

INDUSTRIELS, INGÉNIEURS, TECHNICIENS, ÉTUDIANTS

JEAN-CLAUDE AMIARD



Les risques chimiques environnementaux

Méthodes d'évaluation et impacts sur les organismes

2^e édition



Les risques chimiques environnementaux

Méthodes d'évaluation
et impacts sur les organismes

2^e édition

revue et augmentée

JEAN-CLAUDE **AMIARD**

Directeur de recherche émérite au CNRS, ancien professeur au Québec



Les risques chimiques environnementaux

Méthodes d'évaluation
et impacts sur les organismes

2^e édition

revue et augmentée

L*avoisier*
TEC & DOC

editions.lavoisier.fr

Chez le même éditeur

Les biomarqueurs dans l'évaluation de l'état écologique des milieux aquatiques, 2^e édition
J.-C. Amiard, 2017

PCB, environnement et santé

J.-C. Amiard, T. Meunier, M. Babut, 2016

Écologie et aménagement des eaux marines – Le potentiel des océans et des mers
G. Barnabé, 2016

Droit de l'environnement – Comprendre et appliquer la réglementation

P. Malingrey, 2016

Chimie et pollution des eaux souterraines

O. Atteia, 2015

Impact environnemental des matières plastiques – Solutions et perspectives

T. Hamaide, R. Deterre, J.-F. Feller, 2014

Le risque radioactif – Devenir des radionucléides dans l'environnement et impacts sur la santé

J.-C. Amiard, 2013

Écotoxicochimie appliquée aux hydrocarbures

F. Picot, F. Montandon, 2013

Introduction à l'écotoxicologie – Les substances chimiques de l'écosystème à l'homme

F. Ramade, 2011

Modélisation du devenir des composés organiques dans les aquifères

O. Atteia, 2011

Le tritium – Actualité d'aujourd'hui et de demain

S. Gazal, J.-C. Amiard, 2010

Traité du risque chimique

N. Margossian, 2010

Introduction à l'écotoxicologie

F. Ramade, 2007

Métrologie en chimie de l'environnement

Ph. Quevauviller, 2^e édition, 2006

Direction éditoriale : Fabienne Roulleaux
Édition : Mélanie Kucharczyk, Gilda Masset
Couverture : Isabelle Godenèche
Fabrication : Estelle Perez
Composition : Desk (53)

Photos de couverture : Jean-Claude Amiard

De haut en bas puis de gauche à droite :

Usine de retraitement des combustibles irradiés de La Hague (Manche)
Accident du pétrolier *Erika* au Pouliguen (Loire-Atlantique décembre 1999)

Pêche industrielle à Qingdao (Chine)

Usine de raffinage de Donges (Loire-Atlantique)

Pour plus d'informations sur nos publications :



newsletters.lavoisier.fr/9782743022341

© 2017, Lavoisier, Paris
ISBN : 978-2-7430-2234-1

REMERCIEMENTS

Les personnes qui m'ont volontairement aidé en me fournissant des références et des pistes sont très nombreuses. D'autres m'ont aidé involontairement suite à une communication orale ou une publication.

Je voudrais en premier lieu remercier mon épouse, Claude Amiard-Triquet, qui n'a pas ménagé son temps pour venir à mon secours. Il me faut ensuite citer une grande partie des collaborateurs du groupe de recherche qui ont été patients avec moi et m'ont signalé diverses sources comme Brigitte Berthet, Laëtitia Charbonnier, Olivia Fossi, Catherine Mouneyrac et Laurence Poirier.

Je me dois aussi de remercier Alain Geffard de l'université de Reims, Florence Caurant et Pierre-Guy Sauriau de l'université de La Rochelle, Alain Pineau de l'université de Nantes, Pierre-Marie Badot de l'université de Besançon, Laurent Lagadic de l'INRA, Sandrine Bonnard et Eric Thybaud de l'Ineris, Hervé Pouliquen, Martine Kammerer et Jean-Dominique Puyt de l'Oniris (ENVN), Didier Claisse, Jean-Louis Gonzalez, Alice James et Michel Marchand de l'Ifremer, Marc Babut de l'IRSTEA, Thierry Meunier de Séché Environnement (TREDI), Alexandre Péry d'AgroParisTech, Nathalie Arnich, Thomas Cartier et Thierry Guérin de l'Anses, Caroline Ringard et Annie Sugier de l'IRSN, Bernard Caussade de l'ANCCLI, Mariette Gerber de l'Institut du Cancer (Inserm), Adeline Charriau de l'université de Lille 1, et Xavier Michel de RESECUM qui peu ou prou m'ont fourni des documents.

AVANT-PROPOS DE LA SECONDE ÉDITION

De nouveaux outils et des avancées prometteuses ?

Depuis la première édition de cet ouvrage en 2011, beaucoup d'avancées scientifiques ont été réalisées dans plusieurs domaines. C'est notamment le cas en biologie moléculaire avec le développement rapide des outils OMICs. C'est aussi le cas dans le domaine de la chimie analytique de l'environnement, avec des limites de détection des polluants environnementaux considérablement abaissées dans les diverses matrices environnementales (air, eaux, aliments...). De même, les outils de la toxicologie et de l'écotoxicologie ont évolué (Amiard-Triquet *et al.*, 2015) avec une pertinence toujours plus importante des tests *in silico* et *in vitro*. De plus, de nouvelles connaissances des modes d'action toxiques ont été acquises, permettant d'espérer une meilleure évaluation et même des préventions des risques.

De nouveaux risques émergents

Les polluants potentiellement émergents doivent être persistants dans l'environnement, se bioaccumuler fortement et être très toxiques. Muir et Howard (2006) et Howard et Muir (2010), combinant les données canadiennes et américaines, ont extrait plusieurs centaines de polluants ayant vocation à être potentiellement émergents. On relève notamment la présence, dans les eaux potables, de nombreux médicaments (humains et vétérinaires), mais aussi des pesticides, et en milieu marin des microplastiques, etc.

Des confirmations de risques chimiques

Par ailleurs, des risques existants ont vu leurs potentialités se confirmer. Citons en premier lieu les perturbateurs endocriniens qui ont des actions néfastes à l'égard des êtres vivants à de très faibles doses. Par ailleurs, certains perturbateurs endocriniens n'ont pas une relation dose-réponse linéaire (Vandenberg *et al.*, 2012). Cela signifie que le dogme prononcé au XVI^e siècle par Paracelse est mis en défaut et bouleverse les raisonnements des toxicologues. Depuis 2011, des synthèses importantes sur ces molécules ont été réalisées (Bergman *et al.*, 2013) qui fournissent des preuves de leurs effets hormonaux. Deux organismes (USEPA et OCDE) proposent de nouvelles démarches avec des outils spécifiques pour les perturbateurs endocriniens (Amiard et Amiard-Triquet, 2015). Par ailleurs, le Tribunal de l'Union européenne a condamné en décembre 2015 la Commission européenne pour son inaction au sujet des perturbateurs endocriniens. Les pesticides restent parmi les risques chimiques les plus préoccupants. Le risque dû aux nanoparticules émises dans l'environnement s'avère de plus en plus évident pour la flore et la faune, mais aussi pour l'homme. Les retardateurs de flamme bromés (PBDE) sont partiellement interdits dans certains pays, mais leur utilisation est encore forte et les déchets induits sont peu ou mal gérés. L'industrie freine leur interdiction totale (BSEF, *Bromine Science and Environment Forum*). De son côté, le CIRC (OMS) a classé ces dernières années un nombre toujours plus important de substances dans les catégories cancérogènes pour l'homme.

Un environnement toujours plus pollué

Les progrès de la chimie analytique permettent d'abaisser les limites de détection d'un grand nombre de substances. Il en résulte une détection toujours plus élevée de nouvelles substances dans les diverses matrices environnementales. Ainsi dans l'eau potable l'Anses signale-t-elle la présence de TNG (trinitroglycérine) ou encore celles de benzodiazépines. Dans les milieux aquatiques d'eau douce (eaux superficielles, eaux souterraines et sédiments), Botta et Dulio (2014) ont découvert la présence de nombreuses nouvelles molécules. De même, la part des COV d'origine naturelle dans l'atmosphère est finalement nettement plus considérable que prévue, or ces molécules ont une certaine toxicité.

Une réorganisation de la sécurité

En Europe, REACH atteint sa vitesse de croisière. Ainsi, la plupart des molécules existantes ont été intégrées dans les bases de l'ECHA avec une FDS (Fiche de données de sécurité à jour et consensuelles). Par ailleurs, la liste des substances extrêmement préoccupantes candidates à une autorisation s'est nettement enrichie. (163 en juin 2015, <http://echa.europa.eu/fr/candidate-list-table>). De plus, l'évaluation des risques liés aux nanomatériaux devrait à l'avenir être prise en compte dans REACH. Depuis 2011, une réorganisation des autorisations de mise sur le marché (AMM) a été faite en France. Ainsi, l'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé (ANSM) a été créée par la loi du 29 décembre 2011 remplaçant l'Afssaps. À partir de juillet 2015, la délivrance des AMM des produits phytopharmaceutiques, des adjuvants, des matières fertilisantes et supports de culture a été transférée à l'Anses, devenant à la fois gestionnaire et évaluateur. Les AMM pour les médicaments vétérinaires sont délivrées en France par l'Agence nationale du médicament vétérinaire (ANMV) au sein de l'Anses.

Des divergences dans l'évaluation entre agences et recherche académique

Nous constatons de plus en plus des divergences dans l'évaluation, à la fois entre agences nationales et internationales, et entre agences et recherche académique. Ces divergences sont principalement dues aux choix plus ou moins sélectifs des études retenues pour l'évaluation du risque, les agences internationales éliminant la plupart des études universitaires.

Des faiblesses et des dérives de l'expertise du risque

Au niveau de REACH, l'une des faiblesses est le fait que l'industriel est seul responsable du dossier. Or, les fraudes industrielles existent. Les exemples abondent, comme le cas de *Volkswagen* et le contrôle des émissions de particules des véhicules consommant du diesel, le cas de Servier et du Mediator... Les conflits d'intérêt nuisent à la qualité de l'expertise (Maxim et Arnold, 2012). Ainsi, il est bien connu qu'il existe une corrélation significative entre la source de financement et les résultats de l'expertise. Les modes d'action du conflit d'intérêt peuvent être indirects et jouer sur le financement sélectif des industriels à l'égard des experts retenus, sur le concept de l'étude, sur l'interprétation des résultats et fréquemment sur l'absence de

publication des résultats. De plus, les éditeurs scientifiques de revue ont des conflits d'intérêt. L'existence de conflits d'intérêt a été particulièrement bien démontrée dans plusieurs secteurs industriels comme les industries biomédicale, agro-alimentaire, celle du tabac et celle des télécommunications (Maxim et Arnold, 2012). Pour éviter que les conflits d'intérêt introduisent des biais dans la recherche, plusieurs solutions ont été évoquées, comme rendre plus transparents la constitution et le fonctionnement des comités d'experts, rééquilibrer les financements publics et privés de la recherche, repenser les critères d'évaluation de la qualité des recherches et enfin revoir les politiques de publication et de financement des revues scientifiques.

BIBLIOGRAPHIE

1. Amiard JC, Amiard-Triquet C (2015). Ecotoxicological risk for endocrine disrupters. *In*: Amiard-Triquet C, Amiard JC, Mouneyrac C (eds), *Aquatic ecotoxicology. Advancing tools for dealing with emerging risks*. Elsevier, London, 355-382.
2. Amiard-Triquet C, Amiard JC, Mouneyrac C, eds (2015). *Aquatic ecotoxicology. Advancing tools for dealing with emerging risks*. Elsevier, London, 504 pages.
3. Bergman Å, Heindel JJ, Jobling S *et al.* (2013). State of the science of endocrine disrupting chemicals – 2012. UNEP and WHO, 260 pages.
4. Botta F, Dulio V (2014). Étude sur les contaminants émergents dans les eaux françaises. Résultats de l'étude prospective 2012 sur les contaminants émergents dans les eaux de surface continentales de la métropole et des DOM. Rapport final. ONEMA. www.onema.fr/IMG/pdf/19_DRC-13-Rap-etude-prospectiveESC.pdf
5. Howard PH, Muir DCG (2010). Identifying new persistent and bioaccumulative organics among chemicals in commerce. *Environ Sci Technol*, **44** : 2277-2285.
6. Maxim L, Arnold G (2012). Comment les conflits d'intérêts peuvent influencer la recherche et l'expertise. *Hermès*, **64** : 48-59.
7. Muir DCG, Howard PH (2006). Are there other persistent organic pollutants? A challenge for environmental chemists. *Environ Sci Technol*, **40** : 7157-7166.
8. Vandenberg LN, Colborn T, Hayes TB *et al.* (2012). Hormones and endocrine-disrupting chemicals: Low dose effects and nonmonotonic dose responses. *Endocr Rev*, **33** : 378-455.

ABRÉVIATIONS ET SIGLES

3-MCPD : 3-monochloropropane-1,2-diol

A : anthracène

AAH : acide acétique halogéné

AASQA : Associations agréées pour la surveillance de la qualité de l'air
(Fédération ATMO)

AD : acide domoïque

Ademe : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

ADI : *acceptable daily intake*

AEE : Agence européenne de l'environnement

AEPC : Agence européenne des produits chimiques (ECHA)

AESA : Autorité européenne de sécurité des aliments

AESN : Agence de l'eau Seine-Normandie

AESST : Agence européenne pour la santé et la sécurité au travail

AF : *assessment factor*, facteur d'estimation

AFB1 : congénère d'aflatoxine

AFB2 : congénère d'aflatoxine

AFG1 : congénère d'aflatoxine

AFG2 : congénère d'aflatoxine

AFM1 : congénère d'aflatoxine

Afnor : Agence française de normalisation

Afssa : Agence française de sécurité sanitaire des aliments

Afssaps : Agence française de sécurité sanitaire des produits de santé

Afssset : Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail

AhR : *aryl hydrocarbon receptor*, affinité pour le récepteur Aryl ou récepteur
aux dioxines

Aib : acide α -aminoisobutyrique (α -méthyl alanine)

AIC : *akaike information criterion*

AIEA : Agence internationale de l'énergie atomique

AJMT : quantité maximale de résidus ingérée quotidiennement

ALAD : acide aminolévulinique déshydratase, delta-aminolevulinic acid
deshydratase

ALARA : *as low as reasonably achievable*

AMPA : acide aminométhylphosphonique

AN : Authie Nord

ANC : apport nutritionnel conseillé

ANH : acétonitrile halogéné

ANSM : Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé

Anses : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation,
de l'environnement et du travail

AOS : aérosol organique secondaire

ARNT : *AhR nuclear translocator*

As : arsenic

ASP : *amnesic shellfish poisoning*

AT/MP : branche accidents du travail et maladies professionnelles

ATSDR : *Agency for Toxic Substances and Disease Registry, toxicological profiles*

- ATP : adénosine triphosphate
ASF : convention internationale sur les systèmes antisalissures
AVS : acide volatile sulfide
AZA : azaspiracide
BaA : benzo[a]anthracène
BaP : benzo(a)pyrène
BASIAS : inventaire d'anciens sites industriels et activités de services
(historique régional)
BASOL : base de données sur les sites et sols pollués ou potentiellement pollués
appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif
BB : *body burden*, charge corporelle
BBP : benzylbutyle
BCF : *bioconcentration factor*, facteur de bioconcentration
BCN : Bureau central national
BDE : bromodiphényléther
BED : *biologically effective dose*
BERPC : Bureau d'évaluation des risques des produits et agents chimiques
BFR : *brominated flame retardant*, retardateur de flamme bromé
BLM : *biological model linking*
BMD : *benchmark dose*
BMDL : *lower benchmark dose*
BPA : bisphénol A
BPH : benzo(a)pyrène hydroxylase
BPer : benzo[ghi]pérylène
BPL : bonnes pratiques de laboratoire
BRGM : Bureau de recherche de géologie minière
BSI : *British Standard Institution*
BSEF : *Bromine Science and Environment Forum*
Ce : concentration effective
Cco : concentration en carbone organique
CAA : concentration admissible dans l'air
CAC : Commission du Codex alimentarius
CBR : *critical body residue*
CCA : *chromated copper arseniate*
CCME : *Canadian Council of Ministers of the Environment*
Cd : cadmium
CDC : *Centers for Disease Control and Prevention*
CE50 : concentration efficace 50 %
CEFIC : *European Chemical Industry Council*
Cemagref : Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture
et de l'environnement
CFC : chlorofluorocarbure
CH₄ : méthane
Chrys : chrysène
CHSCT : Comité d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail
CI50 : concentration inhibitrice 50 % (*median inhibition concentration*)
CIPEL : Commission internationale pour la protection des eaux du Léman
contre la pollution

- CIPR : Commission internationale pour la protection radiologique
 CIRC : Centre international de recherche sur le cancer
 CL : concentration létale
 CLI : chair et liquide intervalvaire de coquillages
 CMA : concentration maximale admissible
 CMEO : concentration minimale avec effet observé
 CML : carboxyméthyllysine
 CMR : cancérigène, mutagène ou reprotoxique
 CNI : composé néoformé indésirable
 CNPP : Centre national de prévention et de protection
 CO : monoxyde de carbone
 CO₂ : dioxyde de carbone
 COD : carbone organique dissous
 Cofrac : Comité français d'accréditation
 CoRAP : *Community Rolling Action Plan*
 COV : composé organique volatil
 COVNM : composé organique volatil non méthanique
 CPP : Comité de protection des personnes
 CPSE : concentration prévisible sans effet
 CQEL : cellule qualité des eaux littorales
 Cr : chrome
 CR : *excess lifetime cancer risk*
 CREDOC : Centre de recherche pour l'étude et l'observation des conditions de vie
 Cs : concentration à saturation
 CSEO : concentration sans effet observable
 CSP : Comité des spécialités pharmaceutiques
 CSTEE : *Committee on Toxicity, Ecotoxicity and the Environment*
 Cu : cuivre
 CVMP : Comité des médicaments à usage vétérinaire
 CYS : cystéine
 DAMM : Direction des autorisations de mise sur le marché
 DBCP : 1,2-dibromo-3-chloropropane
 DBP : dibutyle phtalate
 DBT : dibutylétain
 DCE : directive-cadre sur l'eau
 DCHP : di-cyclohexyle phtalate
 DDASS : Direction départementale des affaires sanitaires et sociales
 DDCCRF : Direction départementale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes
 DDCS : Directions départementales de la cohésion sociale
 DDCSPP : Directions départementales de la cohésion sociale et de la protection des populations
 DDD : dichlorodiphényldichloroéthane
 DDE : dichlorodiphényldichloroéthylène
 DDSV : Direction départementale des services vétérinaires
 DDT : dichlorodiphényltrichloroéthane
 DEEE : déchet d'équipements électriques et électroniques

- DEHP : di-2-éthylhexyle phtalate
 DEP : diéthyle phtalate
 DEPR : Direction d'évaluation des produits réglementés
 DET : *diffusive equilibration in thin films*
 DES : diéthylstilbestrol
 DGAI : Direction générale de l'alimentation
 DGCCRF : Direction générale de la concurrence, de la consommation
 et de la répression des fraudes
 DGS : Direction générale de la santé
 DGT : *diffusive gradient in thin films*
 DHA : dose hebdomadaire admissible
 DHA : acide docosahexaénoïque
 DHT : dose hebdomadaire tolérable
 DHTP : dose hebdomadaire tolérable provisoire
 DIDP : di-isodécyle phtalate
 DIREN : Direction régionale de l'environnement
 DJA : dose journalière admissible
 DJE : dose journalière d'exposition
 DL : dose létale
 DL : *dioxin-like*
 DLC : *dioxin-like compound*
 DMAP : N, N-diméthylaminopyridine
 DMP : diméthyle phtalate
 DMTCOS : Direction des dispositifs médicaux thérapeutiques
 et des cosmétiques
 DMTP : dose mensuelle tolérable provisoire
 DON : déoxynivalénol
 DOP : di-n-octyle phtalate
 DOT : dioctylétain
 DREAL : Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement
 et du logement
 DSDS : Direction de la santé et du développement social
 DSL : *domestic substance list*
 DSP : *diarrheic shellfish poisoning*
 DT50 : *disappearance time 50*
 DTI : dose totale indicative
 DTX : dinophysistoxine
 DVS : dose virtuellement sûre
 EC50 : *median effect concentration* (concentration effective 50 %)
 ECDIN : *Environmental Chemical Data and Information Network*
 ECEG : *European Chemical Employers Group*
 ECETOC : *European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals*
 ECHA : *European Chemical Agency*, Agence européenne des produits chimiques
 EDI : échange de données informatiques
 EDTA : acide éthylène diamine tétra acétique
 EFSA : *European Food Safety Authority*, Autorité européenne de sécurité
 des aliments
 EINECS : *European inventory of existing commercial chemical substances*

- ELINCS : *European list of notified chemical substances*
- EM : État membre
- EMA : *European Medicines Agency*, Agence européenne du médicament
- EPA : *Environmental Protection Agency*, Agence de protection environnementale
- EPA : acide eicosapentanoïque
- EREN : *emerging risk exchange network*
- ERI : excès de risque
- ERR : excès de risque relatif
- ERU : excès de risque unitaire
- ESB : *environmental specimen bank*
- ESD : *engineering for sustainable development*
- EUROJUST : unité de coopération judiciaire de l'Union européenne
- EU-OSHA : *European Agency for Safety and Health at Work*
- EUROPOL : *European Police Office*
- FAO : *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
- FC : facteur de concentration
- FC : fluorocarbure
- FDS : fiche de données de sécurité
- FE : facteur d'extrapolation
- FIAM : *free ion activity model*
- Fl : fluoanthène
- Fs : facteur de sécurité
- FT : facteur de transfert
- GABA : acide gamma-amino butyrique
- GEMS/Food : *global environment monitoring system, food contamination monitoring and assessment programme*
- GRNC : Groupe radioécologie Nord-Cotentin
- H : constante de Henry
- HACCP : *hazard analysis critical control point*
- HAH : hydrocarbure aryl halogéné
- HAP : hydrocarbure aromatique polycyclique
- HC : hydrocarbure
- HC5 : *hazardous concentration 5 %*
- HCB : hexachlorobenzène
- HCBD : hexachlorobutadiène (ou hexabromocyclododécane)
- HCFC : hydrochlorofluorocarbure
- HCH : hexachlorocyclohexane
- HCHO : formaldéhyde
- HF : acide fluorhydrique
- HFC : hydrofluorocarbure
- Hg : mercure
- HMF : hydroxyméthylfurfural
- HRP : hiérarchisation des risques potentiels
- HSDB : *hazardous substances databank*
- HSP : *heat shock protein*
- HT-2 : toxine HT2 (trichothécène)
- IAFM : toxine amnésiante

IARC : *International Agency for Research on Cancer*
 IBGN : indice biologique global normalisé
 IBR : indice biologique intégré
 IC : indice de condition
 IDFM : toxine diarrhéique
 IDHL : *immediatly dangerous to life or health*
 IdP : indénol[1,2,3-cd]pyrène
 IEP : impact environnemental potentiel
 Ifremer : Institut français de recherche et d'exploitation de la mer
 IGA : impact des grands aménagements
 INB : installation nucléaire de base
 INCA : inventaire national de consommation alimentaire
 INCOS : intergouvernemental d'information sur les produits cosmétiques
 Ineris : Institut national de l'environnement industriel et des risques
 INFM : brévétotoxine
 Inra : Institut national de la recherche agronomique
 INRS : Institut national de recherche et de sécurité
 IPFM : toxine paralysante
 IRIS : *integrated risk information system*
 IRSN : Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire
 Iso : *International Standard Organization*, Organisation internationale de normalisation
 ITEQ ou I-TEQ : équivalence toxique internationale
 IUR : *inhalation unit risk*
 IUR : *inventory update rule*
 Iva : isovaline (α -éthyl alanine)
 JECFA : *Joint FAO/WHO committee on food additives*, normes alimentaires
 FAO/OMS, *Codex alimentarius*
 Kco : coefficient de carbone organique
 Kd : coefficient de distribution
 Kow : coefficient de partage eau-octanol
 LC50 : *median lethal concentration* (concentration létale 50 %)
 LCA : *life for cycle assessment*
 LDPE : *low-density polyethylene*
 LMR : limite maximale de résidus
 LOAEL : *lowest observed adverse effect level*
 LOEC : *lowest observed effect concentration*
 LOEL : *lowest observed effect level*
 MA : moyenne annuelle
 MDR : *multidrug resistance*, résistance multiple aux drogues
 MeHg : méthylmercure
 MES : matière en suspension
 MF : *modifying factor*
 MG : matière grasse
 MIL : modèle de l'ion libre
 MoBB : *margin of body burden*, marge de charge corporelle
 MOD : matière organique dissoute
 MOE : *margin of exposure*

- MOS : *margin of safety*
 MSA : Mutuelle sociale agricole
 MT : métallothionéine
 MTBE : méthyl tert-butyl éther
 MTD : *minimal therapeutic dose*
 MXR : *multixenobiotic resistance*
 NDL : *non-dioxine-like-compounds*
 NH₃ : ammoniac
 Ni : nickel
 NIOSH : *National Institute for Occupational Safety and Health*
 NIV : nivalénol
 N₂O : protoxyde d'azote
 NO_x : oxyde d'azote
 NOAEL : *no observed adverse effect level*, dose sans effet toxique observable
 NOEC : *no observed effect concentration*, concentration sans effet observable
 NOEL : *no observed effect level*, dose sans effet observable
 NOP : *national organic program*
 NQ : norme de qualité
 NQE : norme de qualité environnementale
 NRBC : nucléaire radiologique, bactériologique et chimique
 NRPS : *non ribosomal peptide synthetase*
 OAP : œdème aigu du poumon
 OAV : Office alimentaire et vétérinaire
 OCA : Observatoire des consommations alimentaires
 OCDE : Organisation de coopération et de développement économique
 OCLAESP : Office central de lutte contre les atteintes à l'environnement
 et à la santé publique
 OEHHA : Office de l'environnement et du danger pour la santé en Californie
 (US EPA)
 OEL : *occupational exposure limit*
 OIE : Office international de l'eau
 OIT : Organisation internationale du travail
 OMC : Organisation mondiale du commerce
 OMI : Organisation maritime internationale
 OMS : Organisation mondiale de la santé
 ONEMA : Office national de l'eau et des milieux aquatiques
 OP : organophosphoré
 OPE : Observatoire pérenne de l'environnement (ANDRA)
 OQS : Observatoire de la qualité des sols (INRA)
 OR : odds ratio, rapport de cotes
 ORP : Observatoire des résidus de pesticides
 ORQUE : Observatoire de recherche pour la qualité de l'environnement
 OSHA : *Occupational Safety and Health Administration*
 OTA : ochratoxine A
 p : pression partielle du gaz
 P : phénanthrène
 PAR-gamma : *peroxisome proliferators-activated receptor-gamma*
 Pb : plomb

- PBB : *polybrominated biphenyl*
 PBDE : polybromodiphényléther
 PBPK : *physiologically-based pharmacokinetic*, modèle physiologique basé sur la pharmacocinétique
 PBT : substance persistante, bioaccumulable et toxique
 PCB : polychlorobiphényle
 PCB-DL : congénère de PCB ayant une même action que les dioxines
 PCB_i : congénère indicateur de PCB
 PCB-NDL : congénère de PCB n'ayant pas d'action comme les dioxines
 PCCC : paraffine chlorée à chaîne courte
 PCDD : polychlorodibenzodioxine (ou dioxine dibenzo-p-polychlorée)
 PCDD/F : dioxine et furanne
 PCDF : polychlorodibenzofuranne (ou dibenzofuranne)
 PCP : pentachlorophénol
 PCR : *polymerase chain reaction*
 PE : perturbateur endocrinien
 PEC : concentration prévisible dans l'environnement
 PED : pays en développement
 PFC : composé organique perfluoré ou perfluorocarbure
 PFHxS : *perfluorohexanesulfonate anion*
 PFOA : *perfluorooctanoic acid*, acide perfluorooctanoïque
 PFOS : *perfluorooctanesulfonic acid*, sulfonate de perfluorooctane
 PFT_rA : acide perfluorotridécanoïque
 PFUnA : acide perfluoroundécanoïque
 PHAH : *polyhalogenated aromatic hydrocarbons*
 PIC : information et consentement préalables
 PICA : consommation habituelle de substances non alimentaires
 PM : particule fine (1,0 : 1 µm ; 2,5 : 2,5 µm ; 10 : 10 µm)
 PM_{1,0} : particule fine de 1,0 µm
 PM_{2,5} : particule fine de 2,5 µm
 PM₁₀ : particule fine de 10 µm
 PN : Pont de Normandie
 PNEC : *predicted no effect concentration*, concentration prévisible sans effet
 PNUE : Programme des Nations unies pour l'environnement
 POCIS : *polar organic chemical integrative sampler*
 POEA : polyoxyéthylène amine (adjuvant du Roundup)
 POP : polluant organique persistant
 PRAM : pôle de recherche agro-environnementale de la Martinique
 PRG : indicateur de potentiel de réchauffement global
 PSP : *paralytic shellfish poisoning*
 PTFE : polytétrafluoroéthylène (teflon)
 PTX : pecténotoxine
 PVC : polychlorure de vinyle
 PVHA : protéine végétale hydrolysée par voie acide
 Py : pyrène
 QD : quotient de danger
 QSAR : *quantitative structure – activity relationship*
 R4BP3 : *register for biocidal products 3*

- RCO : Réseau de contrôle opérationnel
 RCR : rapport de caractérisation des risques
 RCS : Réseau de contrôle de surveillance
 REACH : *registration, evaluation, autorisation and restriction of chemicals*
 REMI : Réseau microbiologique
 REBENT : Réseau benthique
 REPHY : Réseau phytoplancton
 REPOM : Réseau de surveillance de la qualité des eaux et sédiments des ports maritimes
 RFB : *brominated flame retardants*
 RINBIO : Réseau intégrateurs biologiques
 RIVM : *Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu*
 RNB : Réseau national de bassin
 RNM : Réseau national de mesures de la radioactivité de l'environnement
 RNO : Réseau national d'observation de la qualité du milieu marin
 RT-PCR : *reverse transcriptase polymerase chain reaction*
 RXR : *retinoid X receptor*
 Sandre : Service d'administration nationale des données et référentiels sur l'eau
 SCM : sensibilité chimique multiple
 SCR : rapport des concentrations dans les sédiments
 SDSSA : Sous-direction de la sécurité sanitaire des aliments
 Se : sélénium
 SEM : semicarbazide
 SF : *safety factor*
 SF6 : hexafluorure de soufre
 SF : *oral slope factor*
 SIE : système d'information sur l'eau
 SIR : rapport standardisé d'incidence
 SMR : standardisé de mortalité
 SNDE : schéma national des données sur l'eau
 SO2 : dioxyde de soufre
 SOERE : système d'observation et d'expérimentation sur le long terme, pour la recherche en environnement
 SPMD : *semi-permeable membrane devices*
 SPV : Service de la protection des végétaux (ou sapeur-pompier volontaire)
 SSC : surface sous la courbe
 SSD : *species sensitivity distribution*
 SSH : hybridation soustractive
 STEP : station d'épuration
 SVHC : *substance of very high concern*
 T-2 : toxine T2 (trichothécène)
 TBBP-A : tétrabromobisphénol A
 TBT : tributylétain
 TCA : *tolerable concentration in air*
 TCB : trichlorobenzène
 TCDD : 2,3,7,8-tétrachloro-dibenzo para-dioxine
 TCDF : tétrachloro-dibenzofuranne
 TCT : trichothécène

TDI : *tolerable daily intake*
TEF : *toxic equivalent factor*, facteur d'équivalence toxique
TEL : transfert linéique d'énergie
TEQ : *toxic equivalent quantity*, équivalent toxique
TERA : *toxicology excellence for risk assessment*
TGAP : taxe générale sur les activités polluantes
THM : trihalométhane
TMR : temps moyen de résidence
T_p : temps de pondération
TPT : triphénylétain
TQG : *tissue quality guideline*
TRA : *tissue residue approach*
TSCA : *toxic substance control act*
TSP : particule en suspension
TTC : *threshold of toxicological concern*
UAG : université des Antilles et de la Guadeloupe
UE : unité expérimentale
UE : Union européenne
UF : facteur d'incertitude
UF6 : hexafluorure d'uranium
UNEP : *United Nations Environment Programme*
UNICE : Union des confédérations de l'industrie et des employeurs d'Europe
USEPA : *United States Environmental Protection Agency*
UV : ultraviolet
UVCB : *unknown or variable composition complex reaction products and biological materials*
VBR : valeur biologique de référence
VLB : valeur limite biologique
VGAI : valeur guide d'air intérieur
VHU : véhicule hors d'usage
VL : valeur limite
VLCT : valeur limite court terme
VLEP : valeur limite d'exposition professionnelle
vPvB : substance très persistante et très bioaccumulable
VLE : valeur limite d'exposition
VME : valeur moyenne d'exposition
VTR : valeur toxique de référence
WGBEC : *Working Group on Biological Effects of Contaminant*
WHO : *World Health Organisation*
XRE : *xenobiotic regulatory element*
YTX : yessotoxine
ZCIT : zone de convergence intertropicale

SOMMAIRE

Remerciements	V
Avant-propos de la seconde édition	VII
Abréviations et sigles	XI

INTRODUCTION

1. Démarche de l'estimation du risque chimique	3
2. Perception du risque et de la sécurité par la population française	6
3. Objectifs de l'ouvrage	7

L'identification des dangers

CHAPITRE 1

Les principaux polluants de l'environnement	11
Introduction	11
1. Polluants inorganiques	12
2. Polluants organométalliques	19
3. Polluants organiques	21
4. Particules microniques ou aérosols	28
5. Biotoxines	29
6. Molécules présentes dans les aliments	30
7. Polluants émergents	35
8. Armes chimiques	41
9. Polluants radioactifs	41
Conclusion	45

CHAPITRE 2

Les classifications des polluants	49
1. Différentes pollutions	49
2. Classifications chimiques	49
3. Classifications des substances prioritaires et dangereuses	55
4. Classifications opérationnelles	62
5. Classifications fonctionnelles	64
6. Étiquetage des produits chimiques	65
7. Polluant ou contaminant ?	67

CHAPITRE 3

Les sources de pollution	69
1. Sources naturelles	69
2. Sources industrielles, agricoles, urbaines et domestiques	70
3. Empoisonnement secondaire ou nutritionnel	80

4. Caractéristiques des sources gouvernant le devenir des polluants	81
5. Listes des principaux polluants et leurs sources	82

L'évaluation de l'exposition au danger

CHAPITRE 4

Le devenir et le comportement des polluants dans l'environnement	97
1. Dispersion des polluants dans l'atmosphère	97
2. Hydrosphère	102
3. Lithosphère	106
4. Biosphère	110
5. Échanges intercompartimentaux	110
6. Cycles biogéochimiques	115

CHAPITRE 5

L'exposition des êtres vivants aux polluants chimiques	125
1. Évaluation de l'exposition	125
2. Concentrations des polluants dans l'atmosphère	126
3. Concentrations des polluants dans l'hydrosphère	127
4. Concentrations des polluants dans la lithosphère	131
5. Concentration des polluants dans la biosphère : source d'empoisonnement secondaire	136
6. Concentrations des polluants dans l'anthroposphère	137
7. Banques de données et évolution spatio-temporelle de la contamination de l'environnement	156

CHAPITRE 6

Les normes environnementales officielles	165
1. Valeurs limites officielles de qualité de l'air ambiant	167
2. Valeurs limites officielles dans les sols	168
3. Valeurs limites officielles dans l'eau	170
4. Valeurs limites officielles dans les aliments	172
5. Normes de qualité environnementale	175
6. Évolution des réglementations	180

CHAPITRE 7

Caractéristiques physicochimiques des polluants environnementaux et biodisponibilité	183
1. Spéciation chimique des métaux dans la phase aqueuse	183
2. Spéciation chimique des métaux dans les sols et les sédiments	186
3. Spéciation chimique dans les organismes	195
4. Concepts du modèle de l'ion libre et du modèle du ligand biotique	199
5. Lipophilie	201
6. Caractéristiques physicochimiques des molécules organiques	204

L'imprégnation ou la bioaccumulation des polluants

CHAPITRE 8

La bioaccumulation des polluants chez les êtres vivants	213
1. Voies de pénétration	213
2. Facteurs influençant la bioaccumulation	216
3. Exemples de la concentration des éléments métalliques chez les invertébrés aquatiques	219
4. Quelques exemples de pénétration de quelques polluants	221
5. Modélisation de la bioaccumulation	222
6. Quantification de la bioaccumulation	223

CHAPITRE 9

La distribution, la métabolisation et l'élimination des polluants chez les êtres vivants	233
1. Distribution des polluants dans l'organisme	233
2. Attirance d'un polluant pour un organe	235
3. Métabolisation	237
4. Voies d'élimination	241
5. Paramètres et modèles pharmacocinétiques	250

CHAPITRE 10

Les transferts trophiques des polluants	255
1. Transferts trophiques des polluants	255
2. Bioaccessibilité et biodisponibilité	264
3. Paramètres des transferts trophiques	265
4. Bioamplification	268
5. Conséquences des mécanismes de détoxification et de la tolérance sur la bioamplification	273

CHAPITRE 11

Les interactions	279
1. Quelques réflexions sur les études d'interactions	279
2. De la théorie à la pratique	280
3. Influence des facteurs écologiques	286
4. Quelques applications des interactions	288
5. Mécanismes d'action : tentatives explicatives	291
6. Schéma d'études des interactions	292
7. Quelques réflexions sur les méthodologies	293

Caractérisation du danger. Les effets nocifs

CHAPITRE 12

La toxicité et la détoxification des polluants	299
1. Principes généraux de la toxicité	299
2. Mécanismes de la toxicité	303

3. Facteurs influençant la réponse de l'organisme	307
4. Mécanismes de défense et de détoxification	313
5. Tolérance aux polluants	319
6. Conclusion	322

CHAPITRE 13

Les méthodes d'évaluation des effets néfastes chez les êtres vivants 327

1. Relations entre dose (concentration) et effet (réponse)	327
2. Principaux paramètres de toxicité	336
3. Méthodes en (éco)toxicologie	338
4. Effets au niveau moléculaire	342
5. Effets aux niveaux tissulaire et cellulaire	342
6. Effets au niveau individuel	343
7. Effets au niveau populationnel	344
8. Effets au niveau des communautés et des écosystèmes	345

CHAPITRE 14

La toxicité et le mode d'action des principaux polluants 349

1. Effets toxiques des polluants chimiques	349
2. Effets des radiations ionisantes	355
3. Modes et mécanismes d'action des polluants	364
4. Évaluation de la toxicité des mélanges : un challenge difficile	369
5. Facteurs d'équivalence toxique	374

La caractérisation des risques chimiques

CHAPITRE 15

La caractérisation du risque chimique dans l'environnement pour les êtres vivants 383

1. Contexte réglementaire de l'évaluation des risques environnementaux	384
2. Principes généraux de l'évaluation des risques pour l'environnement	385
3. Évaluation des expositions	385
4. Évaluation des effets	391
5. Caractérisation du risque	400
6. Conclusion : quelques difficultés	402

CHAPITRE 16

La caractérisation du risque chimique chez l'homme 405

1. Caractérisation du danger	407
2. Valeurs toxicologiques de référence	407
3. Diverses valeurs toxicologiques de référence	413
4. VLE, VME, VLCT, VGAI et IDHL	418
5. Calcul de l'exposition et du risque pour les populations humaines	420
6. Caractérisation du risque	427
7. Études épidémiologiques	431

8. Bénéfices ou risques ?	435
9. Gestion du risque et communication sur le risque	437

Exemples de l'impact des polluants sur la flore et la faune

CHAPITRE 17

L'impact des polluants minéraux et des organométalliques	455
1. Eutrophisation	455
2. Acidification des eaux douces : causes et conséquences pour l'environnement	460
3. Antisalissures (TBT et néogastéropodes)	461
4. Cadmium	463
5. Mercure	464
6. Nanoparticules	466
7. Saturnisme chez les oiseaux d'eau	468
8. Éléments essentiels (cuivre, zinc, fer)	470
9. Conséquences du changement climatique sur le risque chimique environnemental	473

CHAPITRE 18

L'impact des polluants organiques	479
1. Accidents pétroliers et marées noires	479
2. Traitements phytosanitaires	487
3. Perturbateurs endocriniens	489
4. Antibiotiques	494

Environnement et santé humaine

CHAPITRE 19

Généralités sur les risques liés aux polluants chimiques pour la santé des populations humaines	501
1. La dégradation de l'environnement entraîne-t-elle une altération de la santé humaine ?	501
2. Incidences de la pollution atmosphérique sur la santé humaine	503
3. Risques sanitaires liés à la contamination des sols et des sédiments	508
4. Risques sanitaires liés à la pollution des eaux douces	511
5. Risques sanitaires liés aux aliments	516
6. Risques sanitaires liés à l'habitation	519
7. Risques sanitaires liés au travail	528
8. Conclusion	531

CHAPITRE 20

Les exemples d'altérations de la santé humaine par des polluants métalliques	535
1. Accident de Minamata	535
2. Exposition au mercure de la population amérindienne Wayana de Guyane	538

3. Contamination du riz par le cadmium	542
4. Risques sanitaires des Féringiens se nourrissant de mammifères marins (Globicéphales)	543
5. Arsenic dans les eaux	545
6. Fluor dans les eaux	548

CHAPITRE 21

Les exemples d'altérations de la santé humaine par des polluants organiques	553
1. Pesticides	553
2. Chlordécone aux Antilles	557
3. Dioxines et substances apparentées (PCB, PBDE)	561
4. Biotoxines	562
5. Médicaments dans l'environnement et leurs conséquences sanitaires	564
6. Perturbateurs endocriniens	565

CHAPITRE 22

Exemples d'estimation du risque radioactif à l'égard de l'homme	575
1. Excès de leucémies dans le canton de Beaumont-Hague	576
2. Conséquences de l'accident de Tchernobyl	589
3. Conséquences de l'accident de Fukushima	595

Les applications de l'évaluation du risque chimique

CHAPITRE 23

Les outils de l'évaluation du risque chimique	605
1. Bioessais	605
2. Chaînes trophiques expérimentales	611
3. Unités physiologiques : cages à métabolisme, cases lysimétriques et cellules physiologiques	612
4. Écotrons (microcosmes, mésocosmes et macrocosmes)	615
5. Expériences en nature : essais agronomiques et transplantations	622
6. OMICs, nouveaux outils de la biologie moléculaire	623
7. Modélisations	623

CHAPITRE 24

Les autorisations de mise sur le marché	631
1. Produits de santé humaine	632
2. Médicaments à usage vétérinaire	634
3. Biocides	634
4. Produits phytopharmaceutiques	635
5. Matières fertilisantes et supports de culture	637
6. Substances chimiques	638
7. REACH : une nouvelle procédure	638

CHAPITRE 25

Les méthodologies et les réseaux de surveillance de la qualité de l'environnement	645
1. Généralités	645
2. Méthodologies de surveillance de la qualité de l'environnement	647
3. Réseaux de surveillance	662
4. Conclusion	675

CHAPITRE 26

Les accidents et les attentats chimiques	679
1. Accidents ayant un impact sur l'environnement	679
2. Accidents ayant un impact sanitaire	685
3. Attentats	690

CONCLUSIONS

1. Évaluation du risque chimique dû à la contamination de l'environnement	695
2. Évaluation du risque chimique : un besoin, deux philosophies	697
3. Avancées et limites de REACH	698
4. L'homme, inventeur de nouvelles molécules chimiques	700
5. Santé et environnement	701
6. Justice environnementale	703
7. Regard des citoyens sur la notion de risque : démocratie et science	703
Index	707



INTRODUCTION

Les produits chimiques ont une place de plus en plus prégnante dans notre société et nous assistons à une explosion du nombre de molécules utilisées. Ainsi, les substances indexées au *Chemical Abstracts Registry* (ayant un numéro CAS) étaient 212 000 en 1965, 16 millions à la fin 1996 avec une progression actuelle supérieure à 1 million par an. Parmi les substances commercialisées, ayant un numéro EINECS (*European Inventory of Existing Commercial Chemical Substances*), qui est d'environ 100 000, 10 000 substances sont commercialisées à plus de 10 tonnes par an et 20 000 sont commercialisées entre 1 et 10 tonnes annuellement. Ceci représente donc 30 000 substances, dont les propriétés toxiques sont ignorées pour 65 % d'entre elles.

Le caractère dangereux et le risque potentiel de ces molécules ont amené les autorités à prendre, dès 1981, des mesures légales et réglementaires pour protéger l'homme et son environnement. Ces réglementations tiennent compte des quantités commercialisées. En ce qui concerne les substances dangereuses nouvelles (ayant un numéro ELINCS, *European List of Notified Chemical Substances*), l'évaluation des risques pour l'homme et l'environnement est obligatoire avant commercialisation, lorsque les quantités fabriquées sont supérieures à 10 kg.an⁻¹. Elles ont fait l'objet, en 2008, de 8 433 notifications, ce qui représente un total de 5 292 substances (ELINCS, 2009).

Les premières mesures de la directive REACH (*Registration, Evaluation, Authorisation and restriction of Chemicals*) sont entrées en application le 1^{er} juin 2008. La législation exige désormais des entreprises qu'elles apportent la preuve de l'innocuité d'une substance chimique avant de la commercialiser. C'est l'inverse aux États-Unis, où c'est aux pouvoirs publics de démontrer qu'un produit est nocif pour que la commercialisation en soit restreinte ou le produit retiré du marché.

Les nouvelles restrictions, imposées par l'Europe aux fabricants de substances chimiques potentiellement nocives, contraignent les industriels à trouver de nouveaux moyens de produire toute une série de biens de consommation courante. Les fabricants estiment qu'ils devront investir plusieurs milliards de dollars pour se mettre en conformité avec cette directive, ce qui risque d'entraîner une forte augmentation du prix de certains produits.

La chimie est le dernier domaine en date dont les Européens modifient les pratiques commerciales, plaçant les sociétés étrangères face à un dilemme : se plier à la législation ou perdre leur accès à un marché de 28 pays, fort de près de 500 millions de consommateurs.

Conformément à la législation européenne, les fabricants doivent désormais étudier et communiquer les risques que présentent un certain nombre de produits. Grâce à Internet, ces données seront pour la première fois mises à la disposition des consommateurs, des autorités réglementaires et des plaignants du monde entier. Jusqu'à présent, la plupart de ces informations étaient soit inexistantes, soit jalousement gardées par les entreprises. L'UE doit également établir une liste de « substances très

préoccupantes », celles qui sont soupçonnées de provoquer des cancers ou d'autres pathologies. Toute entreprise souhaitant produire ou vendre une substance figurant sur cette liste doit obtenir une autorisation.

Aux États-Unis, la situation est tout à fait différente car il n'y a pas de réglementation fédérale sur ce sujet, mais une multitude de lois distinctes d'un État à l'autre. Les lois en vigueur depuis 30 ans ont rendu très difficile l'interdiction ou la restriction de produits chimiques. La loi de 1976 sur le contrôle des substances toxiques concernait près de 62 000 produits déjà commercialisés. Ceux développés après le vote de ce texte ne sont soumis à aucun test ; les fabricants doivent simplement fournir des informations sur leur toxicité aux pouvoirs publics, qui décident éventuellement de commander des études. En plus de 30 ans, l'Agence de protection de l'environnement (EPA) n'a demandé un complément d'enquête que sur environ 200 produits, soit un très faible pourcentage des 80 000 substances présentes sur le marché américain. Depuis 1976, elle n'en a interdit qu'un faible nombre. L'agence est confrontée à tellement d'obstacles qu'elle a été incapable d'interdire l'amiante, dont les propriétés carcinogènes sont désormais largement reconnues et qui est interdite dans plus de 30 pays. Faute de mieux, l'EPA s'en remet à la bonne volonté des industriels pour qu'ils cessent de produire des substances suspectes.

La nouvelle directive européenne est entrée en vigueur après huit années de pourparlers opposant les défenseurs des consommateurs et de la nature aux représentants de l'industrie chimique américaine et européenne. Le puissant *lobby* de la chimie est parvenu à assouplir le texte.

Quatre-vingt-dix pour cent des entreprises américaines sont concernées par la directive européenne et les normes européennes obligeront beaucoup de fabricants à reformuler leurs produits pour les commercialiser en Europe et donc aux États-Unis. Ainsi, DuPont compte faire enregistrer 500 substances auprès de l'Agence européenne des produits chimiques (ECHA) et donc dépenser plusieurs dizaines de millions de dollars. Plus d'une vingtaine devrait figurer sur la liste des « substances très préoccupantes ». Ceci semble être le cas de l'acide perfluorooctanoïque (*perfluorooctanoic acid*, PFOA) qui entre notamment dans la fabrication du Téflon®. Soupçonné d'être carcinogène, il s'accumule dans l'environnement et les tissus humains. En 2005, DuPont a conclu un accord de 16,5 millions de dollars avec l'EPA, qui l'accusait de rétention illégale d'informations sur les risques sanitaires présentés par le PFOA et sur la pollution des eaux voisines d'une usine de Virginie occidentale. DuPont et d'autres entreprises ont arrêté la production de cet acide depuis 2015.

Il faut aussi compter avec une prise de conscience, à tort ou à raison, des consommateurs à l'égard des dangers chimiques. Aussi, dès qu'un produit est considéré comme préoccupant, ceci déclenche une réaction des consommateurs. Ainsi, le bisphénol A, composé utilisé dans les plastiques, lorsque les gouvernements des États-Unis et du Canada se sont dits inquiets, les principaux détaillants ont retiré de leurs rayons les biberons qui en contenaient. Il faudrait une meilleure connaissance des bénéfices que procure l'utilisation de la molécule et du risque réel qu'elle fait encourir à tous les êtres vivants.

La maîtrise du risque chimique est délicate en raison de la diversité importante des contaminants (pesticides, résidus vétérinaires, métaux lourds, polluants environnementaux...), du fait que les risques peuvent provenir des matières premières (contamination à l'origine), que les effets peuvent être à court terme mais aussi à long terme, que nous sommes en présence de mélanges de polluants et qu'à côté du risque, des bénéfices peuvent être importants. Pour estimer le risque, le niveau

d'expertise est nécessairement élevé et les analyses sont coûteuses. Par ailleurs, les réglementations européennes et leurs traductions en lois françaises sont nombreuses.

Enfin, il existe souvent une grande différence entre le risque réel et le risque perçu par la population. Ainsi, il est relativement fréquent que les risques les plus importants soient bien acceptés par la population, alors que des risques inexistantes, ou pour le moins minimales, soient ressentis comme inacceptables par le citoyen. Par exemple, les risques liés au tabac, à l'alcool ou aux accidents de la route sont négligés, tandis que la présence de bisphénol A dans les biberons sera considérée comme un risque énorme et les hommes politiques français se sentiront obligés de voter une loi d'interdiction de commercialisation de ce type de produit.

1. Démarche de l'estimation du risque chimique

Il est indispensable d'évaluer les risques chimiques environnementaux, car le nombre de substances chimiques mises sur le marché est important avec des usages très divers (domestique, industriel, agricole). Parmi ces substances, certaines sont des produits toxiques par définition (pesticides, biocides). Il y a également des produits biologiquement actifs (médicaments). Ces substances sont rejetées dans l'air, l'eau, les sols et les sédiments ; elles sont aussi émises par les matériaux (colles, vernis, solvants, peintures...) ; de plus, certaines sont néoformées dans l'environnement (comme l'ozone).

De plus en plus de substances chimiques sont utilisées en Europe, 1 million de tonnes en 1930, 100 millions de tonnes aujourd'hui. Le nombre de substances utilisées en Europe est d'environ 100 000 (10 000 > 10 tonnes ; 20 000 entre 1 et 10 tonnes). Parmi les 100 000 substances, seulement environ 200 ont fait l'objet d'une évaluation des risques par les pays membres de l'UE. Ces procédures sont longues et coûteuses. Le manque de données toxicologiques est criant : d'après une étude de l'USEPA, sur les 3 000 substances jugées majeures, 43 % n'ont pas de données toxicologiques ou écotoxicologiques et seulement 7 % sont complètement renseignées. Jusqu'à maintenant en Europe, les notifications concernaient uniquement les substances mises sur le marché postérieurement à 1981. L'application de REACH commence à remédier à cette carence en prenant en compte toutes les substances chimiques mises en quantités sur le marché en commençant par les plus dangereuses.

L'analyse du risque peut être subdivisée en trois parties principales que sont l'évaluation du risque, la gestion du risque et la communication sur ce risque (Figure 0-1). Seule l'évaluation du risque sera abordée ici, les deux autres parties, étant des étapes politiques, ne seront développées que dans le chapitre 16.

1.1. Principe de l'évaluation des risques

Le processus a été codifié par l'académie des sciences aux États-Unis. Il est repris par la directive 93/67/CEE du 20 juillet 1993. Il se fait suivant quatre étapes (Marchand et Tissier, 2005) faisant appel à des expertises scientifiques :

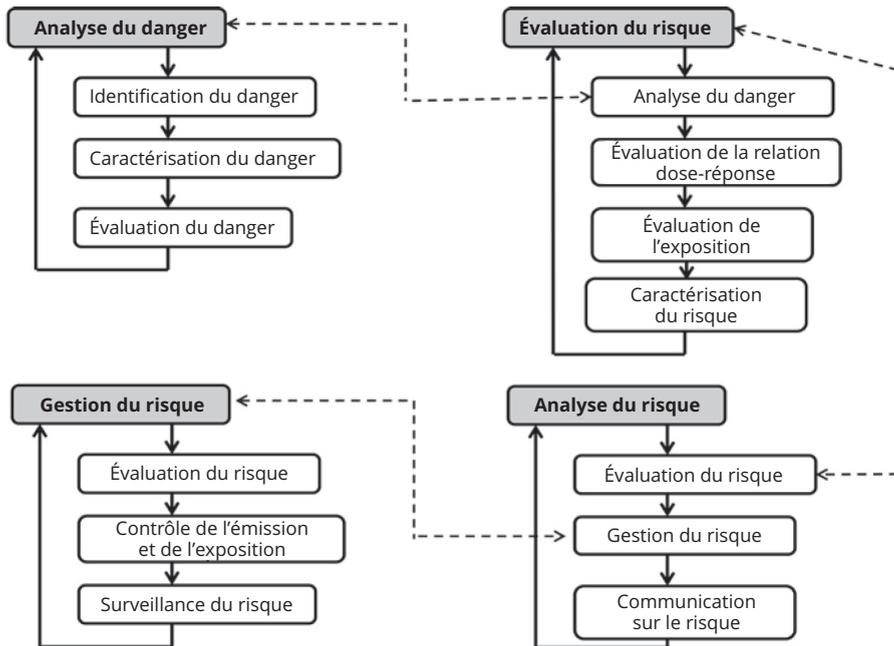


Figure 0-1. Principe de l'analyse du risque (modifié d'après Duffus, 2001).

- l'identification des dangers ;
- l'évaluation de l'exposition au danger ;
- la caractérisation du danger ou évaluation des effets ;
- la caractérisation du risque (Figure 0-2).

Il y a fréquemment confusion entre danger et risque. Rappelons les définitions officielles. « Un danger est un agent biologique, chimique ou physique, présent dans les denrées alimentaires ou les aliments pour animaux, ou un état de ces denrées alimentaires ou aliments pour animaux, pouvant avoir un effet néfaste sur la santé » (règlement [CE] n° 178/2002, article 3, point 14). « Le risque est une fonction de la probabilité et de la gravité d'un effet néfaste sur la santé, du fait de la présence d'un danger » (règlement [CE] n° 178/2002, article 3, point 9). Aussi, le risque est la probabilité d'apparition du danger.

1.2. Identification des dangers

C'est l'identification des effets indésirables qu'une substance est intrinsèquement capable de provoquer. Pour ce faire, les contributions de plusieurs disciplines sont requises. Tout d'abord la toxicologie qui, à l'aide d'essais biologiques *in vivo* et *in vitro*, permet de déterminer l'effet de la substance et, si possible, son mécanisme d'action. Ensuite, l'écotoxicologie qui étudie le devenir des substances et leurs effets toxiques au sein des écosystèmes. Enfin, l'épidémiologie qui est chargée d'établir les relations entre les effets sur les populations réelles et l'exposition mesurée ou estimée. Nous recenserons les substances dangereuses, leurs classifications et leurs sources dans la première partie de cet ouvrage.

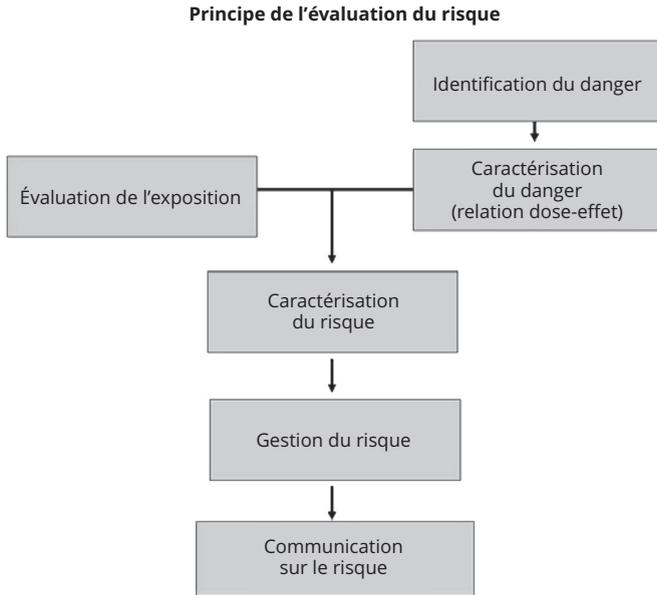


Figure 0-2. Principe de l'évaluation du risque.

1.3. Évaluation de l'exposition

C'est la détermination des émissions artificielles, des voies de transfert et des vitesses de déplacement d'une substance et de sa transformation ou de sa dégradation (physique, chimique ou biologique), afin d'évaluer les concentrations (doses) auxquelles les populations humaines ou les composantes de l'environnement sont exposées ou susceptibles de l'être. Cette étape fait appel à de nombreux champs disciplinaires (modélisation, mécanique des fluides, thermochimie, cinétique chimique, chimie analytique, biochimie, microbiologie, physique et géostatistique).

Les niveaux de contamination peuvent être estimés selon deux méthodes, les données mesurées dans l'environnement et les valeurs calculées à partir de modèles. Ceci sera abordé dans la deuxième partie et, en particulier, dans le chapitre 5.

1.4. Évaluation des effets

C'est l'estimation de la relation entre la dose, ou le niveau d'exposition à une substance, et l'incidence et la gravité d'un effet. Les disciplines indispensables sont les statistiques, afin de caractériser les niveaux d'effet significatifs, la modélisation pour établir la loi reliant la dose à la réponse et pour mettre au point des modèles de transposition et extrapoler aux faibles doses. Il faut distinguer la toxicologie réglementaire, qui utilise principalement des tests de toxicité létaux ou sublétaux codifiés, de la toxicologie fondamentale, qui s'efforce de comprendre les mécanismes de la toxicité. Des disciplines telles que la physiologie et la biochimie sont indispensables pour comprendre les mécanismes d'action et leur signification, et l'écologie pour

interpréter les effets au niveau des écosystèmes. Nous aborderons cet aspect dans la quatrième partie et, notamment, dans le chapitre 14.

1.5. Caractérisation du risque

C'est l'estimation de l'incidence et de la gravité des effets indésirables susceptibles de se produire dans une population humaine ou une composante de l'environnement en raison de l'exposition, réelle ou prévisible, à une substance ; la caractérisation peut comprendre l'« estimation du risque », c'est-à-dire la quantification de cette probabilité.

2. Perception du risque et de la sécurité par la population française

L'IRSN (2009 ; 2015) a fait réaliser par BVA divers sondages, depuis 1997, sur la perception par la population française du risque et de la sécurité. Les derniers sondages ont retenu 31 scénarios de risques avérés ou potentiels qui peuvent être regroupés en cinq catégories, les risques individuels (accidents de la route, alcoolisme, drogue, tabagisme, obésité des jeunes, Sida), les risques collectifs non industriels (accidents domestiques, bruit, canicule, incendies de forêt, inondations), les risques technologiques attachés à des sites identifiables, mais à risques industriels (centrales nucléaires, déchets chimiques, déchets radioactifs, installations chimiques) ou à risques collectifs (antennes de réseau pour téléphones portables, grippe aviaire, incinérateurs, maladies professionnelles, OGM, produits alimentaires, radiographies, radiothérapies, radon, transports de matières dangereuses, terrorisme) et les pollutions diffuses (pesticides, pollution atmosphérique, pollution des lacs, pollution des sols, retombées en France de Tchernobyl).

Trois aspects sont pris en compte par ce sondage, l'importance du risque perçu (de quasi nulle à très élevée), la confiance accordée aux autorités pour leurs actions de protection des personnes (de « non, pas du tout » à « oui, tout à fait ») et la vérité des informations communiquées sur ces risques (de « non, pas de tout » à « oui, tout à fait »).

Les risques sont considérés comme élevés pour les catégories risques individuels, risques technologiques industriels et risques dus aux pollutions diffuses, mais si la confiance et la vérité sont considérées comme bonnes dans le cas des risques individuels, elles sont, en revanche, considérées comme mauvaises pour les risques industriels et les pollutions diffuses. Pour les risques domestiques et les risques technologiques à caractère collectif, l'importance du risque est considérée comme faible, mais la confiance et la vérité sont jugées meilleures pour les risques domestiques que pour les risques technologiques collectifs (Figure 0-3).

Les questions de ces sondages ont évolué au cours du temps, mais il est possible de faire certaines remarques sur l'évolution de l'opinion de la population dans le temps. Ces évolutions ne sont pas spectaculaires, montrant une bonne stabilité de l'opinion publique sur les problèmes de risque et de sécurité.

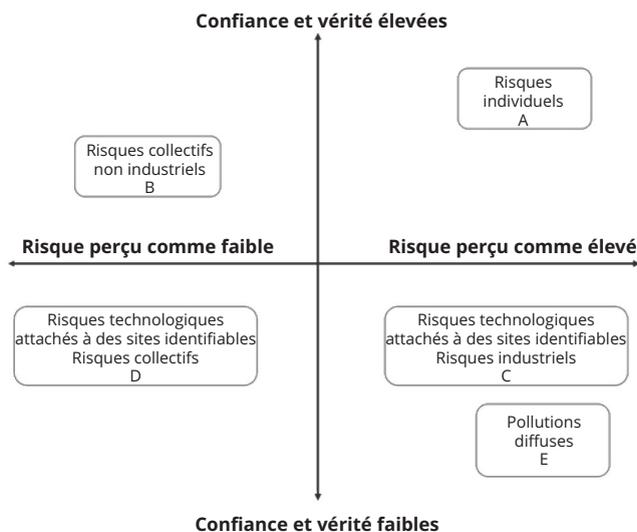


Figure 0-3. La perception des risques par la population française, la confiance accordée aux autorités pour leurs actions de protection des personnes et la vérité des informations communiquées sur ces risques. Les diverses catégories de risque : A) accidents de la route, alcoolisme, drogue, tabagisme, obésité des jeunes, Sida ; B) accidents domestiques, bruit, canicule, incendies de forêt, inondations ; C) centrales nucléaires, déchets chimiques, déchets radioactifs, installations chimiques ; D) antennes de réseau pour téléphones portables, grippe aviaire, incinérateurs, maladies professionnelles, OGM, produits alimentaires, radiographies, radiothérapies, radon, transports de matières dangereuses, terrorisme ; E) pesticides, pollution atmosphérique, pollution des lacs, pollution des sols, retombées en France de Tchernobyl (d'après une enquête BVA pour l'IRSN, 2009).

Les questions d'environnement préoccupent beaucoup les Français, en particulier les pollutions de l'air, des eaux et des sols. Les Français font confiance aux experts (surtout aux personnels du CNRS), mais demandent plus de transparence et un « partage de l'expertise » par l'intermédiaire des groupes pluralistes notamment (*voir* chapitre 22).

Pour les risques spécifiques au nucléaire, les Français se montrent sceptiques sur la gestion des crises comme celles dues aux événements du Tricastin (fuite d'uranium) et ils demandent plus d'informations et plus de transparence. Il en résulte une détérioration de la perception des centrales nucléaires par le public et ceci a été accentué par l'accident de Fukushima.

3. Objectifs de l'ouvrage

Les objectifs de cet ouvrage, divisé en huit parties, sont multiples. Le premier est de fournir des renseignements aussi précis que possible sur les méthodologies utilisées pour évaluer les risques liés aux polluants environnementaux. Aussi, au cours de cet ouvrage, nous détaillerons les démarches des estimations des risques chimiques pour les êtres vivants et pour l'homme. Les cinq premières parties reprennent la démarche

classique européenne (identification des dangers chimiques, évaluation de l'exposition aux dangers, caractérisation des dangers et caractérisation des risques chimiques chez les êtres vivants et chez l'homme). La troisième partie détaille l'imprégnation ou la bioaccumulation des polluants avec les voies de pénétration et d'élimination, l'organotropisme des polluants, l'influence de la spéciation sur la biodisponibilité, les transferts trophiques des polluants et les interactions des polluants entre eux.

Le deuxième objectif est de présenter des exemples concrets de pollutions chimiques dans l'environnement et de leurs conséquences pour les êtres vivants. Aussi, la sixième partie rassemble quelques exemples de l'impact des polluants organiques et inorganiques sur la flore et la faune. La septième partie regroupe des exemples de l'altération de la santé humaine par les divers polluants chimiques (inorganiques, organiques, radioactifs et les perturbateurs endocriniens).

Enfin, la dernière partie est consacrée aux applications. Elle recense les principaux outils à notre disposition pour estimer les risques chimiques, notamment les divers tests de toxicité, les outils de simulation des contaminations et les méthodes de modélisation dans le domaine des risques chimiques en environnement. Elle évoque aussi les démarches pour les autorisations de mise sur le marché, les méthodes et les réseaux de surveillance de la qualité de l'environnement, ainsi que quelques exemples d'attentats et d'accidents chimiques.

Notre propos vise à synthétiser les connaissances et nous fournissons à la fin de chaque chapitre une liste de références permettant au lecteur d'aller plus loin. Ces références sont elles-mêmes des synthèses relativement récentes. En revanche, pour les exemples, les références sont plus spécialisées.

BIBLIOGRAPHIE

1. Duffus JH (2001). Risk Assessment Terminology. *Chem Intern*, **23** : 2.
2. EINECS : European Inventory of Existing Commercial Chemical Substances. echa.europa.eu/fr/information-on-chemicals/ec-inventory
3. ELINCS : European List of Notified Chemical Substances. echa.europa.eu/fr/information-on-chemicals/ec-inventory
4. ELINCS (2009). Baraibar Fentanes J, Olsson H, Sokull-Klüttgen B. European List of Notified Chemical Substances (ELINCS). EUR 23923 EN, 242 p.
5. IRSN (2009). Baromètre IRSN 2009. La perception des risques et de la sécurité par les Français. Rapport IRSN-DSDRE n° 16, 149 p.
6. IRSN (2015). Baromètre IRSN 2015. La perception des risques et de la sécurité par les Français. Résultat d'ensemble, 156 p.
7. Marchand M, Tissier C (2005). *Analyse du risque chimique en milieu marin. L'approche méthodologique européenne*. Ifremer, Plouzané, 126 p.

Le nombre de substances chimiques mises sur le marché connaît un accroissement constant avec des usages très divers (domestique, industriel, agricole...). Parmi ces substances, certaines présentent un caractère dangereux et un risque toxique potentiel important qu'il est indispensable d'identifier et d'évaluer afin de réduire leur impact sur les organismes vivants et l'environnement.

Cette deuxième édition de l'ouvrage *Les risques chimiques environnementaux* propose une synthèse **revue et augmentée** des connaissances actuelles sur les principaux polluants chimiques des différentes matrices environnementales (air, eaux, aliments), en intégrant les nombreuses avancées scientifiques. **Des progrès ont en effet été réalisés en matière d'évaluation et de prévention des risques, avec une sensibilité accrue des méthodes de détection des substances polluantes.** Ces nouvelles connaissances permettent de confirmer des risques chimiques existants, d'en faire émerger de nouveaux et révèlent un environnement toujours plus pollué.

L'ouvrage est articulé selon trois axes :

- **l'analyse des méthodologies utilisées** pour estimer les risques liés aux polluants environnementaux, selon les étapes de la démarche européenne (identification des dangers chimiques, évaluation de l'exposition aux dangers, caractérisations des dangers et des risques chimiques chez les êtres vivants). Les modes et mécanismes d'action de la toxicité des divers polluants sont également abordés ;
- l'étude d'**exemples concrets de pollutions chimiques** (hydrocarbures, phytosanitaires, nutriments, cadmium, zinc, mercure...) dans l'environnement et de leurs conséquences sur la faune et la flore mais également sur la santé humaine ;
- la présentation des **principaux outils d'évaluation du risque chimique** (tests de toxicité, outils de simulation, méthodes de modélisation...) et des applications qui en découlent (autorisations de mise sur le marché, méthodes et réseaux de surveillance de la qualité de l'environnement...).

Véritable ouvrage de référence convoquant de nombreuses disciplines telles que la toxicologie, la chimie, la biochimie, l'épidémiologie, la médecine clinique etc., *Les risques chimiques environnementaux* s'adresse aux ingénieurs, techniciens et industriels concernés par la prévention et l'évaluation des polluants environnementaux, aux responsables environnement des entreprises et collectivités ainsi qu'aux autorités sanitaires. Il intéressera également les enseignants et étudiants de troisième cycle préparant une formation aux sciences de l'environnement et à la gestion des risques.

Jean-Claude Amiard est directeur de recherche émérite au CNRS, Professeur associé au Québec et Professeur invité à l'université océanique de Chine. Il a enseigné également dans différentes universités françaises où il a procédé à l'encadrement de thèses. Reconnu par la communauté scientifique nationale et internationale, ses recherches sont centrées sur l'estimation de la biodisponibilité et le transfert des métaux et radionucléides dans les chaînes trophiques. Il est l'auteur de nombreuses publications et met également à profit ses qualités d'expertise auprès de diverses instances.