



**HAL**  
open science

## Evaluation des risques pour la santé: identification et modalités de prise en compte des éléments les plus influents dans l'estimation des expositions

Roseline Bonnard, Guy Auburtin

### ► To cite this version:

Roseline Bonnard, Guy Auburtin. Evaluation des risques pour la santé: identification et modalités de prise en compte des éléments les plus influents dans l'estimation des expositions. Séminaire sur l'Analyse / les Méthodologies de Traitement et la Réhabilitation de Sols Pollués, Apr 1999, Paris, France. ineris-00972160

**HAL Id: ineris-00972160**

**<https://ineris.hal.science/ineris-00972160>**

Submitted on 3 Apr 2014

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

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

# EVALUATION DES RISQUES POUR LA SANTE :

## IDENTIFICATION ET MODALITES DE PRISE EN COMPTE DES ELEMENTS LES PLUS INFLUENTS DANS L'ESTIMATION DES EXPOSITIONS

R.BONNARD - G. AUBURTIN  
INERIS

### Introduction

En France, le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement a mis en place une méthode nationale de gestion des sites et sols pollués. Cette méthode qui se veut pragmatique s'appuie sur les principes de proportionnalité et de spécificité. Le respect du principe de proportionnalité a pour but d'éviter que des études longues et coûteuses soient réalisées lorsque l'enjeu sanitaire, environnemental, politique et économique n'en vaut pas la peine. La notion de spécificité vise à prendre en compte les caractéristiques propres aux sites et l'usage actuel et/ou prévisible du site et de ses alentours, la gestion des sites pollués n'étant pas de restaurer le site dans son état originel mais de le rendre apte à l'usage défini.

La méthode de gestion des sites et sols pollués est basée sur un système de sélection en plusieurs étapes. Les deux principales étapes de sélection sont l'évaluation simplifiée des risques (ESR) et l'évaluation détaillée des risques (EDR). L'ESR a pour but de déterminer les sites qui a priori ne posent pas de problème, ceux qui doivent faire l'objet d'une surveillance et ceux qui devront faire l'objet d'une étude plus approfondie. L'EDR s'applique aux sites classés dans la dernière catégorie. Elle a pour but de quantifier les risques pour les différentes cibles et de déterminer une stratégie de réhabilitation, qui peut se traduire notamment par la définition d'objectifs de dépollution.

L'EDR prend en compte quatre cibles potentielles : la ressource en eau, la santé humaine, l'environnement (faune et flore sauvages) et le patrimoine bâti. Même si nous ne nous intéressons dans cet article qu'à la santé humaine, la discussion et les principes présentés ci-dessous pourraient s'appliquer à l'ensemble des cibles.

Une étude d'évaluation des risques pour la santé liés à un sol pollué peut se décomposer en quatre étapes interdépendantes :

- la caractérisation du site vise à définir la pollution du site étudié de la façon la plus adéquate pour évaluer ensuite l'exposition des cibles ou récepteurs humains. Cette étape doit permettre une évaluation des risques exhaustive, sans commettre d'impasse sur les substances polluantes pertinentes par rapport à l'historique du site ou sur les voies d'exposition pertinentes par rapport aux usages actuels et prévisibles du site et de ses alentours.

- l'évaluation de la toxicité consiste à identifier le potentiel dangereux des substances, c'est-à-dire les effets délétères liés aux substances présentes sur le site et à définir les relations doses-effets.
- l'évaluation des expositions consiste à déterminer les voies de passage du polluant de la source vers la cible, ainsi qu'à estimer la fréquence, la durée et l'importance de l'exposition.
- la caractérisation du risque correspond à la synthèse des informations issues de l'évaluation de l'exposition et de l'évaluation de la toxicité sous la forme d'une expression quantitative du risque. Les incertitudes sont évaluées et les résultats interprétés.

Compte tenu des principes de proportionnalité et de spécificité, la démarche doit être adaptée à chaque cas d'étude. Cet article présentera l'approche de l'INERIS et les règles de bonnes pratiques qui nous semblent importantes à suivre pour réaliser une évaluation des expositions de qualité. L'importance de l'analyse préalable du contexte environnemental et humain sera démontrée, les modes de quantification de l'exposition et de prise en compte de l'incertitude seront présentés.

## **L'étude environnementale et la définition de l'usage du site**

L'évaluation des risques pour la santé a pour but de protéger les populations vivant sur ou à proximité du site vis-à-vis de la pollution du site. Il est donc impératif d'identifier ces populations et leurs activités.

Une visite du site et des ses environs, la consultation de documents administratifs comme le plan d'occupation des sols, le recensement des puits et forages permettent de définir les différentes catégories de populations exposées et les usages particuliers pouvant conduire à une exposition. On portera une attention particulière à relever la présence de populations sensibles comme les malades ou les enfants en bas âge, ainsi que toutes activités sensibles (pisciculture, conchyliculture, pêche, chasse,...). Dans le cas d'une contamination ou d'un risque de contamination des eaux souterraines ou superficielles, on établira la liste de leurs usages.

Une étude d'environnement insuffisante peut conduire à une mauvaise définition des voies d'exposition et éliminer tout intérêt au reste de l'étude. L'exemple de deux études de risque d'un même site menées par deux consultants différents illustre ce point. L'un avait considéré une population agricole utilisant à partir d'un puits l'eau de la nappe pour des usages domestiques, l'autre n'avait pris en compte que l'exposition de résidents par inhalation de polluants émis à partir des zones saturées et insaturées du sol. Cette différence dans les voies d'exposition retenues aboutit à une divergence des conclusions : le premier a conclu à la nécessité de dépolluer la nappe, le second non. Dans cet exemple, l'absence ou l'insuffisance de l'étude d'environnement ne permet pas de savoir s'il est justifié ou non de considérer une population agricole, s'il existe des puits ou forages privés, si l'eau issue de tels captages est utilisée pour des besoins domestiques ou des besoins d'irrigation. En cas d'irrigation, la question d'une contamination des cultures devrait être soulevée, de même que, dans le cas d'un arrosage par aspersion, le risque lié à la dispersion des polluants à partir des gouttelettes devrait être abordé.

Lorsqu'il s'agit d'évaluer le risque lié à un usage futur du site et en l'absence d'une vision claire des aménagements pouvant être réalisés sur un site, des scénarios types avec un certain

nombre de voies prédéfinies sont souvent retenus. Les scénarios qui reviennent le plus souvent sont les scénarios résidentiels (en habitats individuels ou collectifs), les scénarios industriels ou récréationnels. Toutefois, l'utilisation de ces scénarios doit s'accompagner d'un questionnement concernant le bien-fondé des voies d'exposition retenues. Par exemple lorsqu'une couverture artificielle à la surface du site est prévue (dalle de béton ou revêtement de bitume), il est vraisemblablement inutile de prendre en compte les voies d'exposition liées à un contact direct avec le sol. En revanche, dans le cas d'un scénario récréationnel, la présence d'une nappe affleurante peut conduire à la réalisation d'étangs destinés à la pêche ou à la baignade. Même lorsqu'il s'agit d'évaluer le risque lié à un usage futur du site, il est donc important de repérer les usages et aménagements potentiels, qui compte tenu du contexte, peuvent conduire à une exposition particulière.

## **Quantification de l'exposition : complémentarité de la métrologie et de la modélisation**

La phase d'évaluation des expositions doit aboutir à la quantification de l'exposition sous la forme d'une dose journalière d'exposition exprimée en milligrammes de polluant par jour rapportée à la masse corporelle du sujet exposé.

Les modèles d'exposition utilisés en évaluation des risques pour la santé n'étant pas validés, les mesures sont généralement préférées à la modélisation malgré les difficultés de représentativité de l'échantillonnage et les difficultés d'extraction. Les mesures permettent en effet d'intégrer la complexité de la réalité alors que la modélisation est toujours une représentation simplifiée de cette réalité.

La métrologie peut intervenir à différents niveaux :

- la source de pollution peut être définie par des prélèvements et analyses d'échantillons du sol;
- la concentration de polluants dans les compartiments d'exposition peut être recherchée. Des mesures dans des végétaux à vocation alimentaire, dans l'eau de distribution, des prélèvements d'air à l'intérieur d'habitations peuvent par exemple être réalisés;
- le micro-environnement des individus peut être analysé (le port d'appareils de prélèvement par des sujets exposés permet de mesurer la teneur en polluants réellement inhalés par les personnes au cours d'une journée);
- la dose d'exposition des individus peut être reconstituée par la recherche de biomarqueurs dans le sang ou les urines par exemple.

Les deux dernières approches demandent le concours direct des populations exposées. Il s'agit d'une démarche lourde et coûteuse, qui ne peut être utilisée de manière générique. Elle doit être réservée à des cas de pollution avérée, lorsque l'existence d'un niveau de risque élevé ne peut être écartée par une autre approche.

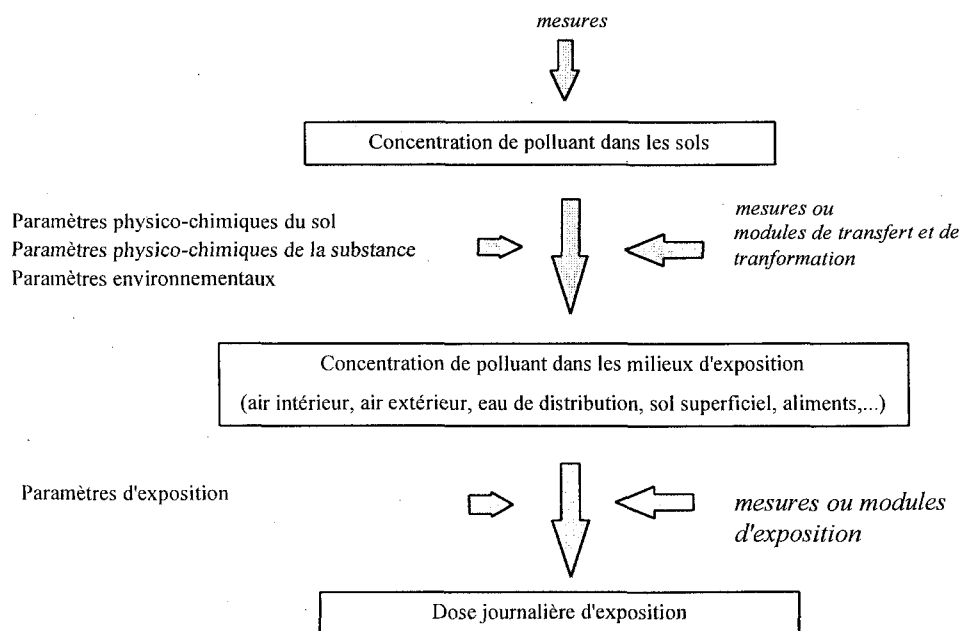
Par ailleurs, dans le cas d'une évaluation de risques liés à un aménagement futur de site, il n'est pas possible de réaliser ces types de mesures, il n'est généralement pas possible non plus de mesurer la contamination des compartiments d'exposition.

Les conditions particulières pouvant exister sur un site peuvent également réduire l'intérêt de ce type d'approche. Ainsi mesurer la teneur en HAP de végétaux sous le vent de cheminées d'usines ne permet pas d'évaluer l'impact de la pollution historique du sol sur la contamination des végétaux.

Enfin d'une manière générale, les moyens à mettre en place dépendent de l'acuité du problème et du rapport coût-bénéfice attendu de ces moyens dans la résolution du problème. L'utilisation de la métrologie et la stratégie d'échantillonnage sur un site sont donc guidées par le principe de proportionnalité. Ainsi des mesures dans des végétaux peuvent avoir un intérêt si elles permettent de réduire l'incertitude dans la quantification du risque, c'est-à-dire si l'exposition liée à la consommation de produits issus de ces végétaux peut correspondre à une part importante du risque total et si la modélisation de la teneur en polluant des végétaux n'est pas satisfaisante.

La métrologie et la modélisation sont donc des outils complémentaires dans la quantification du risque. La quantification du risque peut être représentée selon le schéma de principe de la Figure 1.

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



### **Quelques recommandations pour un plan d'échantillonnage des sols adapté à l'évaluation des expositions**

Le but de ce plan d'échantillonnage est d'obtenir une image aussi représentative que possible de la concentration à laquelle va être exposé l'individu. L'approche ne sera donc pas nécessairement la même que celle adoptée pour définir les sources de pollution ou l'extension de la pollution sur un site.

Par exemple, sur un site où est prévu un réaménagement en zone résidentielle, il va être important de distinguer la pollution des parcelles destinées à être transformées en parking de

celles qui seront cultivées comme jardin potager par les futurs résidents. Concrètement, cela amène dans un premier temps à classer les zones d'un site selon leur degré de pollution (très polluée, moyennement polluée, peu ou pas polluée) et pour chacune de ces zones à distinguer les différentes parcelles en fonction de leur usage. Un échantillonnage adapté à l'usage et donc aux voies d'exposition à considérer peut alors être réalisé.

Selon ces voies, la profondeur de sol échantillonné devra être adaptée. Si l'on est amené à considérer les voies d'exposition liées à un contact direct avec le sol comme l'ingestion de sol, le contact cutané ou l'émission de poussières remises en suspension à partir du sol, on échantillonnera les premiers centimètres du sol (de 0 à 5 cm de profondeur maximum). Si l'on s'intéresse à la contamination des plantes à vocation alimentaire, les échantillons de sol seront prélevés sur la hauteur de la couche cultivable. Enfin, si des mouvements de sol sont prévus à l'occasion de travaux d'aménagements (excavation, remise en superficie de terre enfouies), il faut en tenir compte dans le plan d'échantillonnage et échantillonner les horizons de sol qui deviendront pertinents pour l'exposition.

## **L'analyse des phénomènes physiques, chimiques et biologiques et leur modélisation**

Un modèle est une représentation mathématique des phénomènes physiques, chimiques et biologiques qui concourent à la réalisation d'un processus donné (processus de transfert d'un polluant entre deux milieux, processus d'absorption d'un polluant par l'organisme,...).

La réalité étant complexe, la connaissance scientifique et la capacité à intégrer l'ensemble des phénomènes sous une forme mathématique étant limitées, les modèles reposent toujours sur des hypothèses simplificatrices. Pour que le modèle conserve son intérêt, il faut néanmoins que les phénomènes déterminants soient bien pris en compte.

Le travail de transcription mathématique doit donc être précédé par une analyse visant à recenser de manière exhaustive les voies de passage des polluants de la source vers la cible et les mécanismes physiques, chimiques et biologiques intervenants.

Le devenir des polluants est gouverné par leurs propriétés physico-chimiques et les conditions environnementales :

A partir d'un compartiment, le polluant peut :

- être transporté vers un autre compartiment (évaporation du polluant à partir des eaux de surface contaminées, lessivage des feuillages sur lesquelles se sont déposées des particules,...),
- être transformé par voie physique (photolyse), chimique (hydrolyse, oxydation,...) ou biologique (biodégradation aérobie ou anaérobie),
- ou s'accumuler (bioconcentration et biomagnification).

Par exemple, dans le cas de la contamination de végétaux à partir de la pollution du sol, les phénomènes suivants peuvent être identifiés : les échanges par diffusion entre le sol et les racines, le transfert dans les racines par le flux de transpiration, la translocation vers les parties aériennes, les phénomènes de partition entre le flux de transpiration et les parties aériennes, le transfert par le flux d'assimilation, les échanges par diffusion entre la feuille et l'air où s'est dispersé le polluant émis à partir du sol que ce soit par l'intermédiaire des stomates ou de la cuticule, la métabolisation du polluant par la plante, l'effet de dilution lié à la croissance de la plante. En fonction de la plante, des propriétés de la substance, certains de ces phénomènes devront être pris en compte, d'autres pourront être négligés.

De même, dans le cas de l'émission de polluant du sol vers les bâtiments, deux phénomènes peuvent conduire à l'entrée de polluant dans le bâtiment : la diffusion et la convection (par dépression à l'intérieur du bâtiment par rapport à l'extérieur). En fonction notamment de la perméabilité du sol, la convection sera un phénomène important à prendre en compte ou au contraire négligeable.

S'appuyant sur le principe de précaution, la règle retenue en France par les groupes de travail du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement est que tout phénomène conduisant à un accroissement significatif de l'exposition soit pris en compte. Compte tenu de la difficulté à caler et à valider les modèles d'exposition par des mesures sur le terrain, le principe de précaution va aussi conduire le modélisateur à représenter les phénomènes d'une manière plutôt majorante, même si cette tendance à la précaution doit être contrebalancée par un souci de réalisme.

Le travail de modélisation doit aussi être guidé par le principe de proportionnalité. Selon l'objectif visé, les résultats apportés par un modèle simple peuvent être suffisants. Par ailleurs, plus le modèle est sophistiqué, plus il nécessite de temps de mise en place et plus les données nécessaires sont nombreuses. Si l'on ne peut remédier à une forte incertitude sur un ou plusieurs paramètres pouvant faire largement fluctuer le résultat, il paraît superflu d'utiliser un code de calcul pointu.

Pour chaque étude, il est donc important de renouveler le travail d'analyse et de construire un modèle en conséquence. L'emploi d'un modèle unique, quel que soit le cas d'étude, paraît inadéquat, que le modèle soit utilisé comme une « boîte noire » ou non. L'utilisation d'un outil de modélisation sous une forme modulaire semble plus adaptée. Ainsi chaque module peut être adapté en fonction du problème posé. Si une voie d'exposition représente une part importante du risque, le module correspondant pourra par exemple être remplacé par un outil plus sophistiqué ou par des résultats d'analyse utilisés comme des données d'entrée dans l'outil de modélisation.

## **Enjeu et manière de prendre en compte les incertitudes dans l'évaluation des expositions**

Les expressions numériques obtenues exprimant le risque doivent être interprétées et qualifiées. Pour cela la part entre ce qui est connu et ce qui reste incertain doit être présentée, ainsi que l'impact des incertitudes sur le résultat.

Concernant l'évaluation des expositions, il existe trois types d'incertitudes pouvant entacher le résultat. Celles qui sont liées à :

- la définition des populations cibles et des usages du site et de ses alentours;
- la définition des paramètres d'exposition (y compris la définition des concentrations d'exposition);
- la représentation mathématique des phénomènes physiques, chimiques et biologiques.

#### ***La définition des populations cibles et des usages***

On a vu précédemment que la définition des populations cibles et des usages associés a des conséquences importantes sur l'évaluation du risque. La prise en compte ou non des voies d'exposition doit être justifiée car il s'agit d'un élément important pour juger de la possibilité de réalisation du scénario étudié.

#### ***La représentation mathématique des phénomènes***

Pour évaluer les incertitudes liées à la modélisation, les hypothèses et simplifications sur lesquelles reposent le modèle doivent être explicitées et leur conséquence en terme de sur- ou sous-estimation de l'exposition décrites.

Pour illustrer l'impact des hypothèses sur les incertitudes, différentes simulations peuvent être réalisées en faisant varier les hypothèses.

Comme indiqué précédemment, des mesures peuvent être faites dans un deuxième temps pour mieux appréhender les voies d'exposition dominantes et les phénomènes qui apparaissent prépondérants.

#### ***La définition des paramètres***

Les paramètres (que ce soient les paramètres environnementaux influençant les phénomènes physico-chimiques ou les paramètres liés à l'individu) entrant en jeu dans la modélisation de l'exposition sont entachés d'une variabilité et d'une incertitude (au sens statistique du terme). La variabilité est liée à la diversité des cas, des situations impliquant des valeurs différentes pour le paramètre, l'incertitude est due aux défauts de connaissance concernant ce paramètre.

Trois types de variabilité peuvent être distinguées :

- la variabilité spatiale,
- la variabilité dans le temps,
- la variabilité interindividuelle.

Les sources d'incertitude sur les paramètres sont liées à :

- la mesure,
- l'échantillonnage,
- la variabilité des paramètres. La variabilité des paramètres environnementaux ou des paramètres liés à l'individu engendre de l'incertitude car elle peut nécessiter l'évaluation de la moyenne. L'incertitude associée à l'évaluation de la moyenne dépendra de la variabilité du paramètre et de la taille de l'échantillon,



- l'estimation des paramètres par des valeurs génériques ou par des valeurs dérivées d'une relation quantitative telles que les QSAR<sup>1</sup>.

L'analyse des incertitudes liées aux paramètres commence par l'identification des paramètres clefs influençant le résultat. Pour cela, une analyse de la sensibilité peut être réalisée suivie d'une analyse qualitative, semi-quantitative ou quantitative de l'impact sur la dose d'exposition des incertitudes entourant les paramètres les plus influents.

L'analyse qualitative consistera à commenter l'influence du choix de la valeur retenue par rapport aux valeurs possibles pour le paramètre.

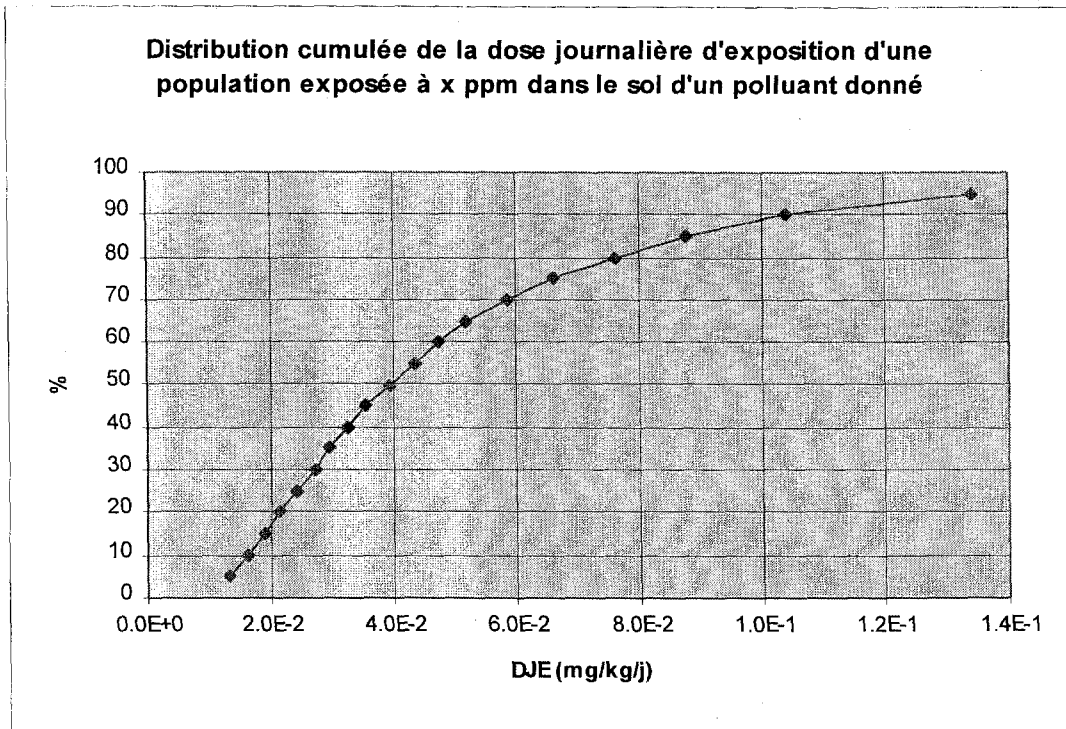
L'analyse semi-quantitative va consister à attribuer un intervalle de variation aux paramètres les plus sensibles et à réaliser divers calculs de la variable de sortie en attribuant des valeurs différentes à ces paramètres. Une évaluation majorante du risque peut être effectuée en attribuant à chacun des paramètres la valeur majorant le résultat puis plusieurs autres évaluations peuvent être faites en combinant les valeurs majorantes pour certains paramètres et des valeurs moyennes ou médianes pour d'autres. Le but est de situer l'estimation réalisée par rapport à une échelle de cas possibles, car un individu n'est pas nécessairement exposé d'une manière majorante pour chaque voie d'exposition.

L'analyse quantitative peut être réalisée avec une méthode d'analyse probabiliste. Il s'agit alors d'attribuer une distribution statistique ou une fonction de densité de probabilité à chacun des paramètres puis d'effectuer un grand nombre d'itérations de calcul de la variable de sortie en tirant au sort, lors de chaque itération, une valeur pour chaque paramètre en fonction de sa distribution statistique. On obtient alors un ensemble de valeurs pour la variable de sortie formant une distribution statistique (cf. Figure 2) qui reflète l'impact combiné des variations possibles des variables d'entrée. Cette technique dite « calcul Monte-Carlo » est riche d'informations : l'évaluateur peut spécifier la valeur de la variable de sortie correspondant à chaque percentile. La difficulté réside alors dans la définition des distributions statistiques des paramètres d'entrée et dans la définition des facteurs de covariance pouvant exister entre eux. En effet, les données ne sont pas nécessairement disponibles pour construire, par les méthodes statistiques, les distributions des paramètres les plus sensibles du modèle.

---

<sup>1</sup> QSAR : Quantitative Structure Activity Relationship

**Figure 2 : Exemple de résultat d'une analyse quantitative obtenu par calcul Monte-Carlo**



## Conclusion

L'évaluation des risques est avant tout une démarche structurée et transparente, qui dans un contexte incertain, soumis à de multiples sources de variabilité, doit permettre une certaine cohérence dans les décisions prises vis-à-vis de différents sites.

A chaque étape de l'évaluation, les hypothèses retenues doivent être présentées et dans la mesure du possible justifiées. Pour l'évaluation des expositions de chaque évaluation détaillée des risques (EDR), on doit s'attacher à utiliser les outils les plus adaptés. Le principe de spécificité impose également une bonne analyse du contexte environnemental et humain, avant tout essai de quantification de l'exposition. Enfin, l'estimation des incertitudes est un complément indispensable à la quantification du risque : elle permet de juger la significativité du résultat obtenu et met en évidence les points de l'évaluation où un effort supplémentaire dans l'acquisition des données permettrait de réduire de manière substantielle l'incertitude sur le résultat. Il s'agit d'une étape essentielle qui permet aux décideurs de comprendre ce que représente le niveau de risque calculé.

Dans une EDR de qualité, évaluer les expositions ne peut donc pas se réduire à entrer des valeurs de paramètres dans un modèle standard.

