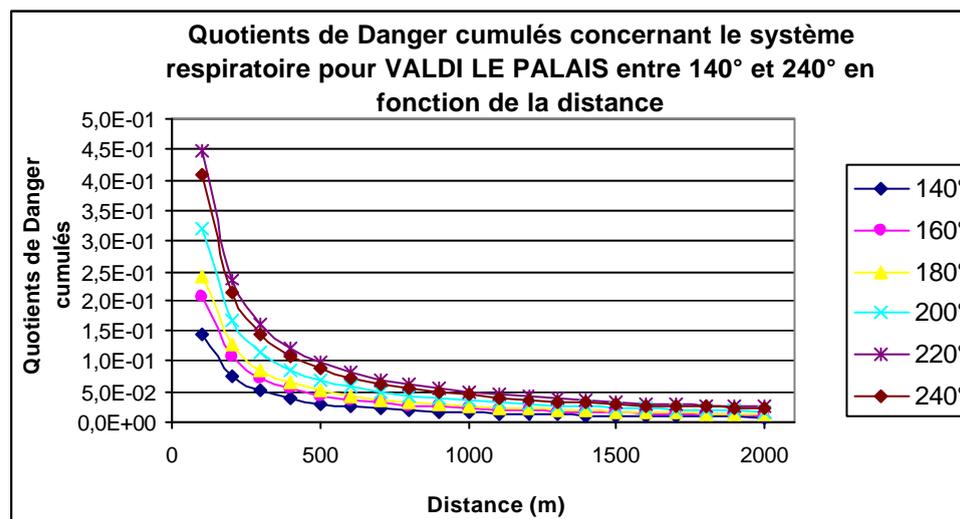
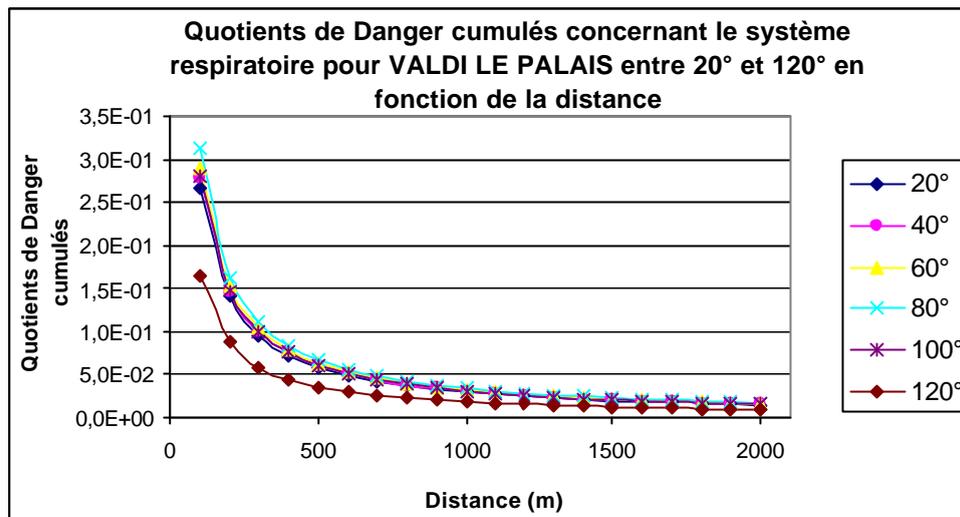
Effets systémiques – Chrome – VALEO



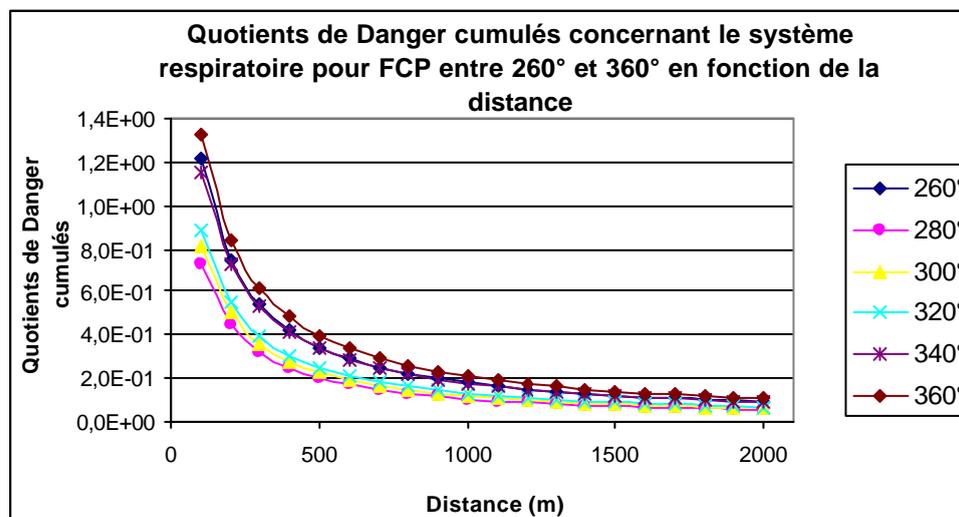
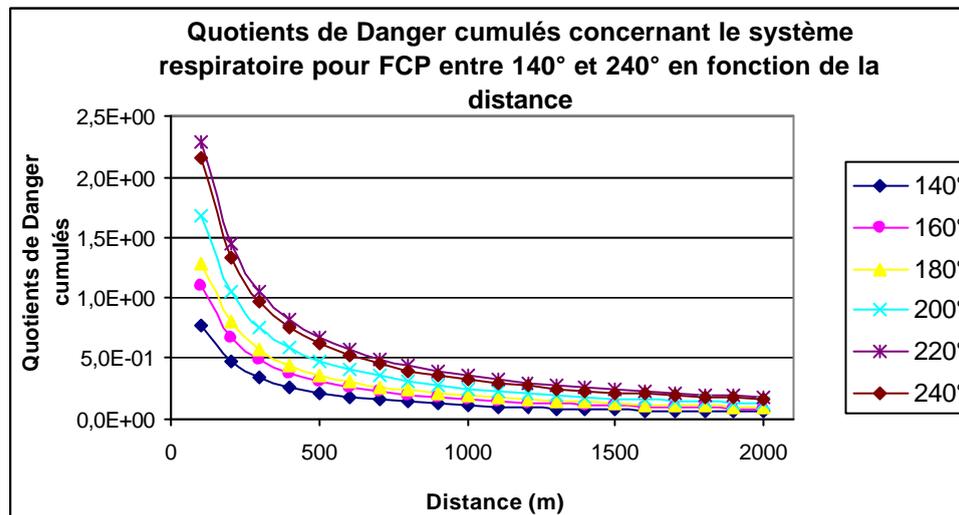
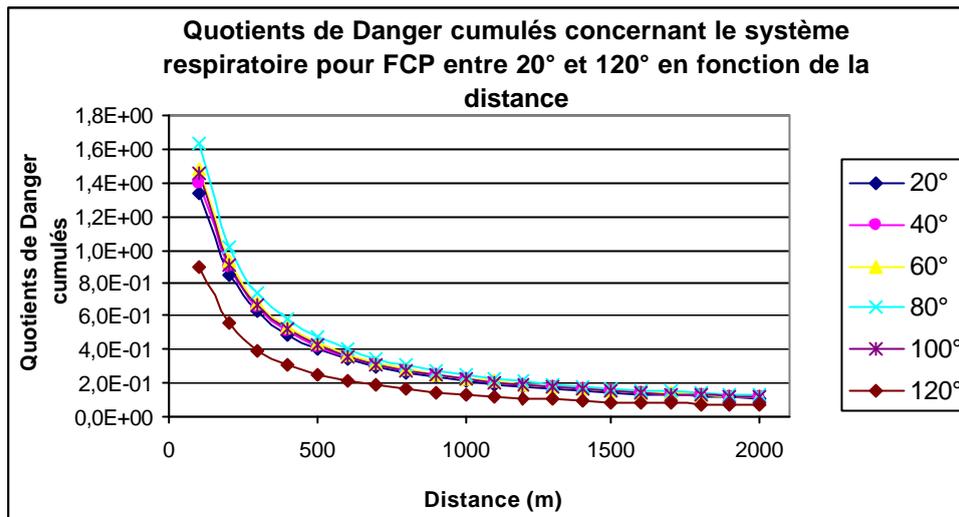
Effets systémiques – Système respiratoire – CEDLM



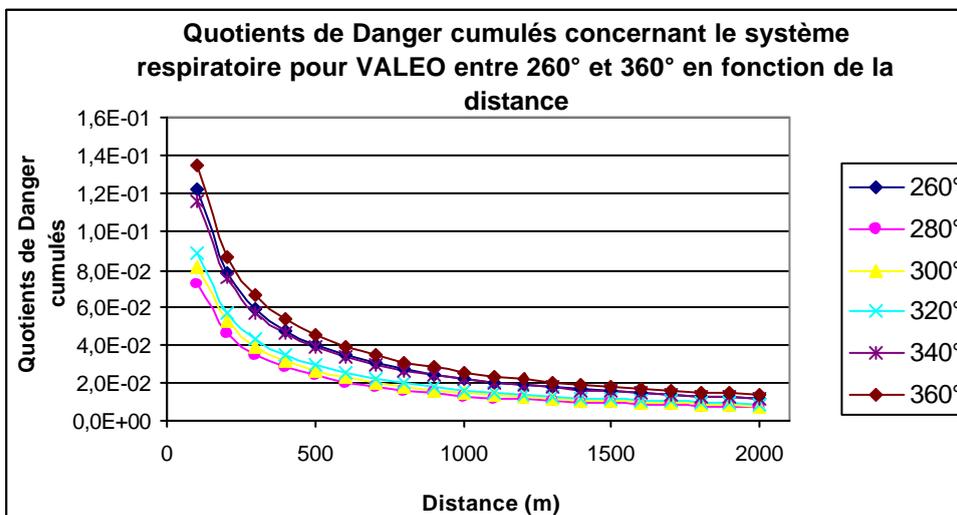
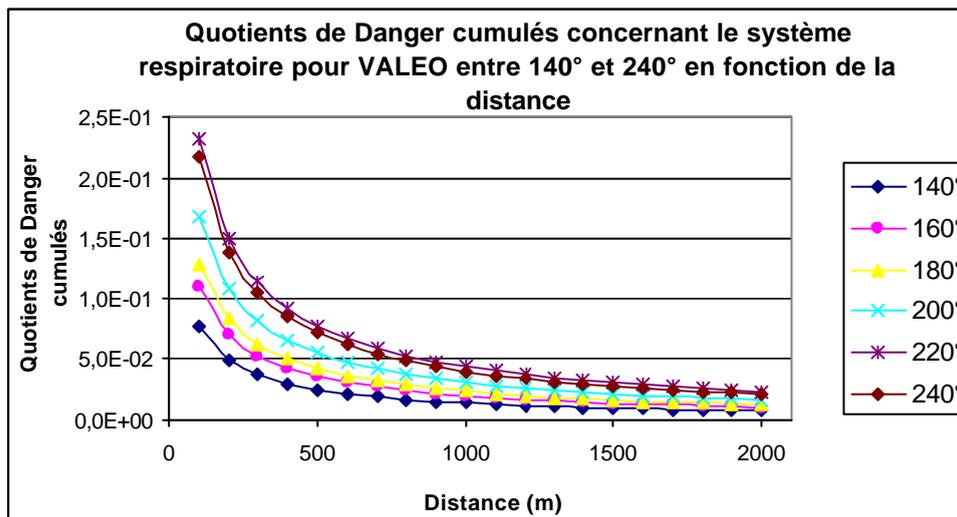
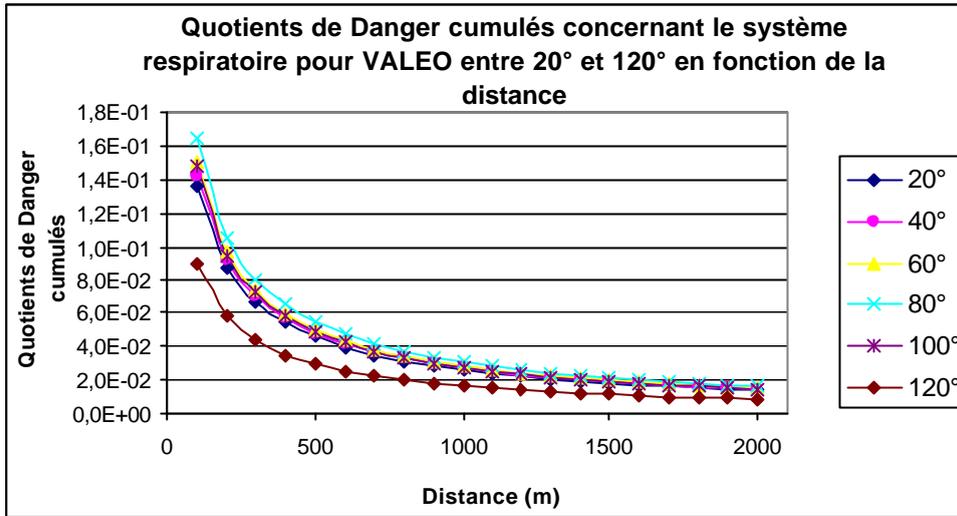
Effets systémiques – Système respiratoire – VALDI LE PALAIS



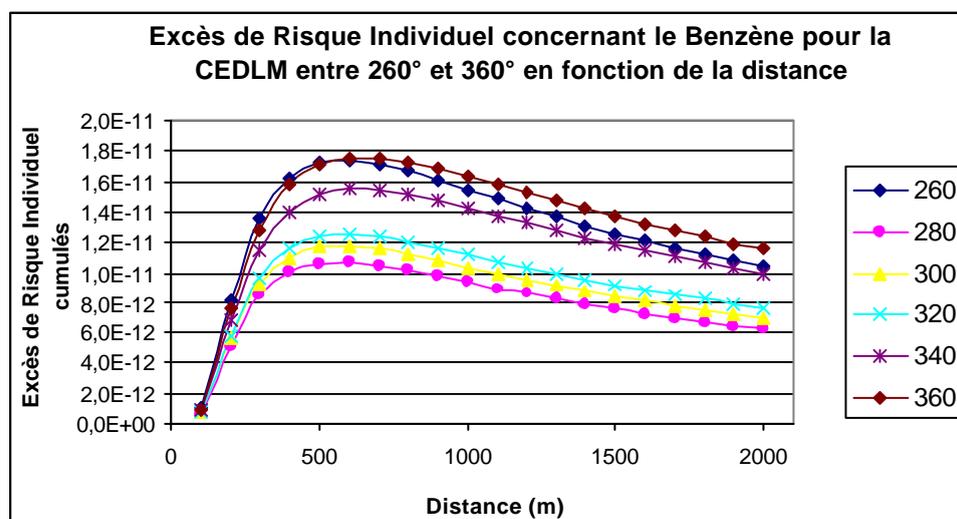
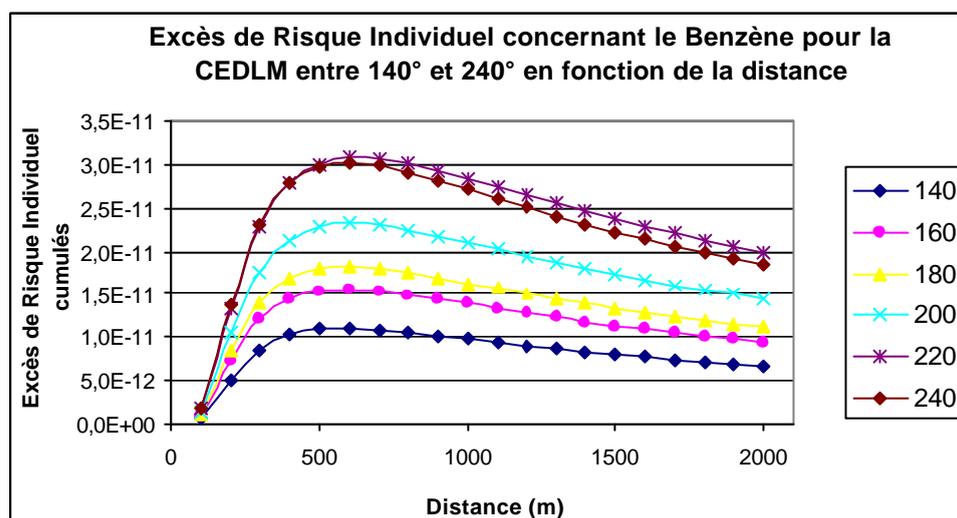
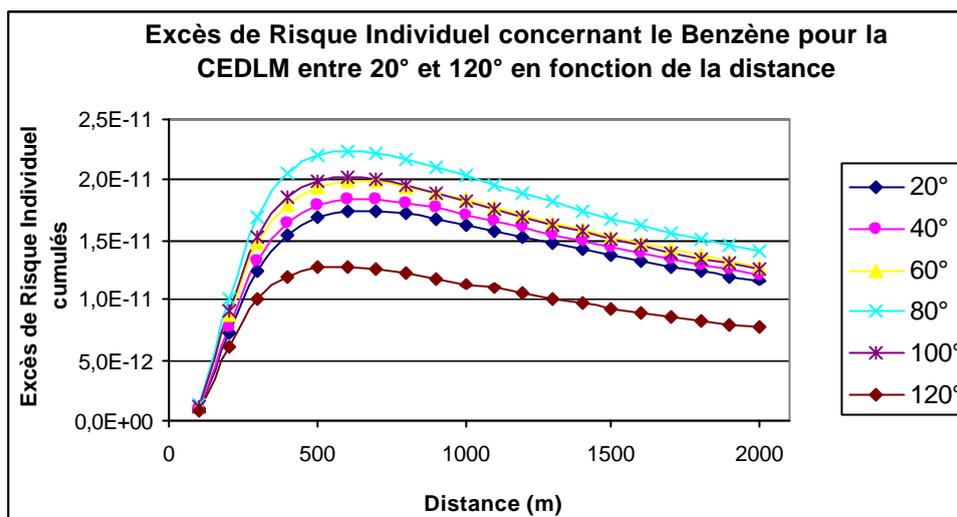
Effets systémiques – Système respiratoire – FCP



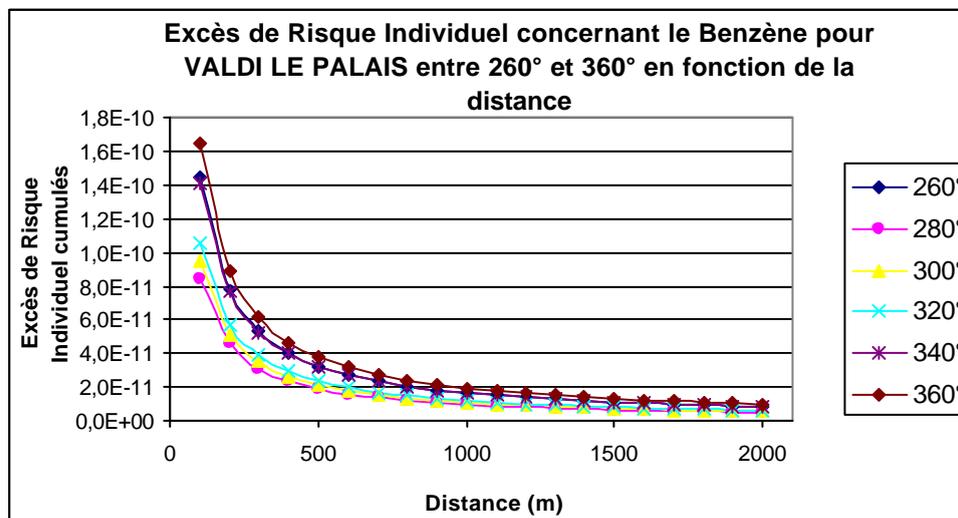
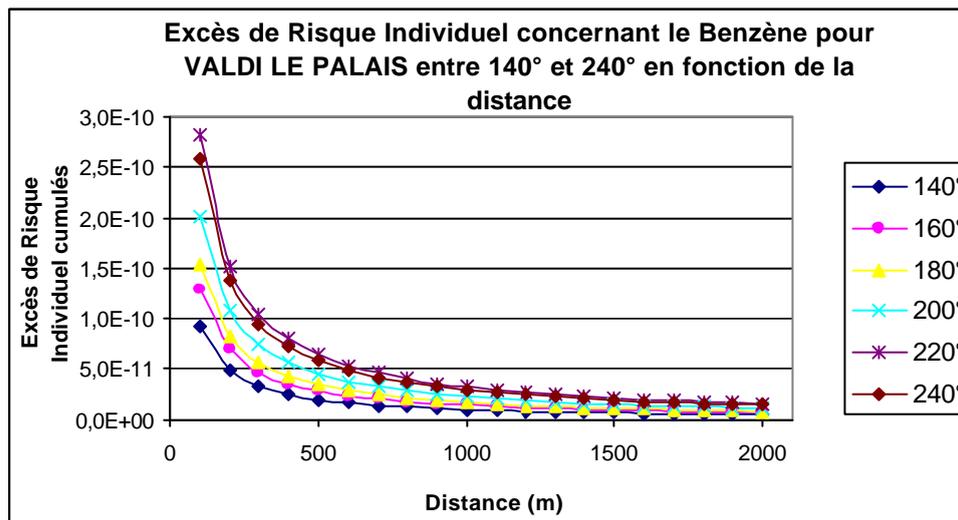
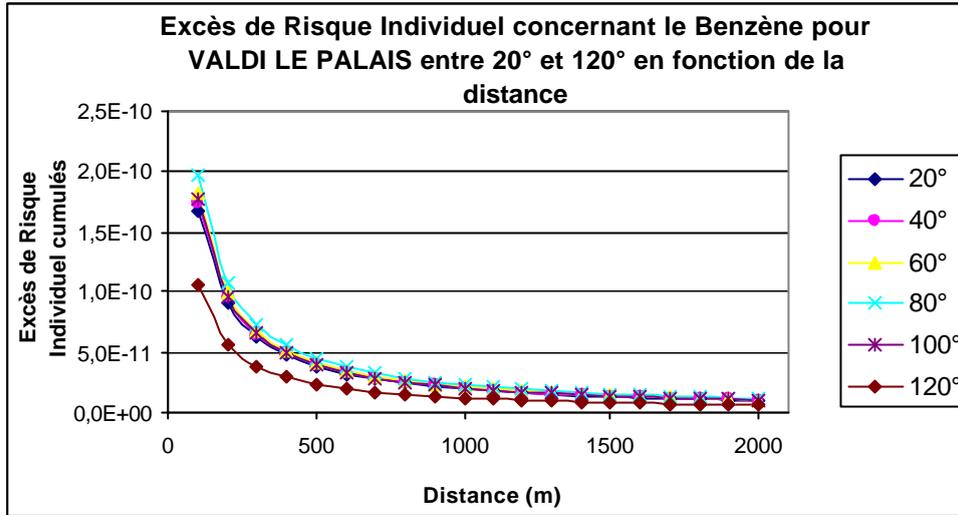
Effets systémiques – Système respiratoire – VALEO



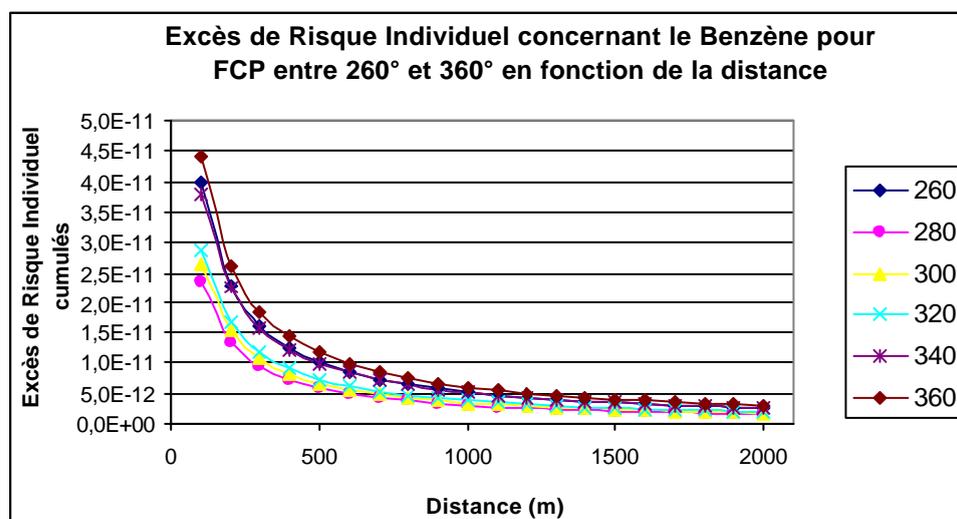
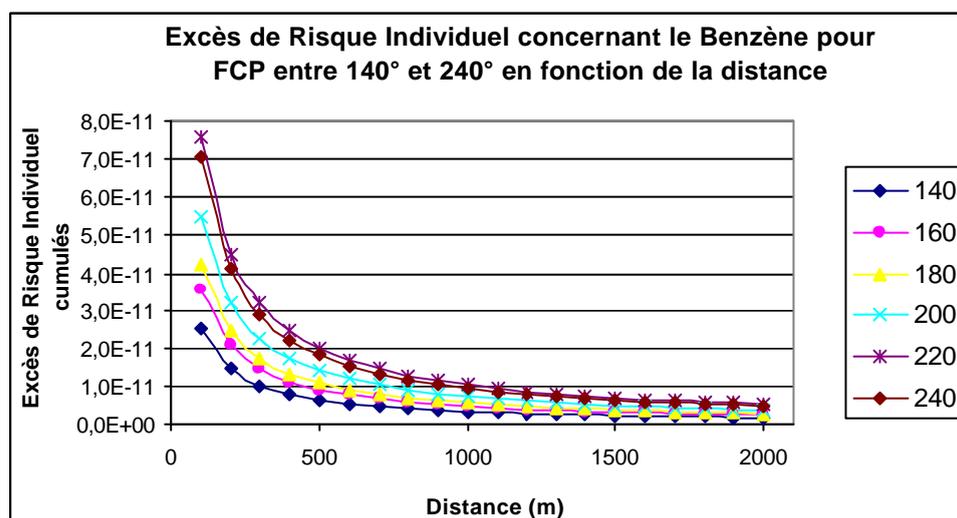
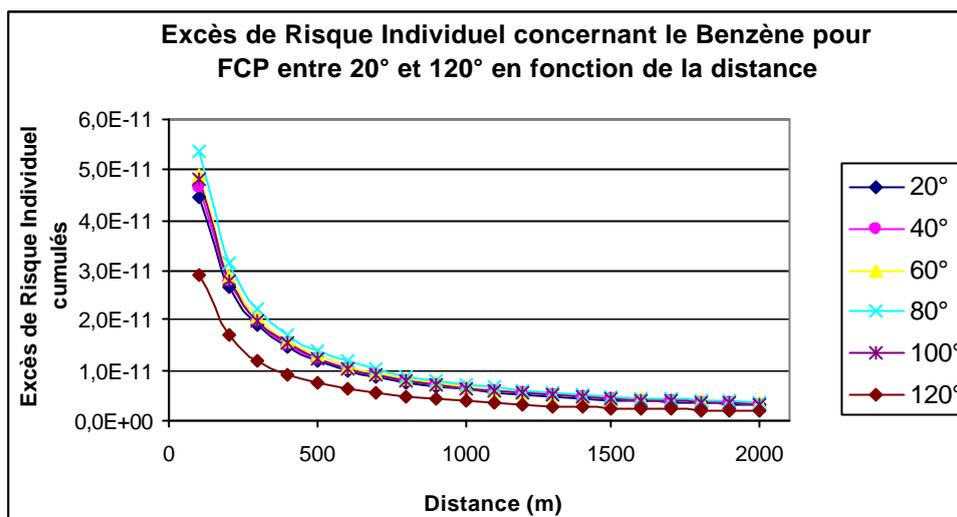
Effets cancérogènes – Benzène – CEDLM



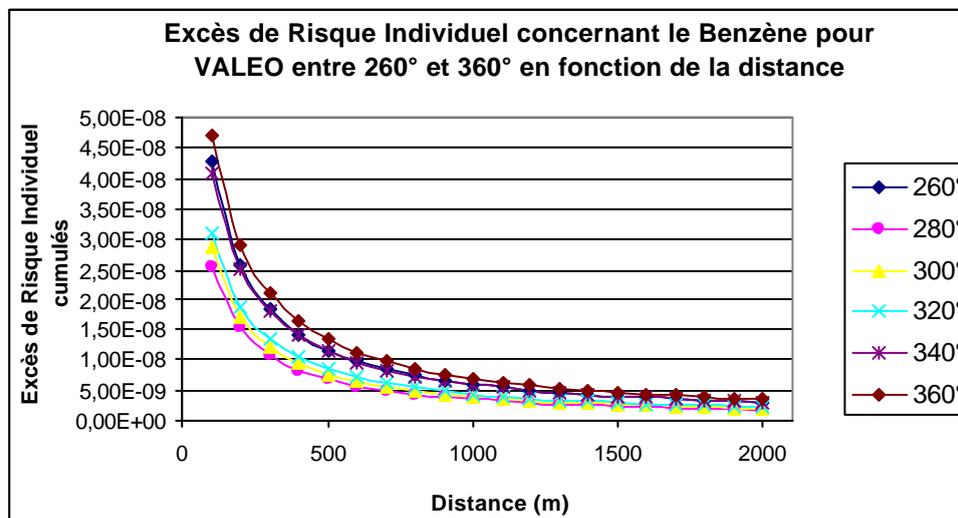
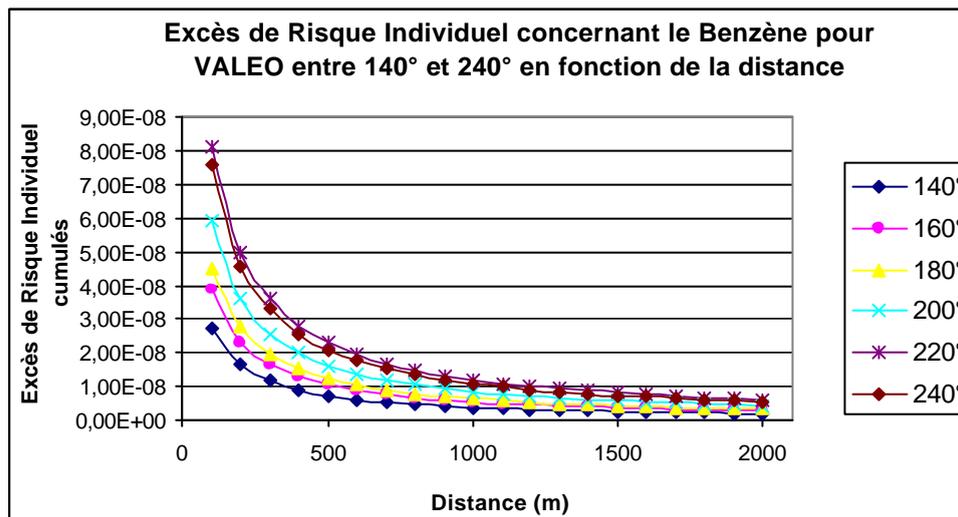
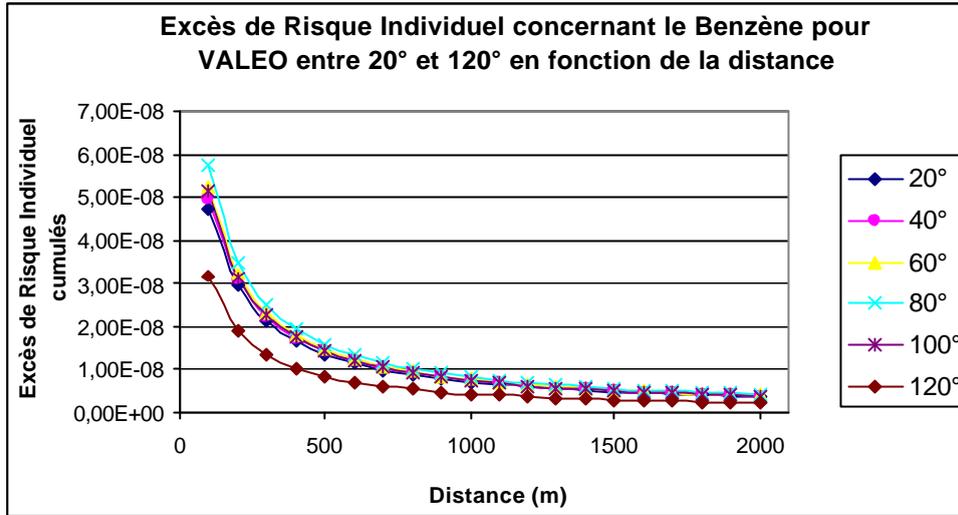
Effets cancérigènes – Benzène – VALDI LE PALAIS



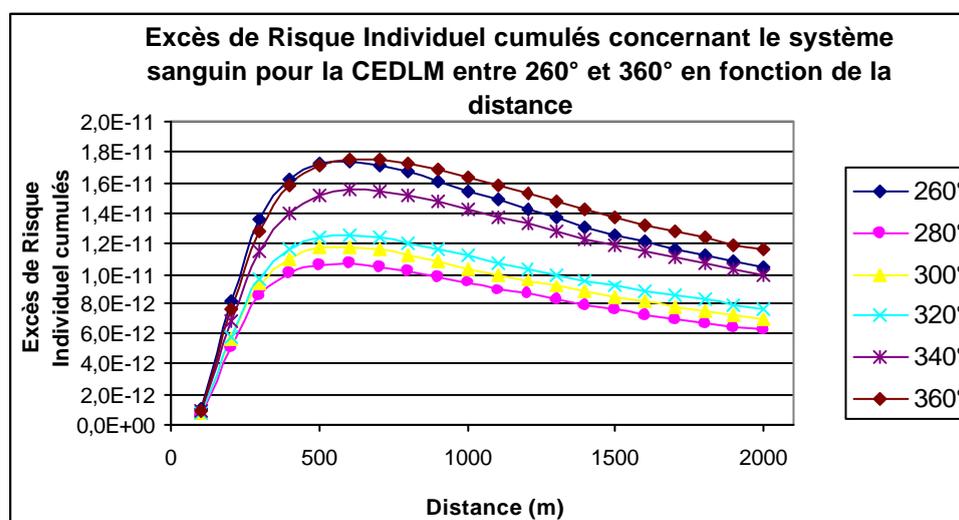
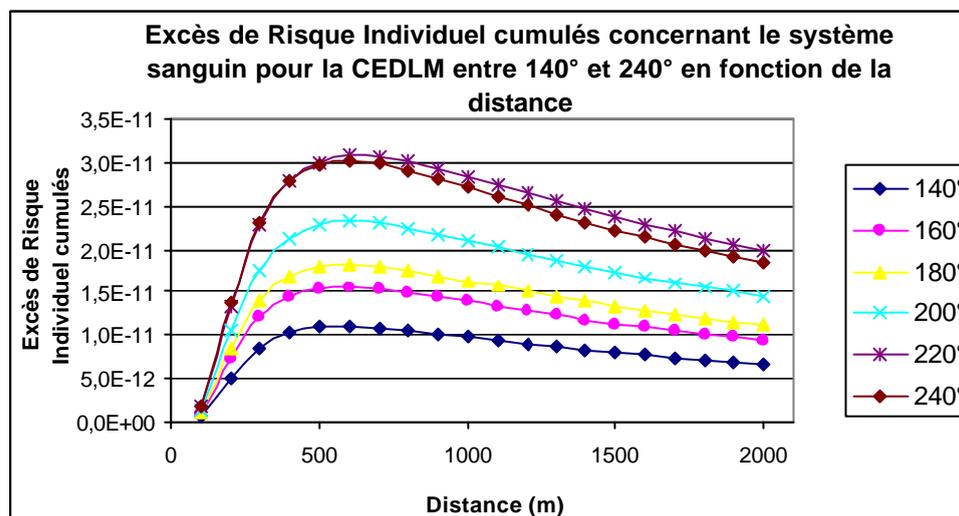
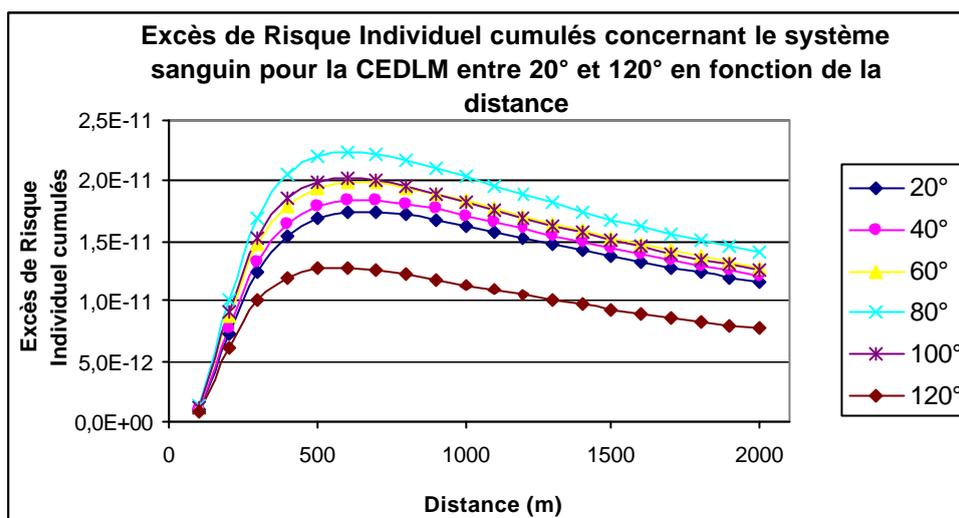
Effets cancérogènes – Benzène – FCP



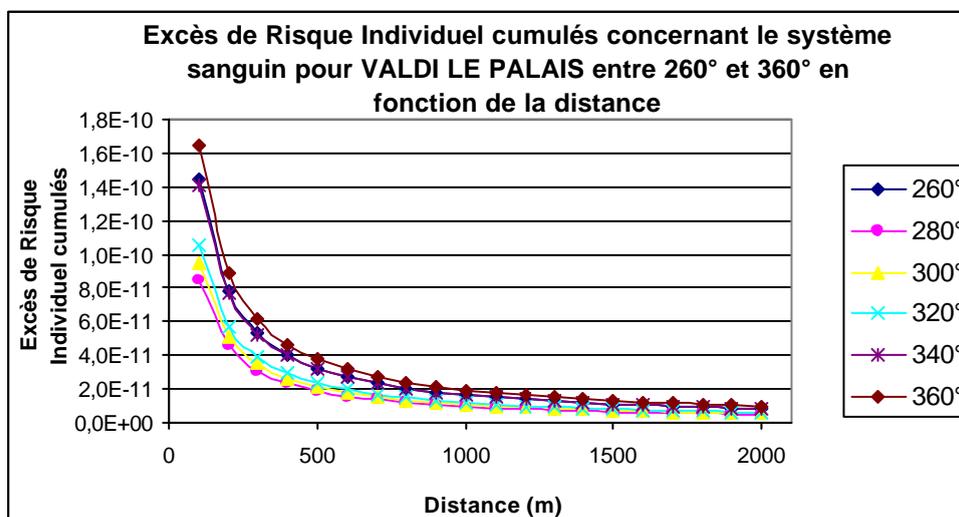
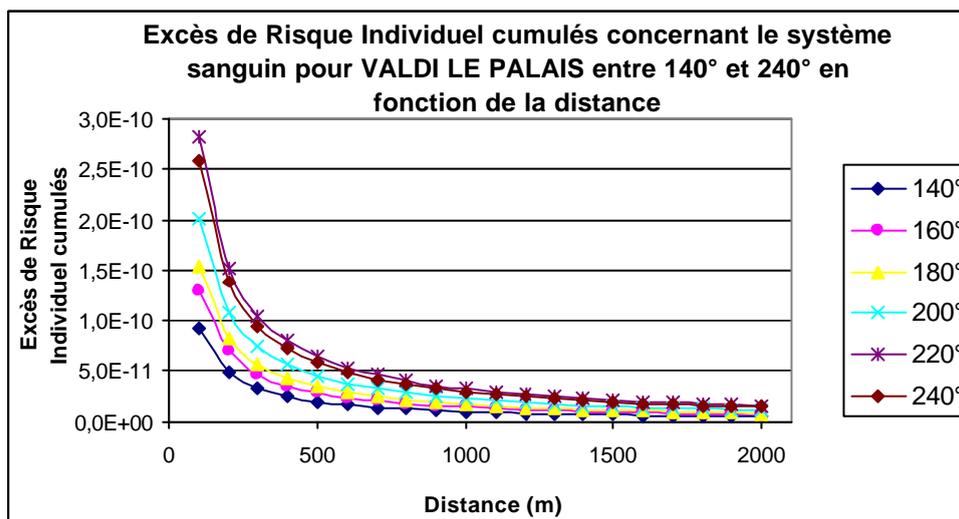
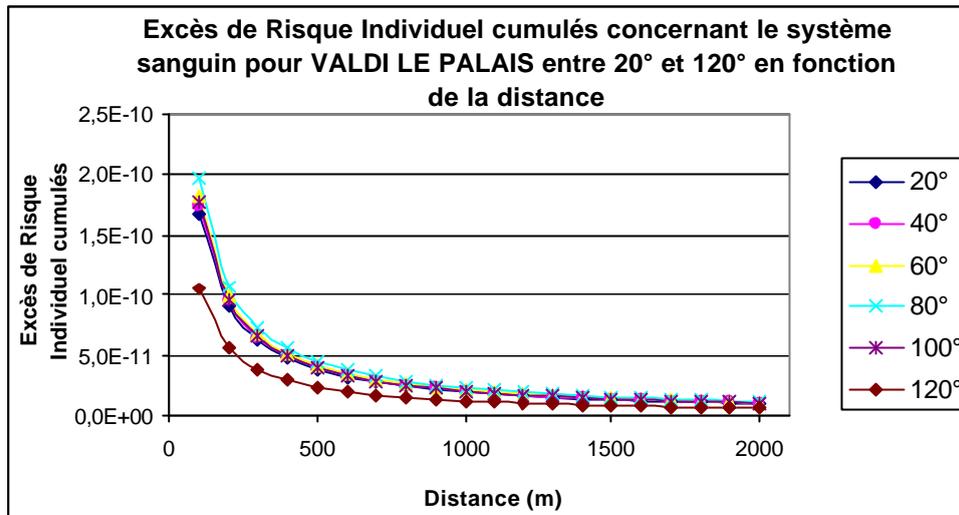
Effets cancérigènes – Benzène – VALEO



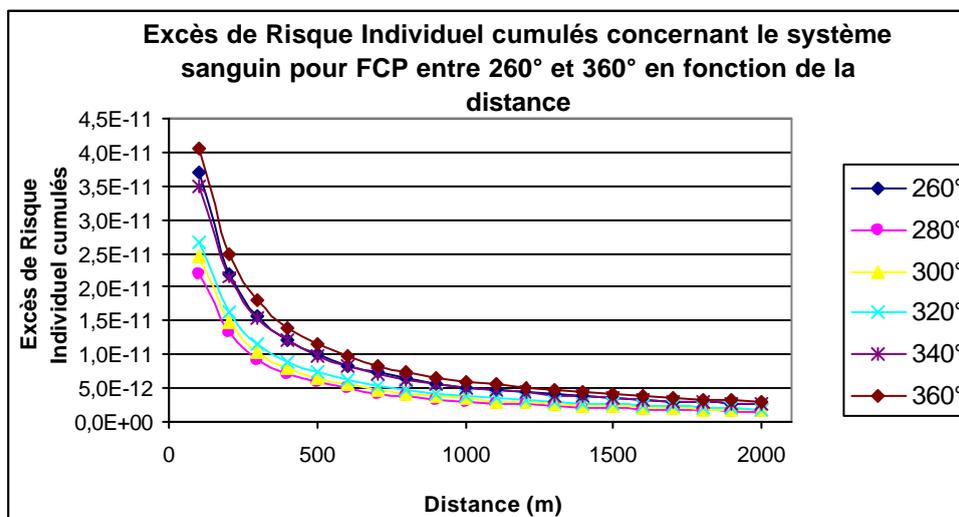
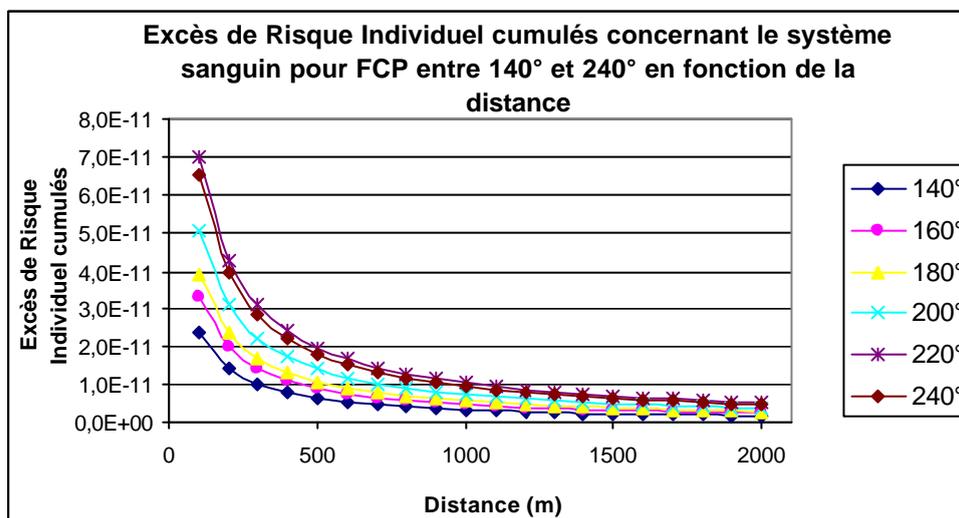
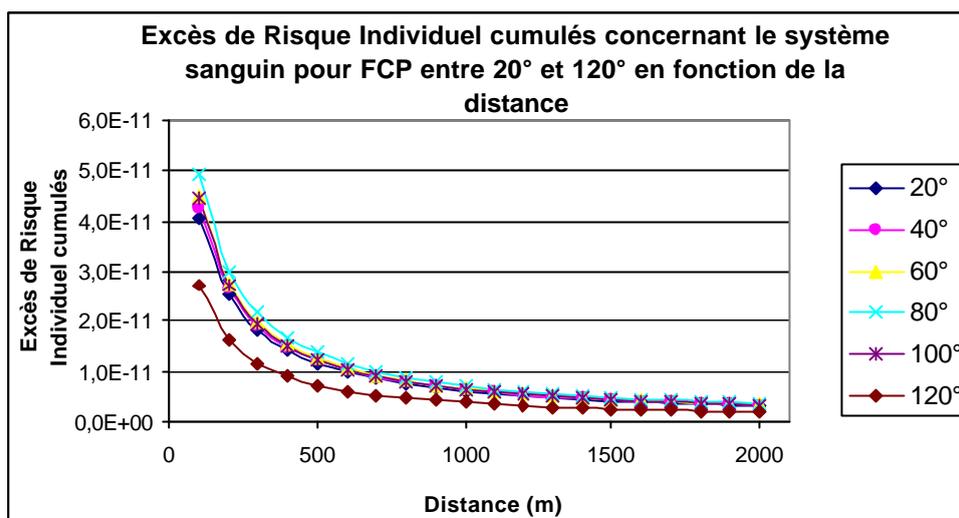
Effets cancérigènes - Système sanguin - CEDLM



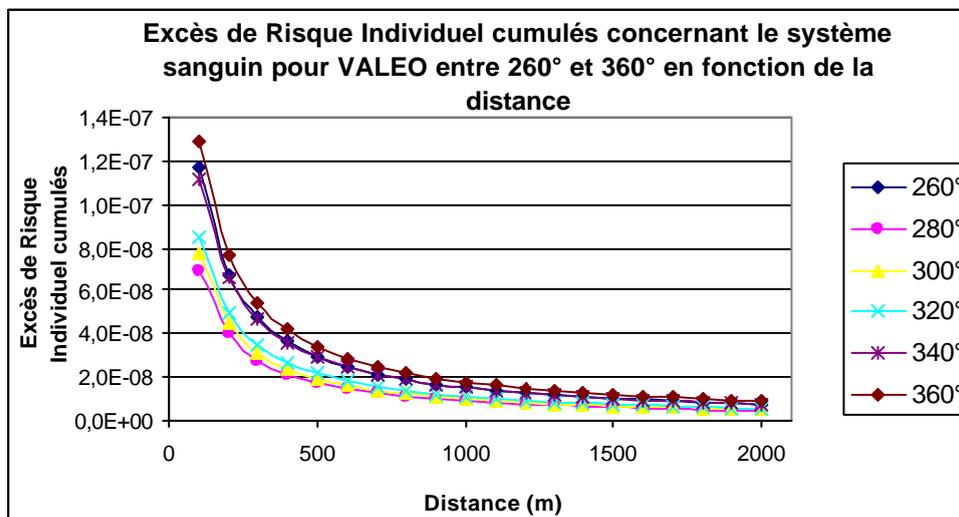
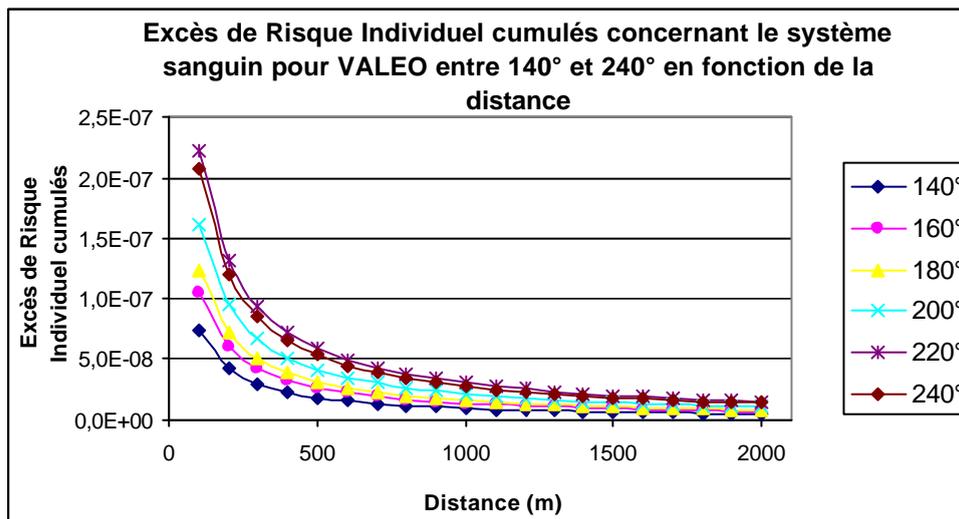
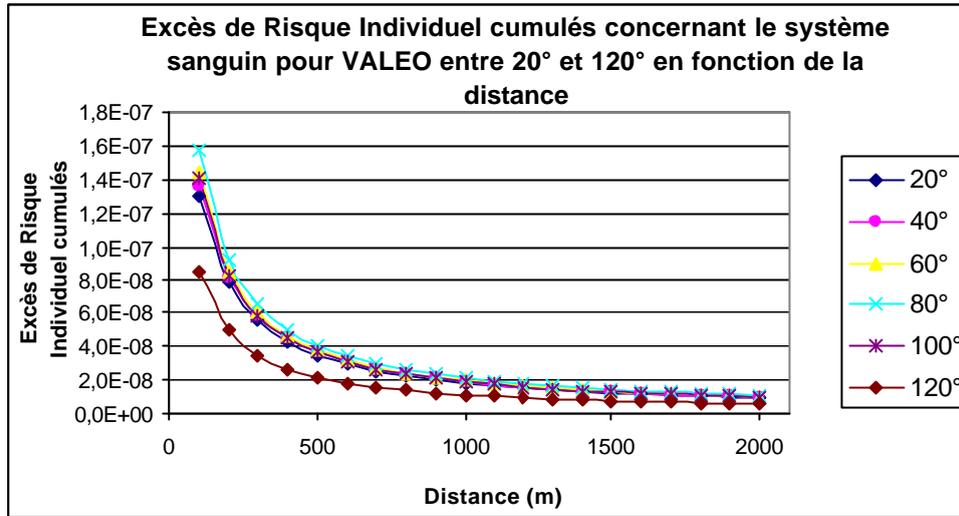
Effets cancérigènes - Système sanguin – VALDI LE PALAIS



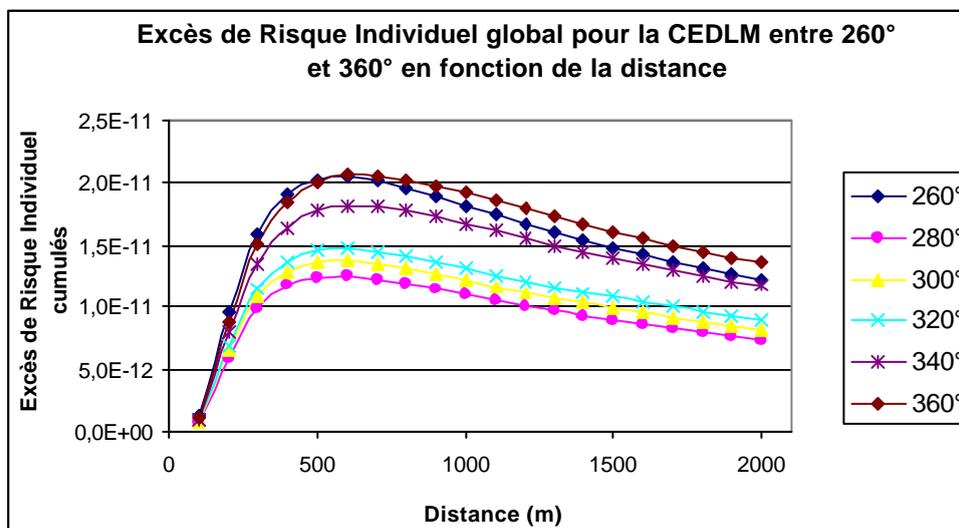
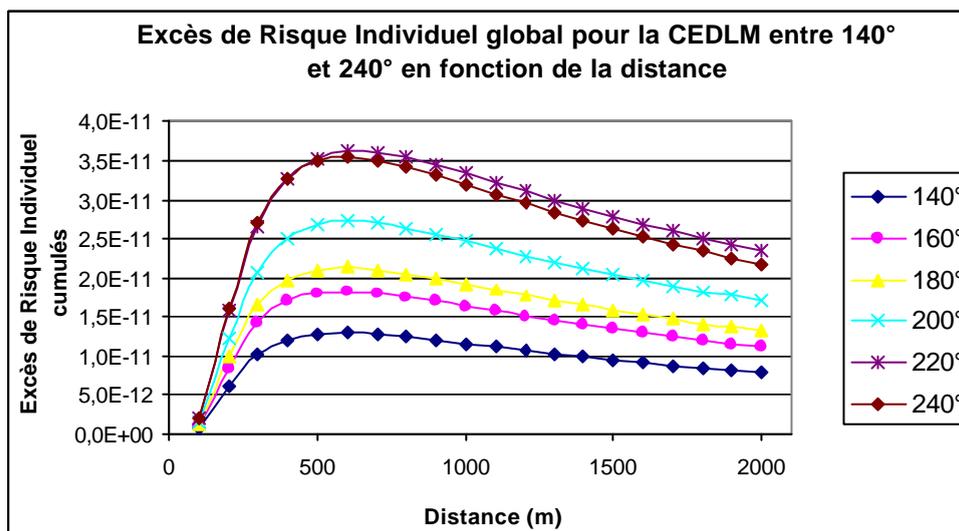
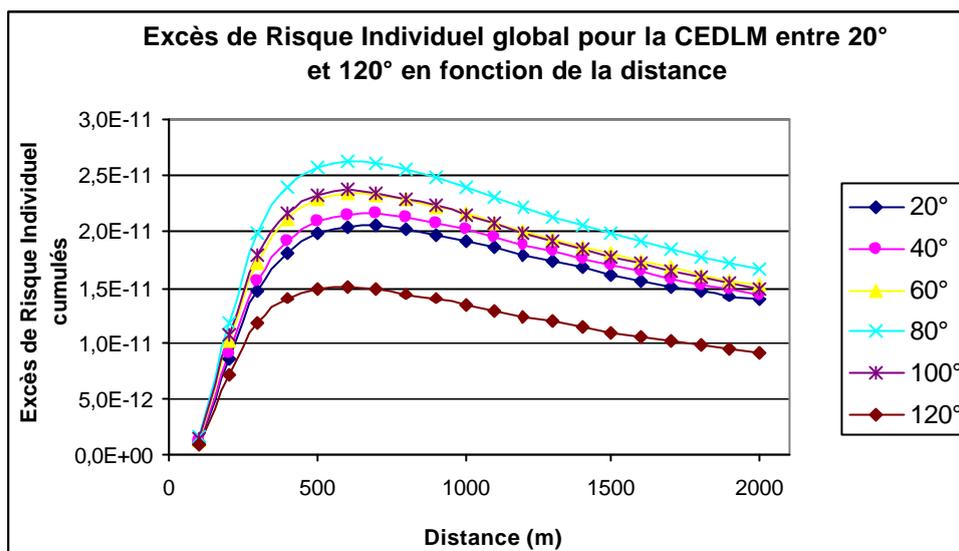
Effets cancérogènes - Système sanguin – FCP



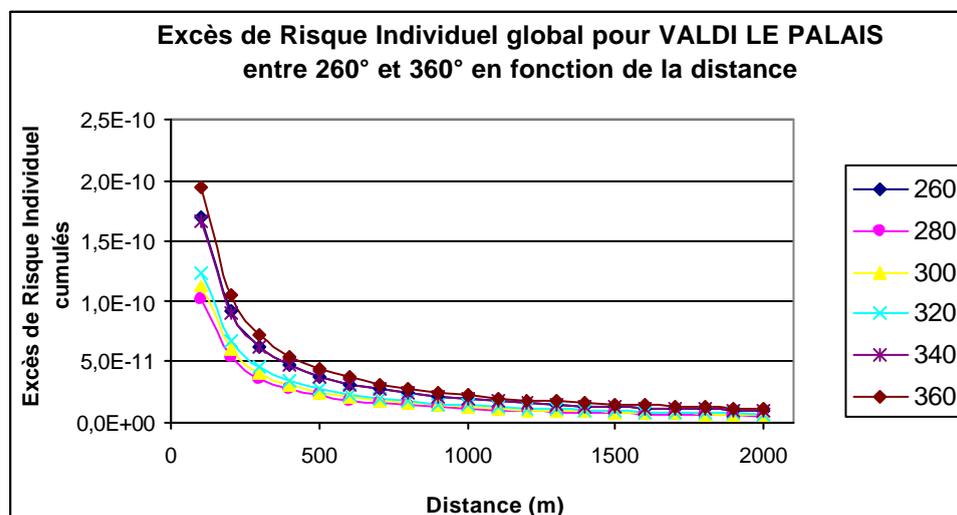
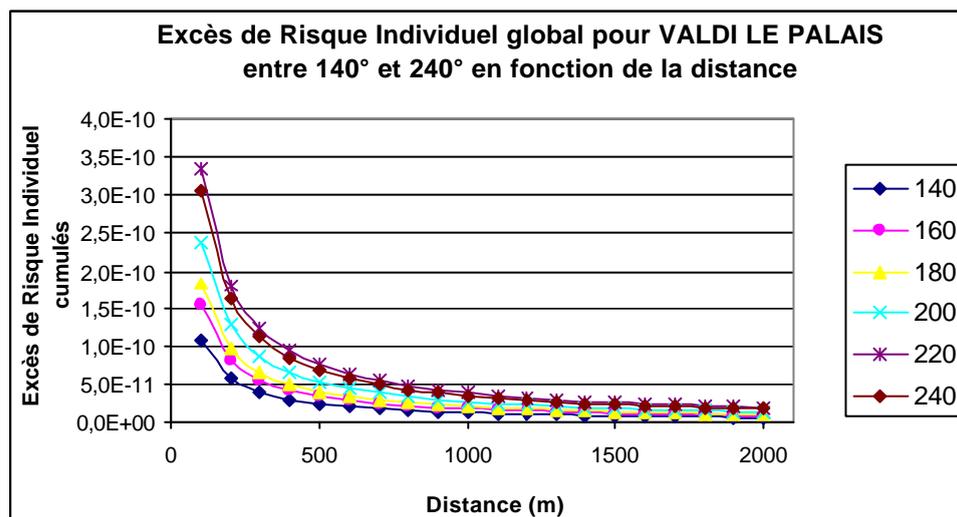
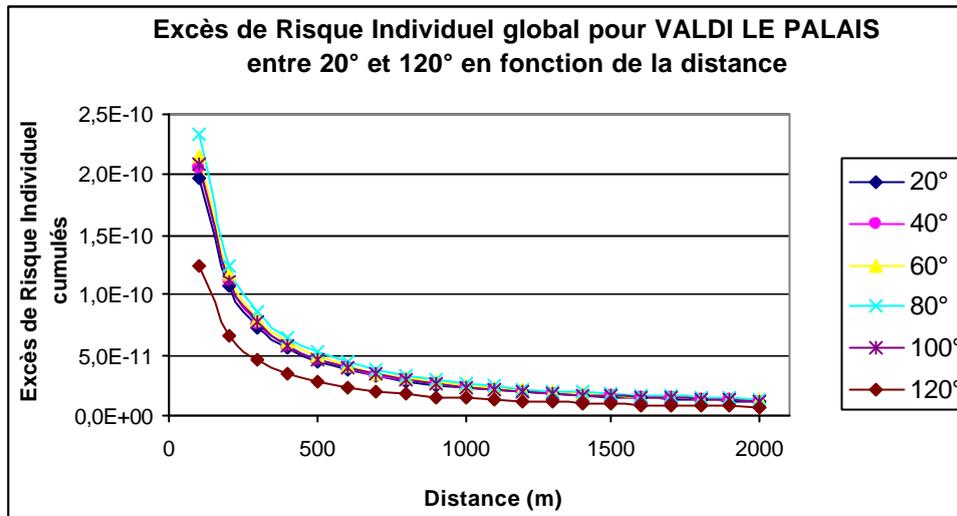
Effets cancérigènes - Système sanguin – VALEO



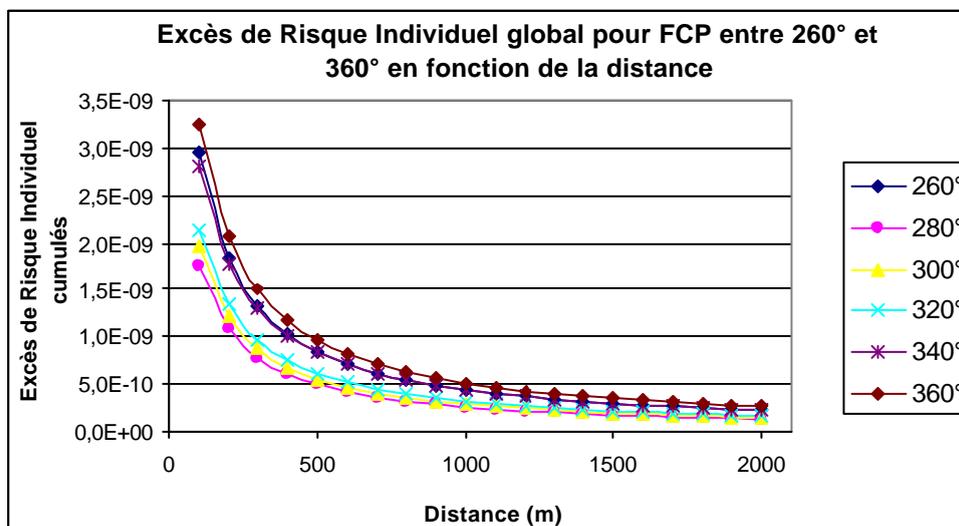
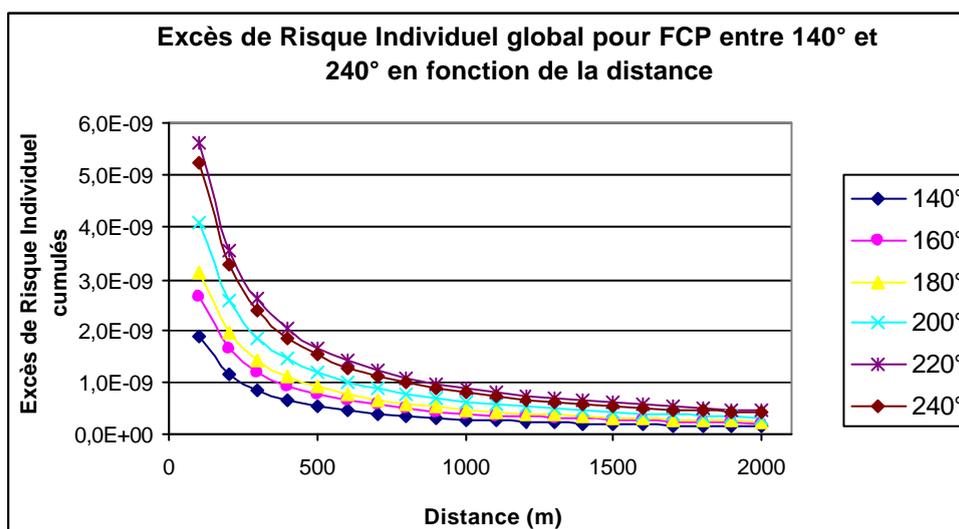
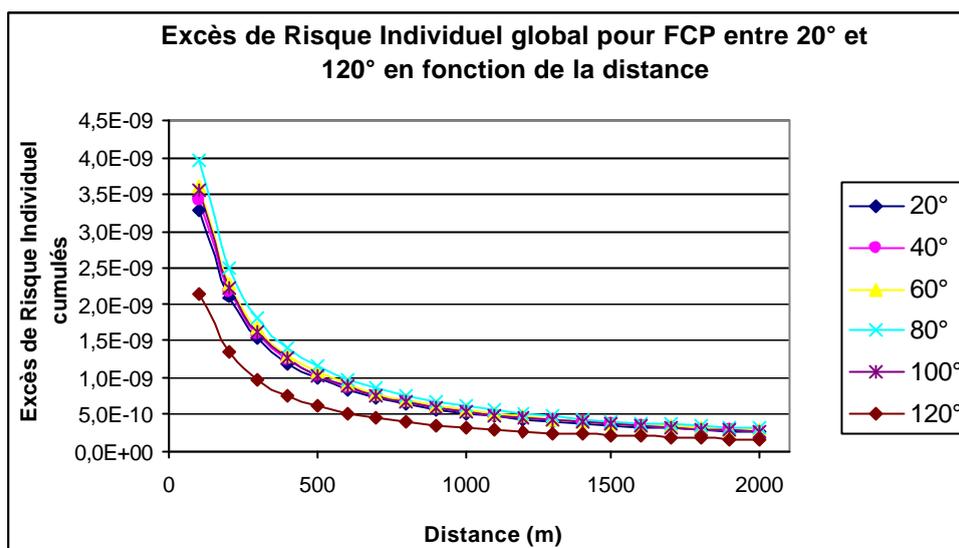
Risque cancérigène global – CEDLM



Risque cancérigène global – VALDI LE PALAIS



Risque cancérigène global – FCP



Risque cancérigène global – VALEO

