

T8 - COMPARAISON DES MÉTHODES D'ÉVALUATION DU RISQUE POUR LES ESPÈCES NON HUMAINES EXPOSÉES AUX RADIONUCLÉIDES ET AUX SUBSTANCES CHIMIQUES

Nicolas Pucheux INERIS

Marie Simon-Cornu IRSN – SEREN

Congrès de la SFRP, 15 juin 2023

INTRODUCTION : POINTS COMMUNS AUX ÉVALUATIONS DE RISQUES CHIMIQUE ET RADIOLOGIQUE

Évaluer le risque pour les espèces non humaines : contexte



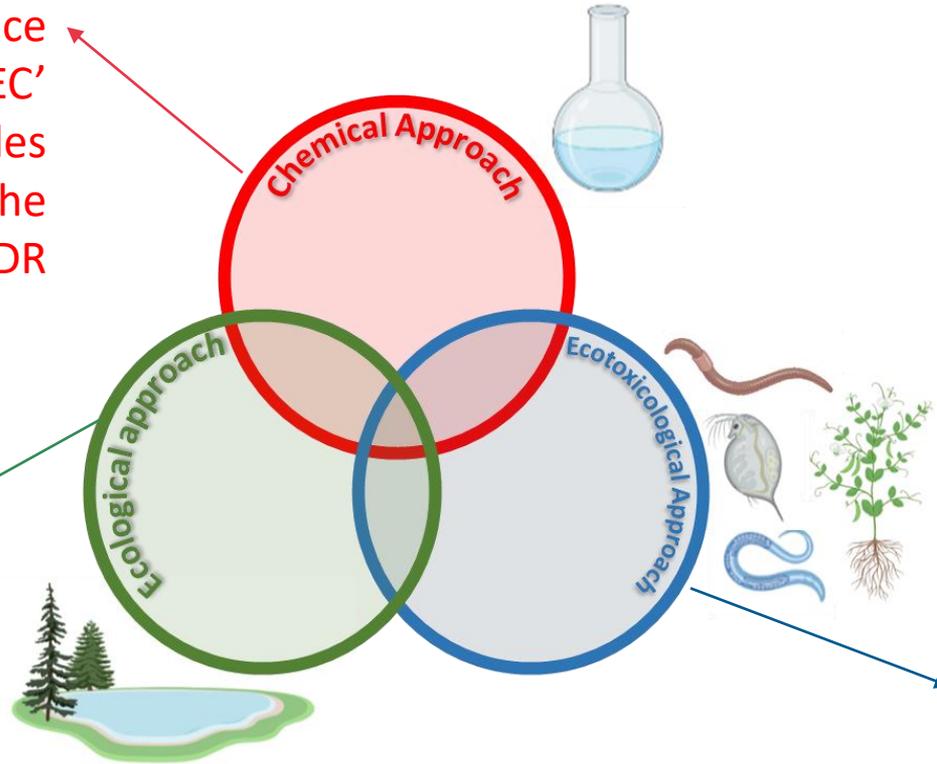
- Décision de réaliser une **évaluation environnementale** (le cas échéant, après examen « au cas par cas »)
- Élaboration d'une **étude d'impact** (incidence sur l'homme et sur l'environnement)
- Réalisation de **consultations** (autorité environnementale, collectivités territoriales et leurs groupements) et **enquête publique**
- Élaboration de la décision en prenant en compte les **avis émis lors des consultations** et les conclusions de l'enquête publique
- Information du **public** sur la décision prise

Évaluer le risque pour les espèces non humaines : les méthodes

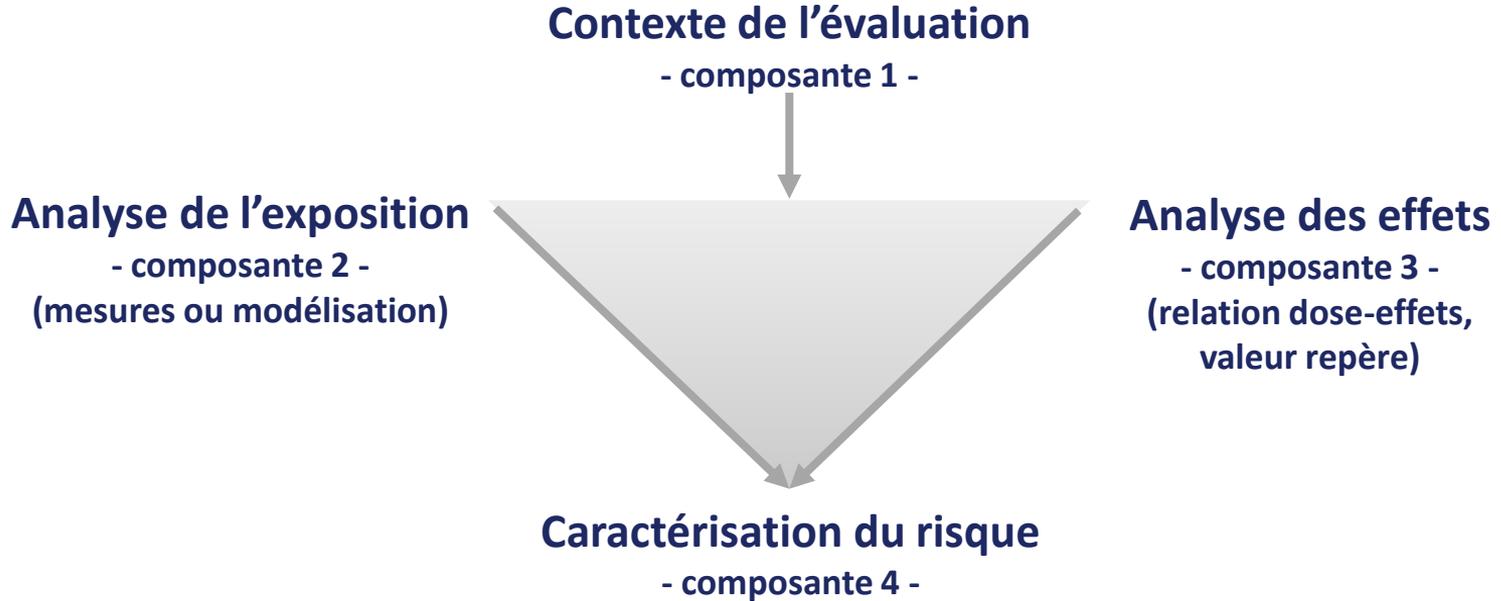
Approche 'substance chimique', ou 'PEC/PNEC' qui a inspiré pour les radionucléides l'approche débit de dose/PNEDR

Approche 'écologique' ou 'in vivo'

Approche 'écotoxicologique' ou 'matrice' (mésocosmes, bioessais effluents...)



Évaluer le risque pour les espèces non humaines : les 4 composantes



1^{ÈRE} PARTIE : RISQUE CHIMIQUE

Guide Ineris sur les substances Chimiques

[DOCUMENT D'ORIENTATION POUR L'ÉVALUATION DU RISQUE CHIMIQUE POUR LES ÉCOSYSTÈMES - IMPACT LOCAL DES ACTIVITÉS HUMAINES SUR LES MILIEUX NATURELS ET LA BIODIVERSITÉ.

■ Contexte du document :

Activités industrielles en cours ou futures (analyses rétrospectives ou prospectives)

Impacts sur les écosystèmes, sur la biodiversité.

■ A qui il s'adresse :

- Gestionnaires de site industriel en activité ou de tout site présentant potentiellement une problématique de pollution des milieux
- Bureaux d'études
- Ministère en charge de l'environnement (notamment Inspecteurs DREAL)

■ C'est un document non prescriptif.

Volonté de respecter le principe de proportionnalité, de rester accessible, et synthétique.

Il fait référence à d'autres documents pour les aspects techniques tels que les protocoles d'échantillonnages, les équations etc...

Guide Ineris sur les substances Chimiques

[DOCUMENT D'ORIENTATION POUR L'ÉVALUATION DU RISQUE CHIMIQUE POUR LES ÉCOSYSTÈMES - IMPACT LOCAL DES ACTIVITÉS HUMAINES SUR LES MILIEUX NATURELS ET LA BIODIVERSITÉ.

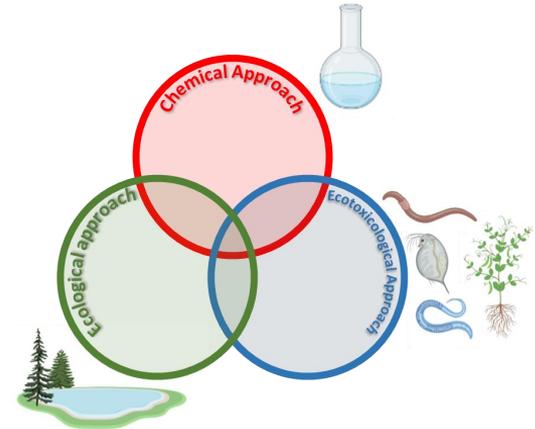
Contenu du document :

Document en 4 parties indépendantes.

Partie 1 : plan général d'une ERE, ce qu'elle doit contenir – conseils pour choisir les outils de l'évaluation.

Partie 2 à 4 : description des trois approches qu'il est possible de suivre pour évaluer les impacts que les écosystèmes subissent ou sont susceptibles de subir

- L'approche chimique
- L'approche écotoxicologique
- L'approche écologique.



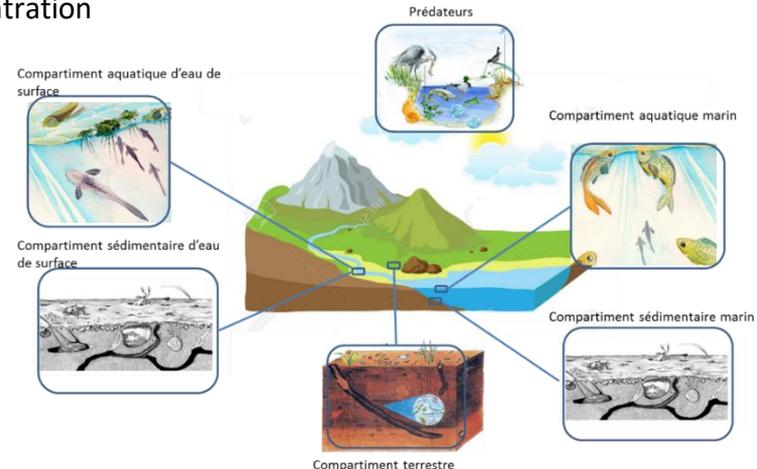
Evaluation du risque chimique pour les écosystèmes

PARTIE II: L'APPROCHE SUBSTANCE CHIMIQUE

Approche chimique

Substance par substance, comparaison concentrations mesurées et valeurs seuil.

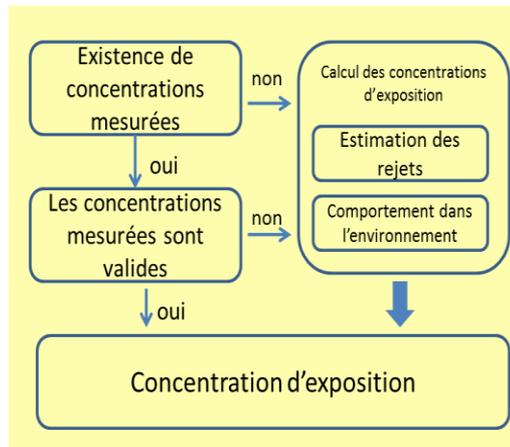
- Approche similaire à l'Évaluation des Risques Sanitaires.
- Considère les compartiments environnementaux exposés
- $IR = PEC/PNEC$ (concentration dans le milieu/concentration sans effet)
- Calcule le risque cumulé (effet cocktail), additivité.



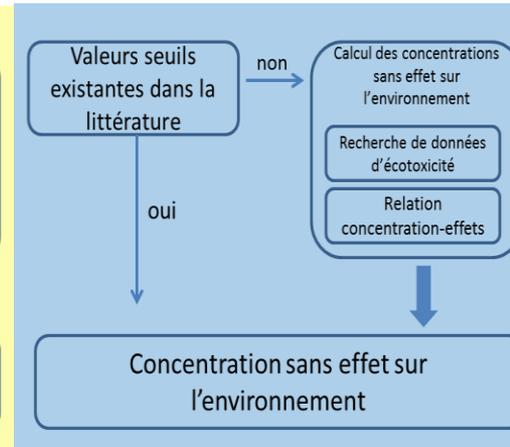
Evaluation du risque chimique pour les écosystèmes

PARTIE II: L'APPROCHE SUBSTANCE CHIMIQUE

La PEC/MEC (predicted/measured exposure concentration)



La PNEC (Predicted No Effect Concentration)



Caractérisation du risque : Indice de risque

Evaluation du risque chimique pour les écosystèmes

[PARTIE II: L'APPROCHE ÉCOTOXICOLOGIQUE

Approche
écotoxicologique

Etude des effets de la matrice eau/sol contaminée sur des populations d'organismes

- Observation des effets d'une matrice polluée sur le vivant.
- Description des stratégies de prélèvement
- Batterie de bioessais
- Essais court terme et long terme



ISO 17512-1 Evitement vers de terre
(*Eisenia fetida*)

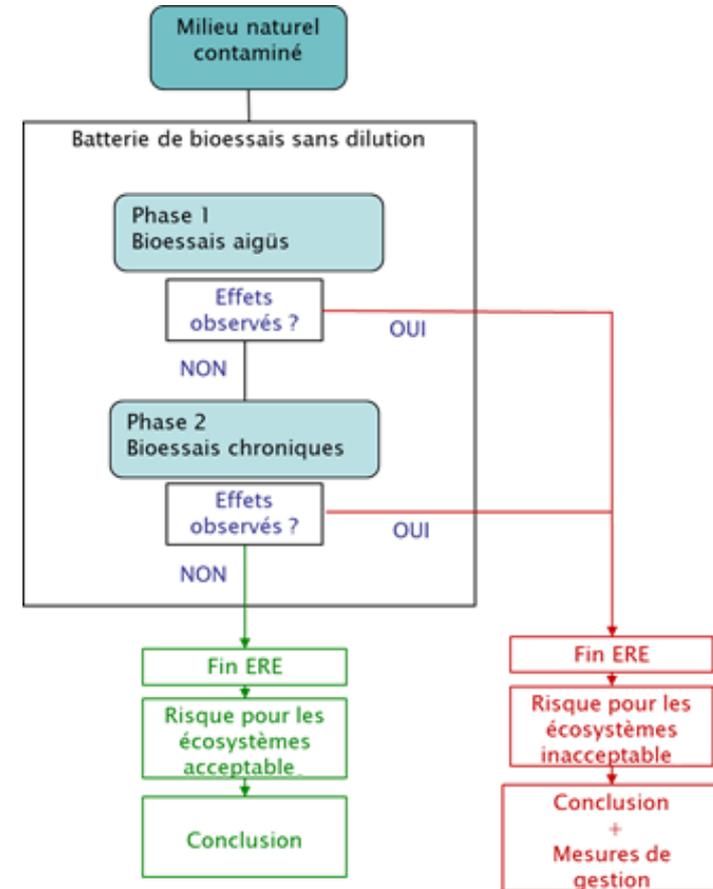


ISO 11269-2 Emergence et
croissance des végétaux supérieurs

Evaluation du risque chimique pour les écosystèmes

[PARTIE II: L'APPROCHE ÉCOTOXICOLOGIQUE

Exemple: Evaluation des risques dans l'eau selon l'approche écotoxicologique (sans dilution)



Evaluation du risque chimique pour les écosystèmes

[PARTIE III: L'APPROCHE ÉCOLOGIQUE

Approche
écologique

■ Etude in situ de l'état des écosystèmes

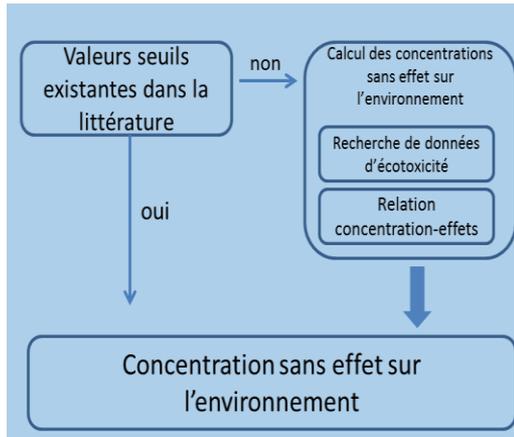
- Observer l'état des écosystèmes
- Préserver la biodiversité
- Outils biocénotiques (structure de la population)
- Outils biomarqueurs (physiologie de l'organisme)



Evaluation du risque chimique pour les écosystèmes

PARTIE II: L'APPROCHE SUBSTANCE CHIMIQUE

La PNEC (Predicted No Effect Concentration)



Pour l'évaluation des effets, certaines hypothèses doivent être posées:

- la sensibilité de l'écosystème dépend de l'espèce la plus sensible
- protéger la structure de l'écosystème revient à protéger ses fonctions

Déterminer une PNEC

[PRINCIPE DES BIOESSAIS

■ Détermination, dans des conditions de milieu et dans un environnement donnés de la toxicité d'un échantillon vis-à-vis d'organismes déterminés.

- Conditions de milieu conventionnelles,
- Conditions environnementales conventionnelles,
- Utilisation d'un réactif biologique correspondant à une population homogène de sensibilité définie,
- Régis par des normes reconnues

L'accent est mis sur la standardisation et la reproductibilité des mesures réalisées, de manière à obtenir une information fiable sur le phénomène de toxicité.

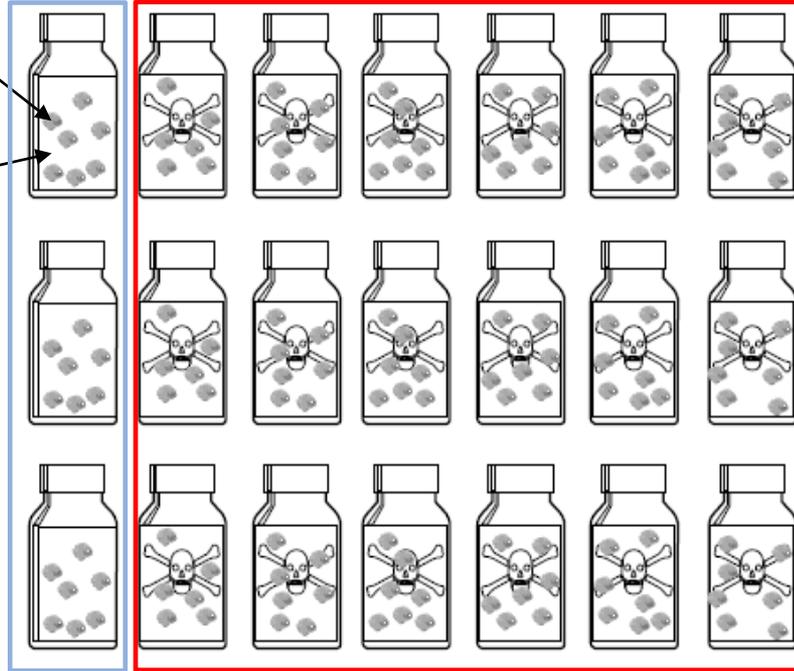
Déterminer une PNEC

[PRINCIPE DES BIOESSAIS

« Réactif » biologique

Milieu d'essai

Témoins



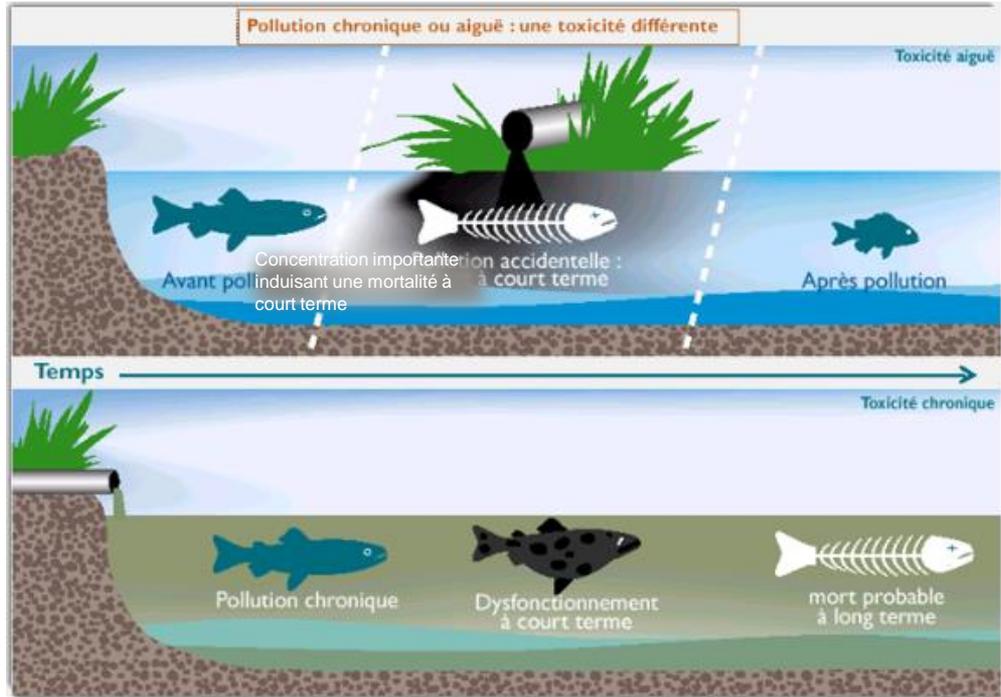
Substance à tester

Concentrations croissantes

Pourcentage d'effet par rapport au témoins

Principe d'un essai d'écotoxicité

[PRINCIPE DES BIOESSAIS



Essais sur les organismes aquatiques

Bactéries :

- Test microtox : *Vibrio fischeri*
- *Pseudomonas putidas*

Algues et végétaux :

- Algues unicellulaires : *Pseudokirchneriella subcapitata*
- Lentilles d'eau : *Lemna minor*

Microcrustacés :

- Daphnie : *Daphnia magna*
- Cériodaphnie : *Ceriodaphnia dubia*
- Rotifères: *Brachionus caliciflorus*

Poissons :

- Poisson zèbre : *Brachydanio rerio*
- Truite : *Onchorynchus mykiss*

Essais sur les organismes terrestres

Microorganismes du sol

Végétaux :

- avoine, orge , blé, maïs, ...
- radis, laitue, cresson, carottes, ...

Invertébrés et vertébrés :

- Vers de terre : *Eisenia fetida*, *Eisenia andrei*
- Cétoines : *Oxythyrea funesta*
- Collemboles: *Folsomia candida*
- Escargots
- Abeilles
- Oiseaux

Déterminer une PNEC

[ESSAIS SUR LES INVERTÉBRÉS

Essais de toxicité sur microcrustacés

- Daphnia magna*
- Daphnia pulex*
- Ceriodaphnia dubia*

} Essais de toxicité aiguë ou chronique (reproduction)



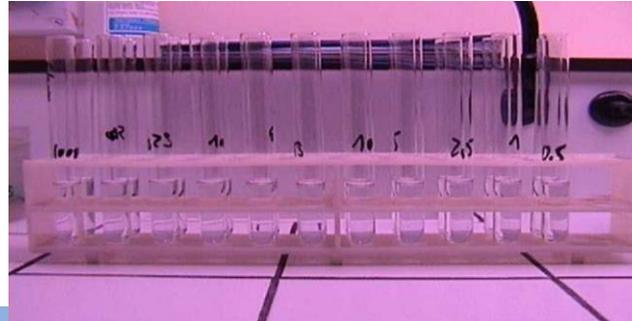
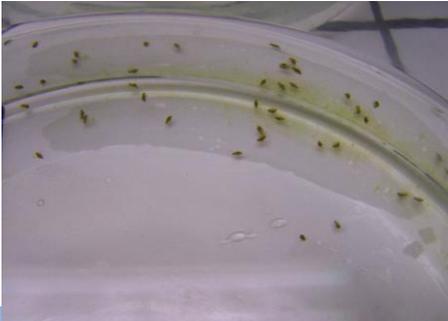
Daphnia Magna



Ceriodaphnia dubia

Déterminer une PNEC

[ESSAIS SUR LES INVERTÉBRÉS



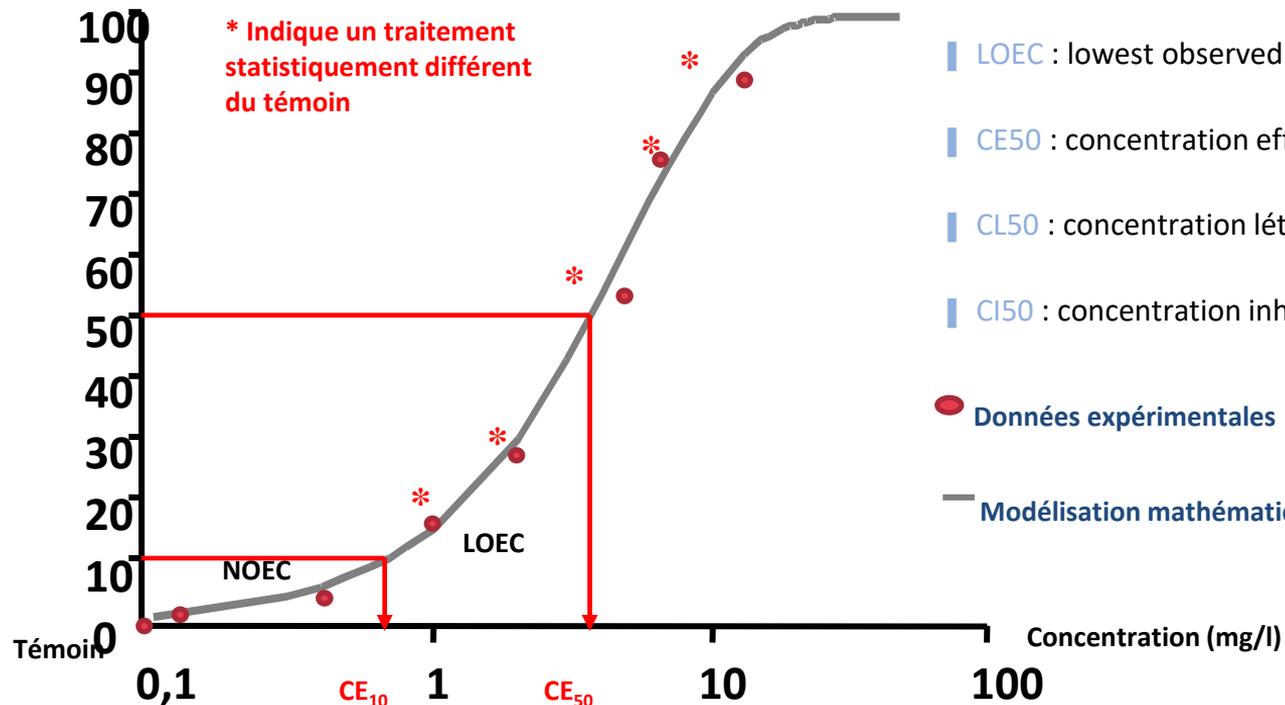
Essais de toxicité sur *Daphnia magna*

- >Essai aiguë : mortalité et inhibition de la mobilité
 - -nombre de daphnies immobiles par concentration après **24 ou 48 heures**
- >Essai chronique : inhibition de la reproduction
 - -mortalité
 - -nombre de pontes par daphnies **pendant 21 jours**

Déterminer une PNEC

[LA RELATION DOSE-RÉPONSE

Effet mesuré (%)



NOEC : no observed effect concentration

LOEC : lowest observed effect concentration

CE50 : concentration efficace médiane

CL50 : concentration létale médiane

CI50 : concentration inhibitrice médiane

● Données expérimentales

— Modélisation mathématique

Déterminer une PNEC

[MÉTHODE DES FACTEURS D'EXTRAPOLATION

Principe

- Déterminer une concentration prévisible sans effet pour les écosystèmes par application d'un facteur d'extrapolation aux données d'écotoxicité mono-spécifiques
- La valeur du facteur dépend du nombre et de la nature des données disponibles

Facteurs d'incertitude pris en compte pour la détermination des facteurs d'extrapolation :

- Variabilité de sensibilité intra et inter-espèces
- Extrapolation court terme / long terme
- Extrapolation laboratoire / terrain
- Extrapolation peu d'espèces / nombreuses espèces
- Incertitude due à l'expérimentateur

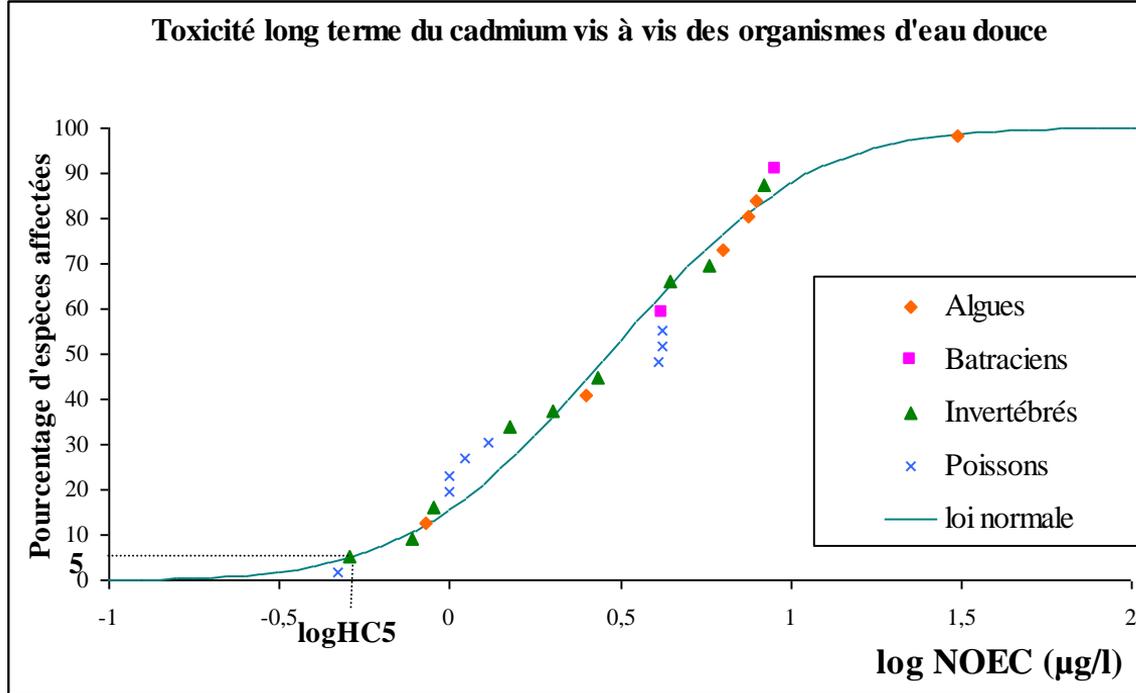
Déterminer une PNEC

[EXEMPLE DES FACTEURS D'EXTRAPOLATION POUR LES ORGANISMES AQUATIQUES

3 données de toxicité aiguë (CL50) (daphnie - poisson - algue)	1000
1 donnée toxicité chronique (NOEC) (poisson ou daphnie)	100
2 données toxicité chronique (NOEC) (poisson et/ou daphnie et/ou algue)	50
Donnée toxicité chronique (NOEC) sur au moins trois espèces représentant 3 niveaux trophiques	10
Données de terrains ou mésocosmes	Au cas par cas

Déterminer une PNEC

[MÉTHODE SSD, LA DISTRIBUTION STATISTIQUE DE LA SENSIBILITÉ DES ESPÈCES



• HC5 = 0,5 mg/L

• IC_{90%} : [0,27 ; 0,79]

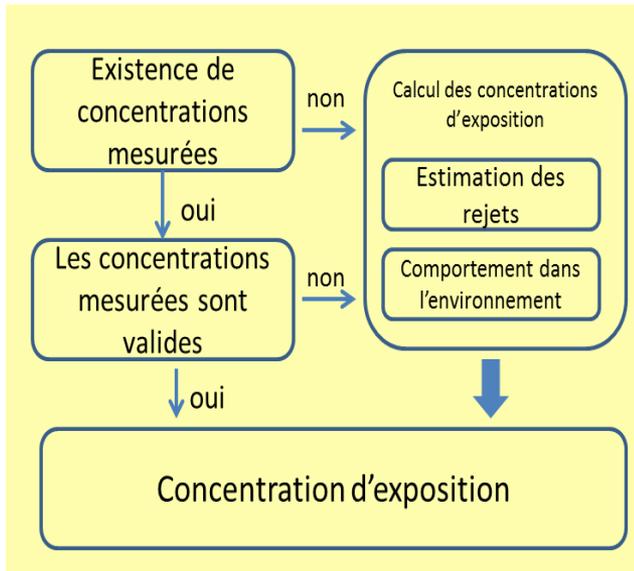
• PNEC = HC5/FE

• $1 \leq FE \leq 5$

Evaluation de l'exposition des écosystèmes

CONCENTRATION D'EXPOSITION DES ORGANISMES

■ Définir les niveaux d'exposition



Concentrations réelles mesurées dans l'environnement	Concentrations estimées à l'aide de modèles mathématiques	
	À partir de valeurs de rejets réels mesurées	À partir de scénarios d'émission génériques ou spécifiques à une utilisation donnée

Évaluation de l'exposition

[MODÉLISER LA DÉGRADATION (STEP EN LOCAL OU MILIEU NATUREL EN RÉGIONAL) (+CPT)

- | 111 Hydrolysis as a Function of pH
- | (313) Phototransformation on Soil Surfaces
- | (314) Phototransformation in Water
- | 301 Ready Biodegradability
 - A: DOC Die-Away Test
 - B: CO₂ Evolution Test
 - C: Modified MITI Test (I)
 - D: Closed Bottle Test
 - E: Modified OECD Screening Test
 - F: Manometric Respirometry Test
- | 302A/B/C Inherent Biodegradability:
- | 303 Simulation Test - Aerobic Sewage Treatment
- | 304A Inherent Biodegradability in Soil
- | 306 Biodegradability in Seawater
- | 307 Aerobic and Anaerobic Transformation in Soil
- | 308 Aerobic and Anaerobic Transformation in Aquatic Sediment Systems
- | 309 Aerobic Mineralisation in Surface Water

Comportement dans l'environnement et

Exposition: L'étude du devenir et du cycle des polluants dans les écosystèmes est un point fondamental dans l'évaluation des risques environnementaux.

- ✓ Classification et étiquetage (R53)
- ✓ Persistance
- ✓ Vitesses de dégradation (k, DT50)
- ✓ Produits de dégradation

Évaluation de l'exposition des écosystèmes

[EXEMPLE DU COMPARTIMENT EAU: PECLOCAL_{EAU} (3)

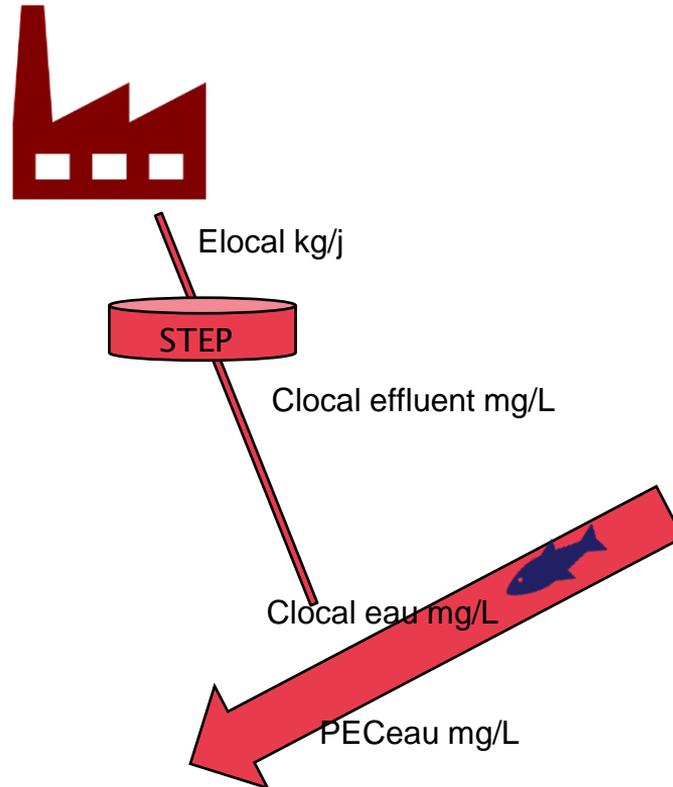
- Calculer la concentration au point de rejet d'après les données de surveillance des rejets traités (équation simplifiée)

$$C_{local_eau} = \frac{C_{local_effluent}}{Dilution}$$

- C_{local_eau} : Concentration dans les eaux de surface au point de rejet [mg.L⁻¹]
- $C_{local_effluent}$: Concentration dans l'effluent de sortie, concentration maximale ou 90^{eme} percentile en fonction des scenarios [mg.L⁻¹]
- Dilution : Facteur de dilution, valeur générique ou calculée d'après le débit du cours d'eau récepteur (QMNA5 par exemple) et celui du rejet de sortie.

Évaluation de l'exposition des écosystèmes

[EXEMPLE DU COMPARTIMENT EAU: $PEC_{LOCAL-EAU}$



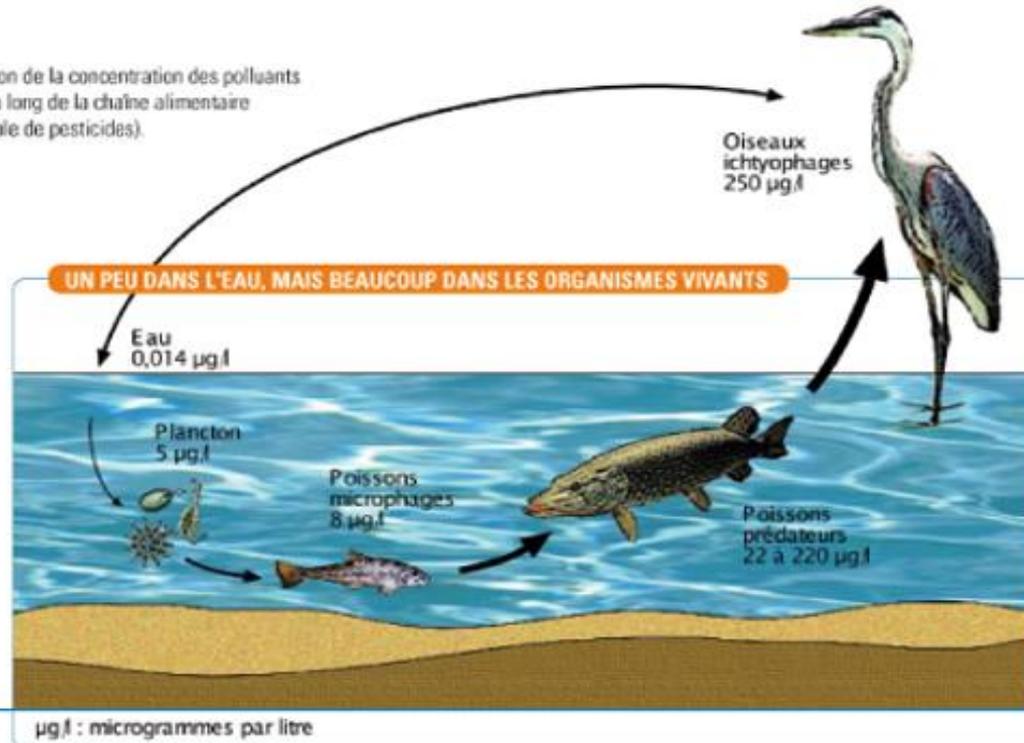
À la $C_{local \text{ eau}}$ il faut encore ajouter la concentration naturelle dans le milieu ou la contribution des autres sites en amont du point de rejet pour connaître la concentration à laquelle sont exposés les organismes du milieu aquatique.

Évaluation de l'exposition des écosystèmes

[EMPOISONNEMENT SECONDAIRE

de la **CONCENTRATION D'UN PESTICIDE DANS LA CHAÎNE ALIMENTAIRE**

> Evolution de la concentration des polluants tout au long de la chaîne alimentaire (exemple de pesticides).



- Bioconcentration
- Bioaccumulation
- Bioamplification

Evaluation du risque chimique pour les écosystèmes

[INDICE DE RISQUE, CALCUL ET INTERPRÉTATION

$$IR = PEC/PNEC$$

Organismes cibles	Milieux d'exposition	PNEC
Organismes aquatiques	Eaux de surface (PEC_{eau})	$PNEC_{\text{eau}}$
Organismes benthiques	Sédiments ($PEC_{\text{séd}}$)	$PNEC_{\text{sédiments}}$
Organismes terrestres	Sol agricole (PEC_{sol})	$PNEC_{\text{sol}}$
Prédateurs (consommateurs de poissons)	Poissons (PEC_{orale})	$PNEC_{\text{orale}}$
Prédateurs (consommateurs de vers)	Vers (PEC_{orale})	$PNEC_{\text{orale}}$
Micro-organismes	Station de traitement de eaux usées (PEC_{STEP})	$PNEC_{\text{micro-organismes}}$

Evaluation du risque chimique pour les écosystèmes

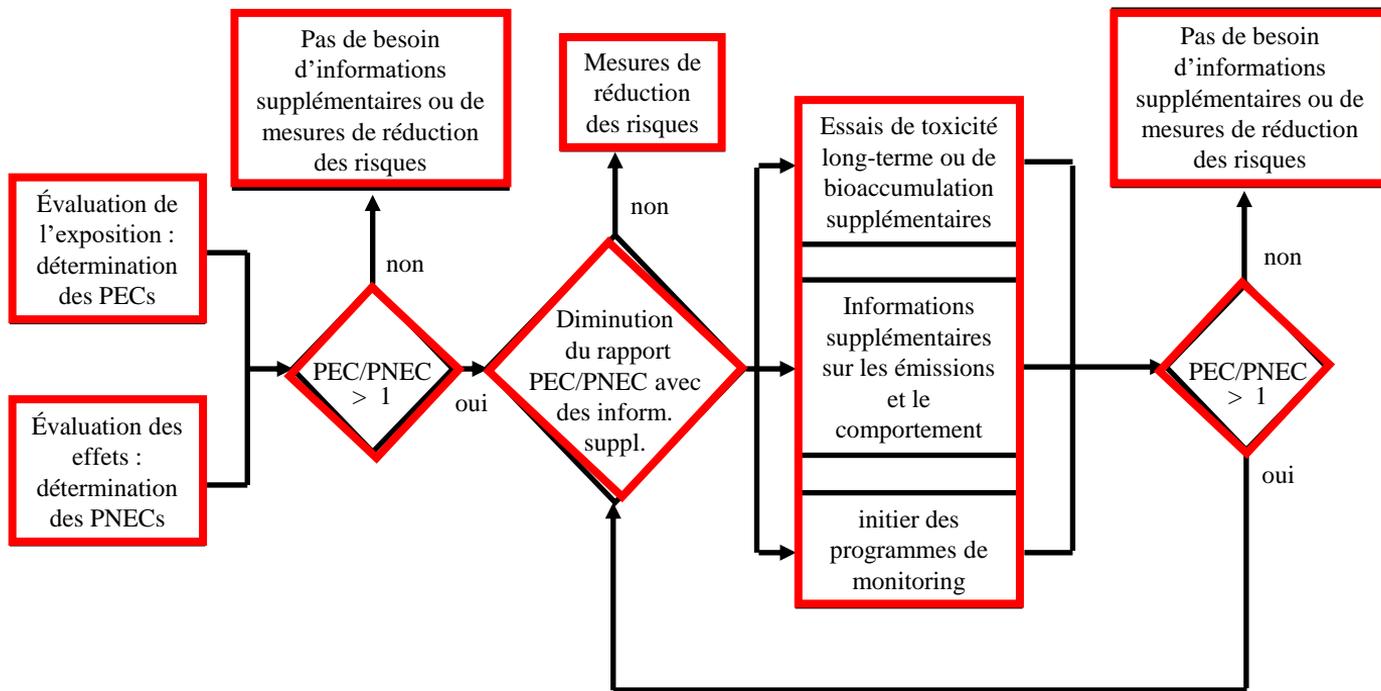
[INDICE DE RISQUE, CALCUL ET INTERPRÉTATION

- $IR \ll 1 \Rightarrow$ le risque pour les organismes du compartiment considéré est négligeable/contrôlé.
- $IR \gg 1 \Rightarrow$ la présence de la substance dans le milieu est susceptible de générer des impacts sur les populations d'organismes qui en sont dépendant – le risque ne peut pas être écarté.
- IR proche de 1 \Rightarrow Difficile de conclure, dépend beaucoup des éléments du scénario d'exposition.

■ Discussion des incertitudes

Evaluation du risque chimique pour les écosystèmes

[PROCESSUS ÉTAPE PAR ÉTAPE (APPROCHE PROPORTIONNELLE)



2^{ÈME} PARTIE : RISQUE RADIOLOGIQUE

Présentation du guide méthodologique radionucléides

- Guide issu du travail 2018-2020 d'un groupe pluraliste et pluridisciplinaire (le GPP Faune Flore), animé par l'IRSN, en réponse à une saisine ASN



Guide méthodologique pour l'évaluation du risque radiologique pour la faune et la flore sauvages

Concepts, éléments de base et mise en œuvre au sein de l'étude d'impact

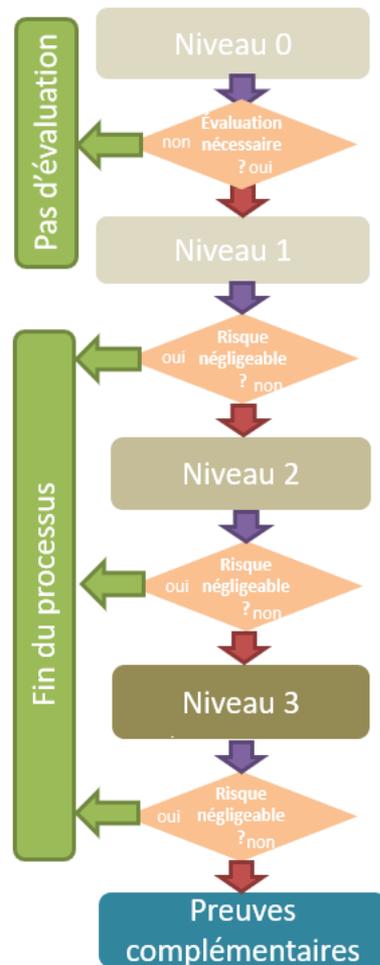
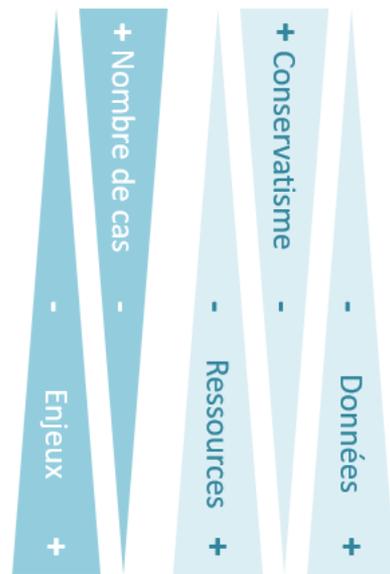


© IRSN - crédits J.M. Bonzom

- Avis du GPRADE en juillet 2021, finalisation du guide en décembre 2021 et parution sur les sites web ASN + IRSN en janvier 2022

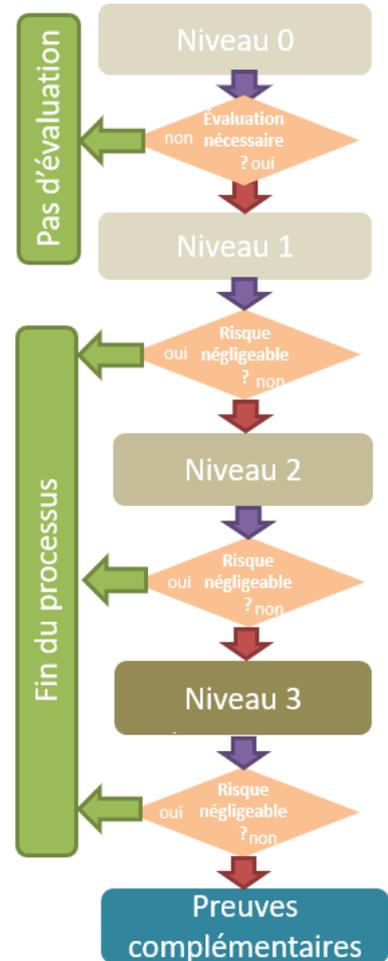
Une approche graduée

- Niveau 0 = analyse préalable, qui interroge la nécessité de la mise en œuvre d'une évaluation du risque
- Une évaluation prospective (e.g. dossier de démantèlement) ne peut pas relever d'un niveau 0, évaluation quantitative attendue
- Si évaluation du risque nécessaire, 3 niveaux de complexité croissante
- Conclusions de l'évaluation peuvent être éclairées par preuves complémentaires, e.g. surveillance écologique
- Si risque ne peut être écarté, action ERC (éviter, réduire, compenser) à engager, hors champ d'application du guide

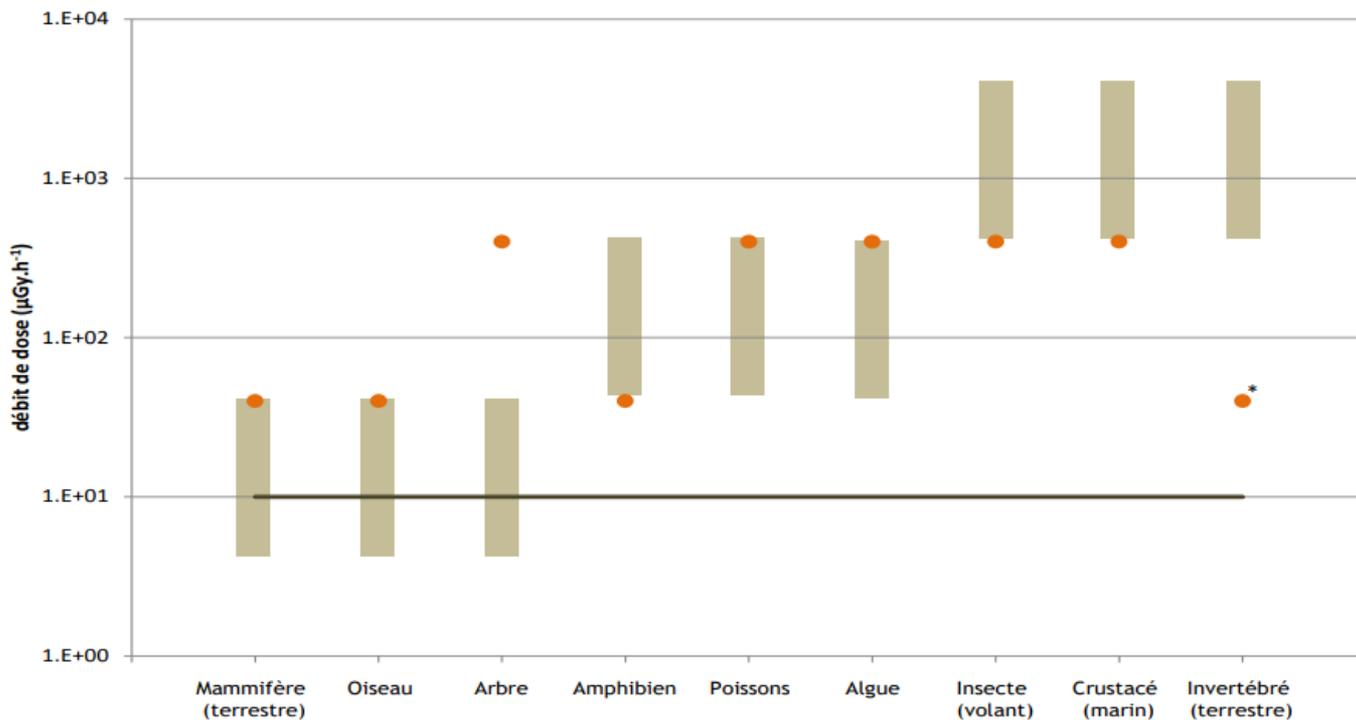


Principe d'écart à la référence (notion de valeur repère)

- Si exposition faune flore < valeur repère, risque considéré comme négligeable
- Niveau 1** vise à majorer l'évaluation de risque e.g.:
 - en ne retenant que les expositions maximales
 - en utilisant des valeurs repères prédéterminées (EMCL d'ERICA) sur des hypothèses très conservatives, et exprimées en Bq/L ou Bq/kg
- Niveau 2** : exposition et valeur repère (e.g. 10 μ Gy/h d'ERICA) sont exprimées en débit de dose, calcul plus complet et moins conservatif



Principe d'écart à la référence (notion de valeur repère)



* : interprétation des recommandations de l'AIEA (invertébré terrestre classé comme animal terrestre)

Figure 21 : valeurs repères proposées au niveau 2 par diverses institutions pour les organismes de référence (ligne pleine : $10 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ projet ERICA ; point orange : AIEA-UNSCEAR, barre verticale : DCRL de la CIPR)

Organismes de référence ou représentatifs

Niveau 1

Niveau 2

Niveau 3

Organisme de Référence
Un fantôme numérique
représentant un groupe large
d'organismes (ex. : amphibiens)

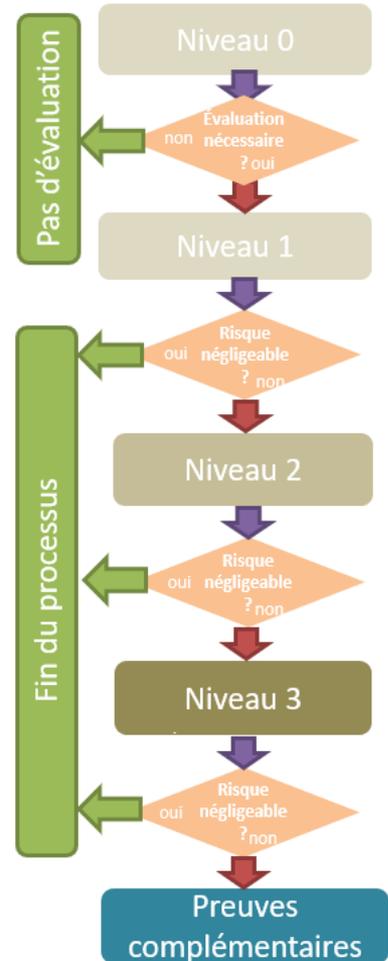
**Organisme représentatif
ou réel**
Un organisme typique
représentatif du site étudié
(ex. : grenouille)

Ecosystème terrestre	Ecosystème aux douces	Ecosystème marin
Lichen/bryophyte	Phytoplancton	Phytoplancton
Herbacées (herbe CIPR)	Plante vasculaire	Algue (algue CIPR)
Buisson (herbe CIPR)	Zooplancton	Plante vasculaire
Arbre (pin CIPR)	Mollusque - gastéropode	Zooplancton
Annélide (ver de terre CIPR)	Mollusque - bivalve	Ver polychète
Arthropode - détritivore	Crustacé	Mollusque bivalve
Insecte volant (abeille CIPR)	Larve d'insecte	Crustacé
Mollusque - gastéropode	Poisson benthique	Larve d'insecte
Mammifère - petit - en terrier (rat CIPR)	Poisson pélagique (truite CIPR)	Poisson benthique (poisson plat CIPR)
Mammifère - grand (cerf CIPR)	Amphibien (grenouille CIPR)	Poisson pélagique
Oiseau (canard CIPR)	Oiseau (canard CIPR)	Oiseau (canard CIPR)
Reptile	Mammifère	Mammifère
Amphibien (grenouille CIPR)	Reptile	Reptile
		Anémone / corail

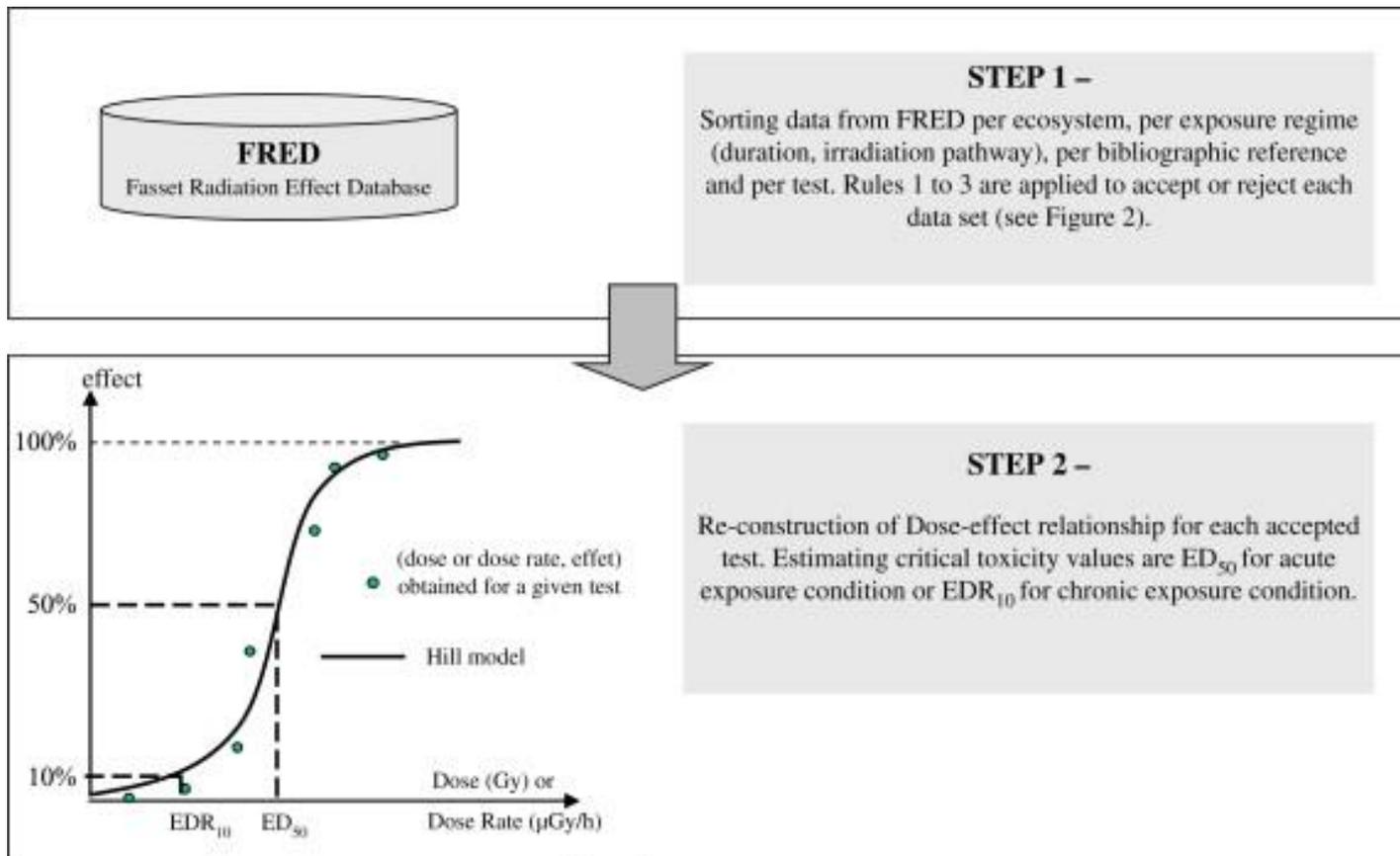


Principe d'écart à la référence (notion de valeur repère)

- Si exposition faune flore < valeur repère, risque considéré comme négligeable
- Niveau 1** vise à majorer l'évaluation de risque e.g.:
 - en ne retenant que les expositions maximales
 - en utilisant des valeurs repères prédéterminées (EMCL d'ERICA) sur des hypothèses très conservatives, et exprimées en Bq/L ou Bq/kg
- Niveau 2** : exposition et valeur repère (e.g. 10 μ Gy/h d'ERICA) sont exprimées en débit de dose, calcul plus complet et moins conservatif
- Niveau 3** : pas de valeur repère prédéterminée et étude encore plus détaillée
- 4^e niveau**, valeurs repères utilisées en incrément du fond ambiant. Utilisation immédiate si exposition est calculée à partir des rejets (approche prospective). Si approche rétrospective utilisant mesures dans les milieux, bruit de fond peut en être soustrait
- Preuves complémentaires : approches naturalistes (approche écologique)



Détermination des valeurs repères (EDR 10)



Détermination des valeurs repères (EDR 10->HDR5->PNEDR)

$R^2 = 0.9513$

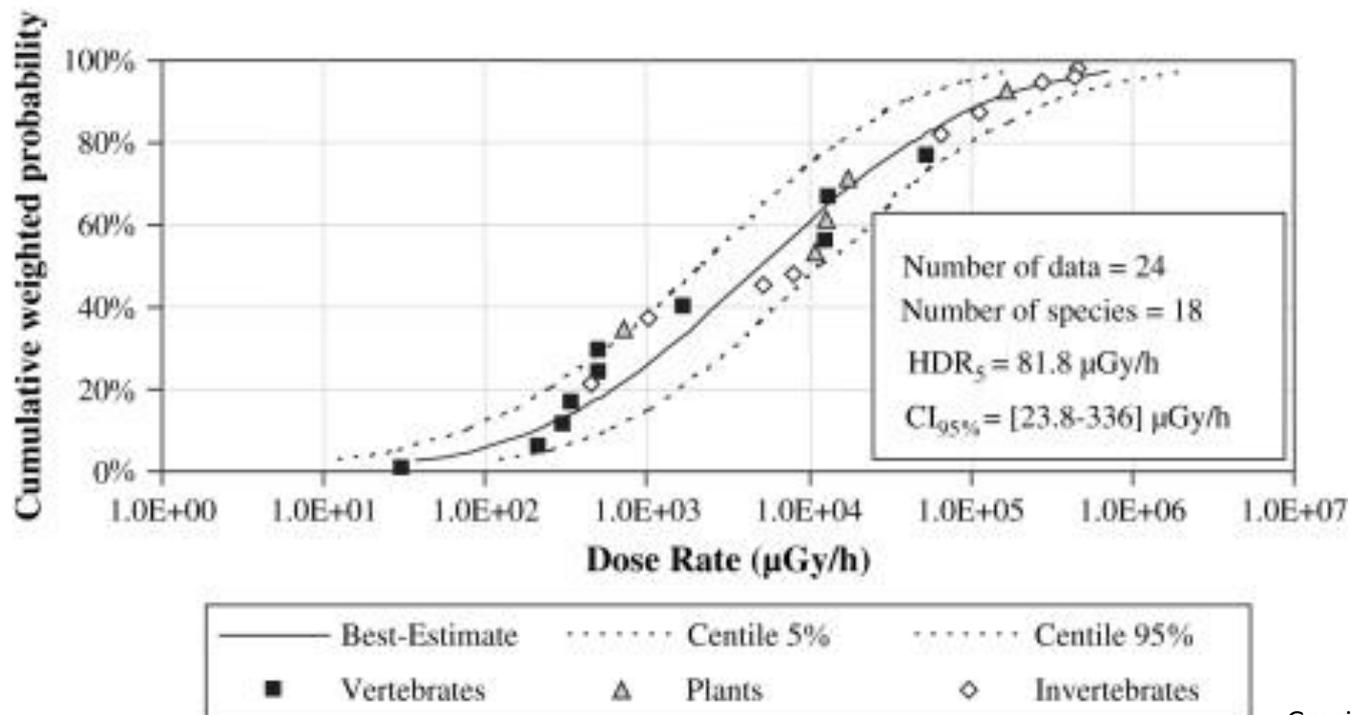
KSpvalue = 0.500

Log Normal – Generic Ecosystem (SW+FW+TER)

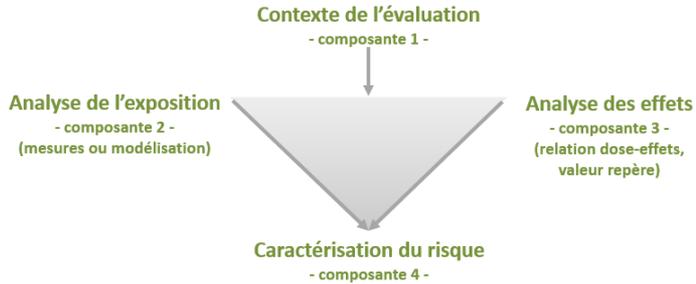
Sp = weighted; TW: none

wm.lg = 3.71

wsd.lg = 1.09

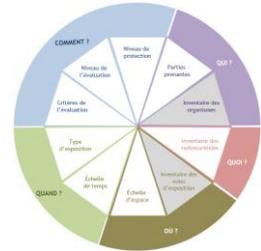


Évaluation de l'exposition et du risque

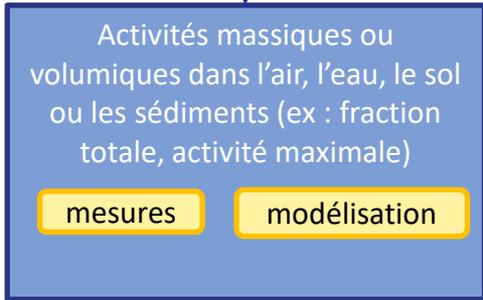


Composante 3

Composante 1



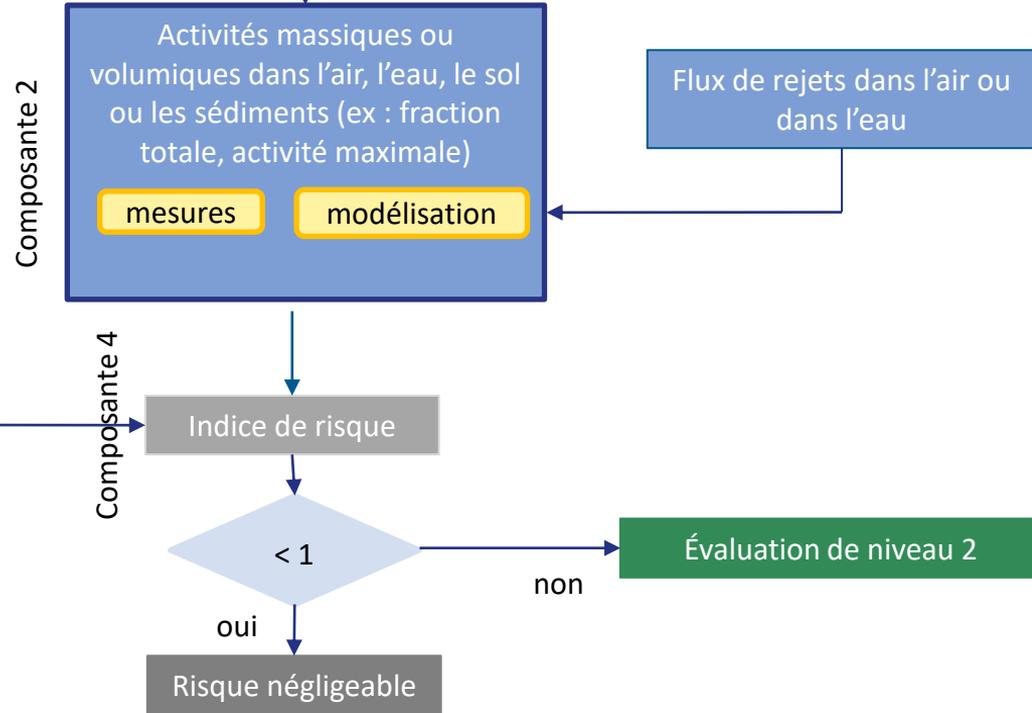
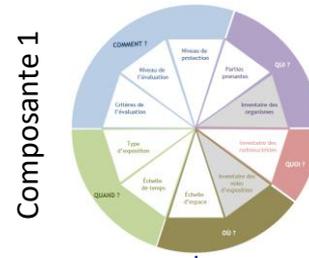
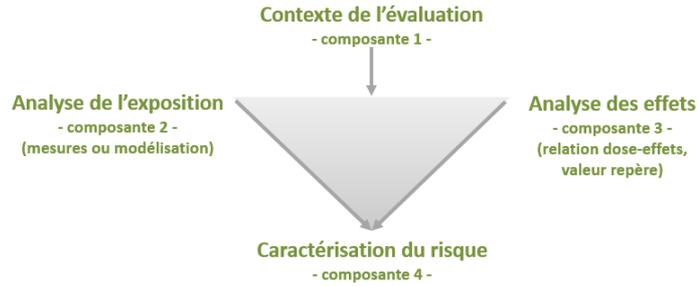
Composante 2



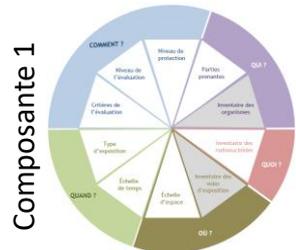
Composante 4



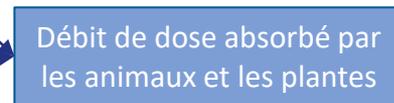
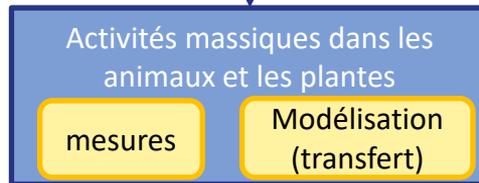
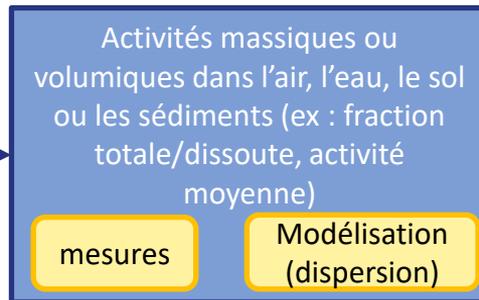
Niveau 1



Niveau 2



Composante 2

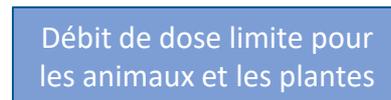


Analyse de l'exposition
- composante 2 -
(mesures ou modélisation)

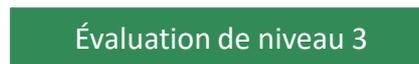


Analyse des effets
- composante 3 -
(relation dose-effets, valeur repère)

Composante 3



Composante 4



non

< 1

oui

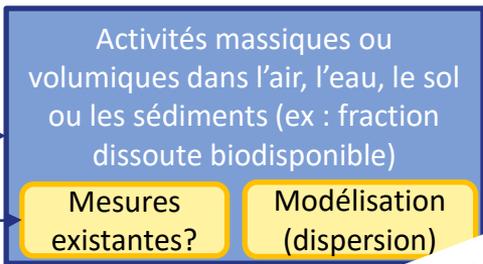
Risque négligeable

Niveau 3

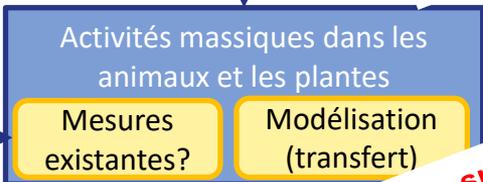
Composante 1



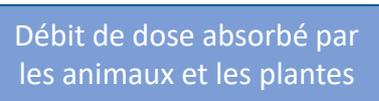
Composante 2



Site spécifique



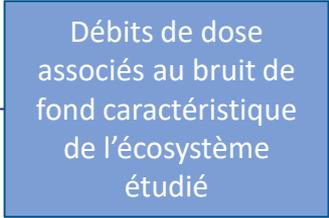
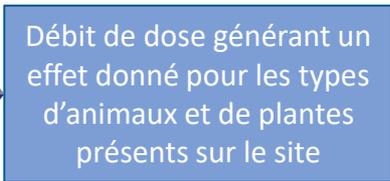
Site spécifique



Campagnes dédiées

acquisition

Composante 3



non

oui

Preuves complémentaires ou réduction de l'impact (actions proportionnées)

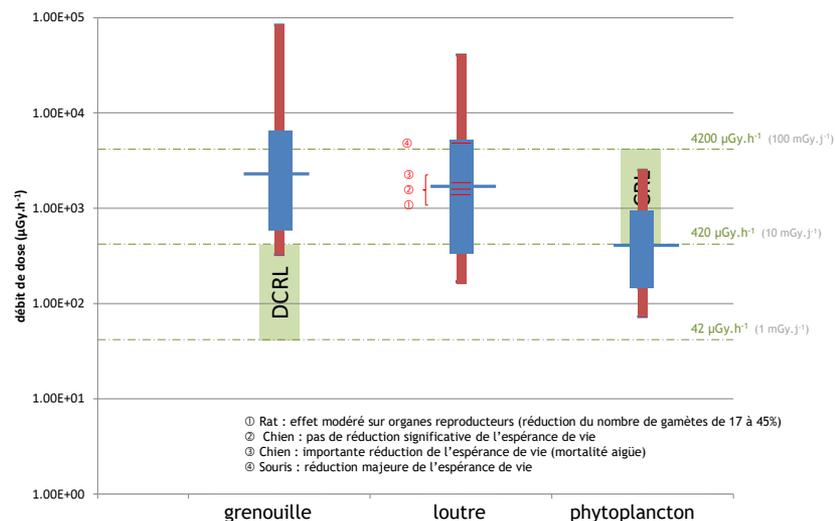
Risque négligeable

Incertitudes (chapitre 5 du guide)

- Incertitudes = ce qu'on ne sait pas (encore) faire, limites
 - Principes méthodologiques applicables à un large panel de situations, mais champ d'application limitée par état actuel des connaissances (développement de modèles et d'outils opérationnels, valeurs de paramètres etc.)
 - évaluations opérationnelles sur expositions chroniques d'animaux et de plantes
 - visant à s'assurer du maintien démographique des populations
 - Promotion d'une approche "écosystème", plus adaptée aux objectifs de protection visés (biodiversité) : études *in situ*, micro- et mésocosmes
- Incertitudes sur ce qu'on sait faire → les identifier, décrire, si possible quantifier et communiquer
 - Incertitudes sur les données d'entrée, les modèles et paramètres de transfert, les scénarios d'exposition, les coefficients de dose, le choix de la valeur repère, la prise en compte de preuves complémentaires (surveillance écologique)
 - Choix conservatifs aux niveaux 1 (++) et 2 (+) à expliciter de manière transparente ; approche probabiliste pour les incertitudes quantifiées (paramétriques) + lister les autres sources d'incertitude au niveau 3

Autres ressources

- Chapitre 6 : illustration de la méthode sur un cas fictif (rejets RN liquide+atmo)
- Glossaire, liste de sigles et acronymes
- Références bibliographiques (6 pages)
- Annexes :
 - dispositions législatives et réglementaires
 - évaluation des risques chimiques
 - schéma conceptuel
 - méthode de détermination des valeurs repères
 - outils et bases de données
 - ...



Bilan

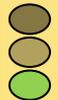
- Au sein du GPP, des discussions très nourries et constructives, une participation continue et active, une réflexion et une écriture partagées
- Un guide consensuel, que les membres du GPP se sont bien approprié
- Des difficultés persistantes d'application ?
- Des perspectives à court, moyen, et long termes :
 - Au niveau du GPP : révision sur la base d'un REX dans quelques années ?
 - En interne IRSN : stage sur débits de dose bruit de fond en France ; travaux en cours pour se détacher de la seule approche « substance » et aller vers approche « écologique » ; réflexions sur les services écosystémiques

3^{ÈME} PARTIE : FOCUS SUR L'URANIUM

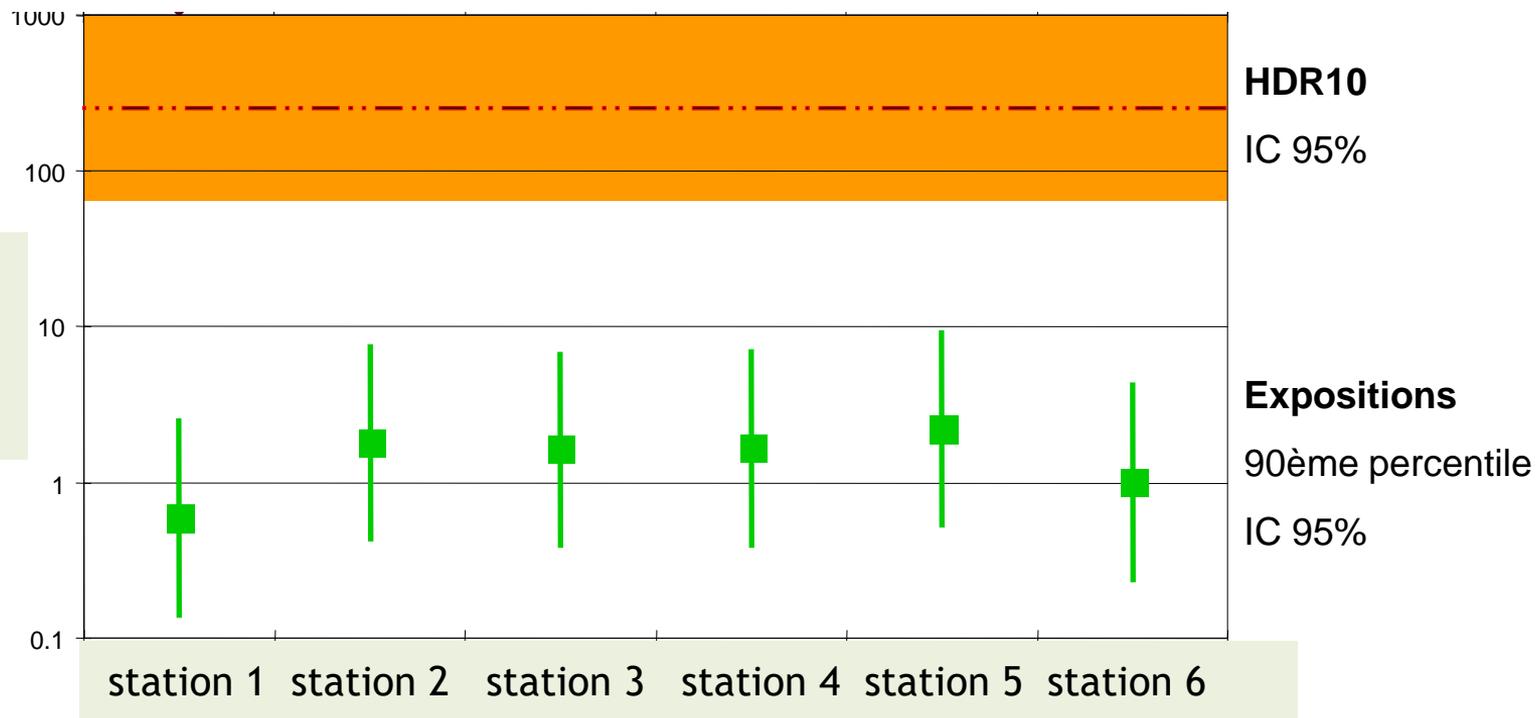
Exemple du GEP Mines

- **Groupe pluraliste** impliquant experts de diverses disciplines et origines, institutionnels français et étrangers, exploitant, autorités locales, monde associatif
- **Objectif** : analyse critique de la conformité de cette remise en état aux objectifs de protection de l'environnement, avec une volonté d'information du public
- **Écosystèmes** : eaux de surface continentales (rivière Ritord)
- **Organismes** : organismes de référence associés aux eaux douces
- **Rejets** liquides issus des installations minières : 238U, 2226Ra et descendants (chaînes de filiation prises à l'équilibre) arrêtés préfectoraux imposant des limites de rejet pour le 226Ra et l'238U en activité volumique moyenne annuelle
- **Analyse rétrospective** (1993-2006), mesures issues de la surveillance exercée par l'exploitant sur eau et sédiments et modélisation (données manquantes pour l'un des compartiments, descendants)
- Exposition interne (transfert à partir de l'eau) et externe (eau et sédiment) dans le Ritord

Exemple du GEP Mines

	 		
	NOEC (3.2 µg/L)	PNEDR (10 µGy/h)	 > 3.2 µg/L (**) > 10 µGy/h (*)
	Ingestion (2.5 mg/kg/d) Inhalation (3 10 ⁻⁴ mg/m ³)	radon reference levels (100 Bq/m ³) added effective dose (1 mSv/y)	 < 200 µSv

Exemple du GEP Mines : niveau 3 sur le risque radiologique

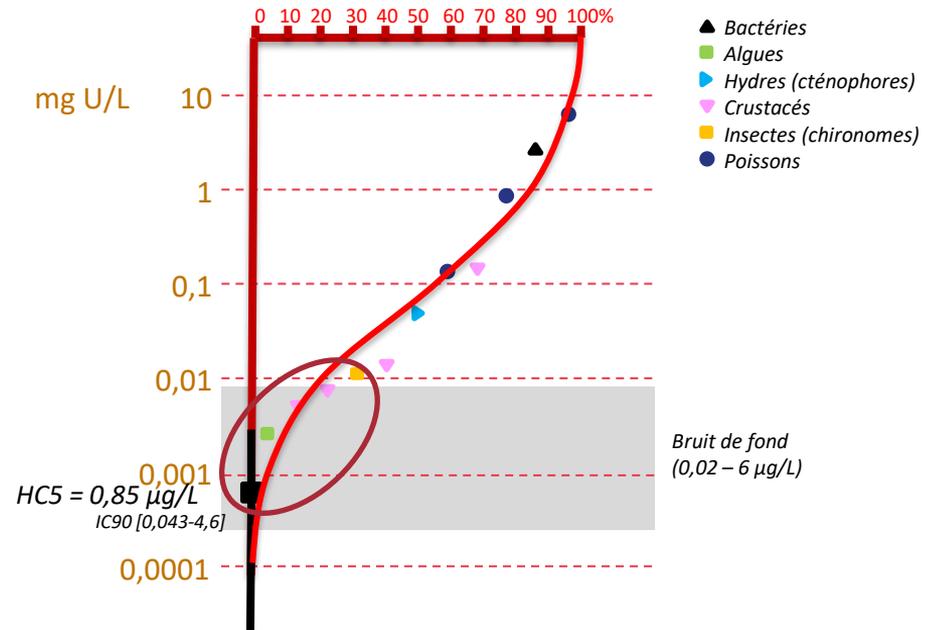


Ecotoxicité chronique de l'U pour les espèces d'eau douce

[CONNAISSANCES ESSENTIELLEMENT SUR TROIS TAXONS (ALGUES, CRUSTACÉS ET POISSONS)

- Environ **50 données d'écotoxicité chronique** (RIVM, 2014)
Quelques rares données sur amphibiens, mollusques et cnidaires
- **Sensibilité des organismes vivants très variable** à l'U, de l'ordre du $\mu\text{g/L}$ à plusieurs dizaines de mg/L selon les organismes aquatiques considérés
- Fortes variabilités **même pour une même espèce** (ex. poissons f(dureté), présence de COD) = changement de **biodisponibilité**
- Permet de sélectionner des **valeurs critiques conservatives** (NOECs, HC5)

Distribution de sensibilité des espèces (RIVM, 2014)
écotoxicité chronique (EC10, NOEC), COD < 2mg/L



Forte variabilité des valeurs seuils déterminées en Europe

[DIFFÉRENTS CHOIX MÉTHODOLOGIQUES ET INCERTITUDES DE CONNAISSANCE SUR L'ÉCOTOXICITÉ DE L'U POUR CERTAINS COMPARTIMENTS

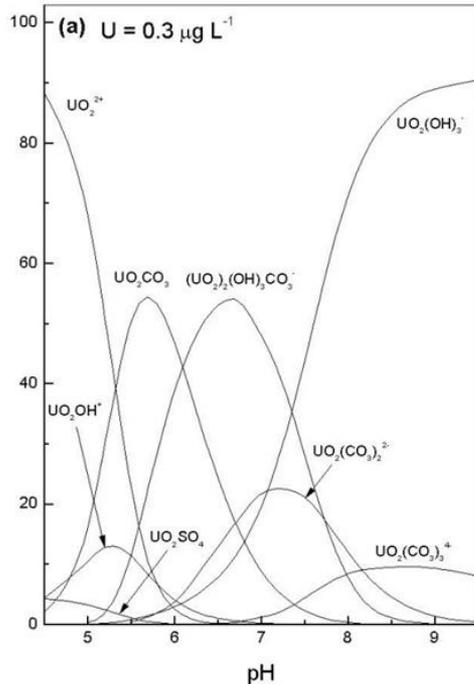
Pays	Compartment cible	Donnée d'(éco)toxicité critique retenue	Fact. sécurité	Valeurs seuils U (µg/L)
Suède (2014)	eaux douces	0,7 µg/L (EC10 <i>Chlorella</i> – Charles et al., 2002)	10	0,07
Pays Bas (2014)	eaux douces	0,85 µg/L (HC5, SSD)	5	0,17
France (VGE Ineris, 2010)	eaux douces	3,2 µg/L (NOEC <i>Ceriodaphnia</i> – Pickett et al., 1993)	10	0,3
Belgique (2010)	eaux douces	10 µg/L (NOEC <i>Moinodaphnia</i> – Hyne et al., 1993)	10	1



Vorkamp et Sanderson (2016)
<http://dce2.au.dk/pub/SR198.pdf>

Prise en compte de la biodisponibilité

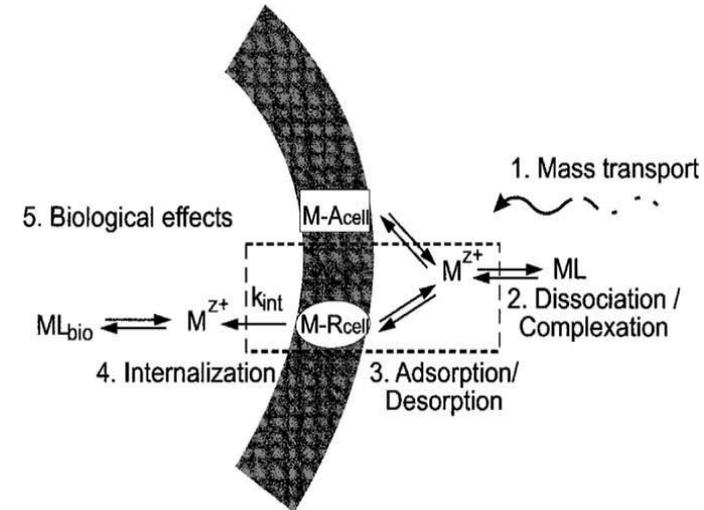
[RECOMMANDÉ POUR LES MÉTAUX DANS LE CADRE DE LA DCE (CF. INERIS, 2012)



■ **Spéciation chimique complexe** de l'U : rôle du pH et de nombreux ligands (en rivière > 90 % de l'U associé à des complexes dissous (inorganiques ou organiques) et à la fraction colloïdale (colloïdes de fer, matière organique naturelle))

■ **Ecotoxicité de l'U variable selon les conditions physico-chimiques** des eaux (pH, cations compétiteurs (Ca, Mg), complexation par la matière organique naturelle)

■ **Espèce chimique 'libre' classiquement considérée comme indicatrice de la biodisponibilité** pour les organismes aquatiques (modèle de l'activité de l'ion libre) : ion uranyle **UO_2^{2+}**

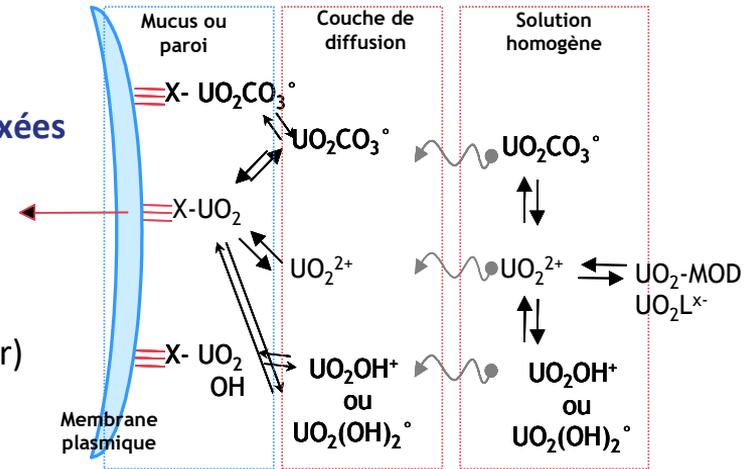
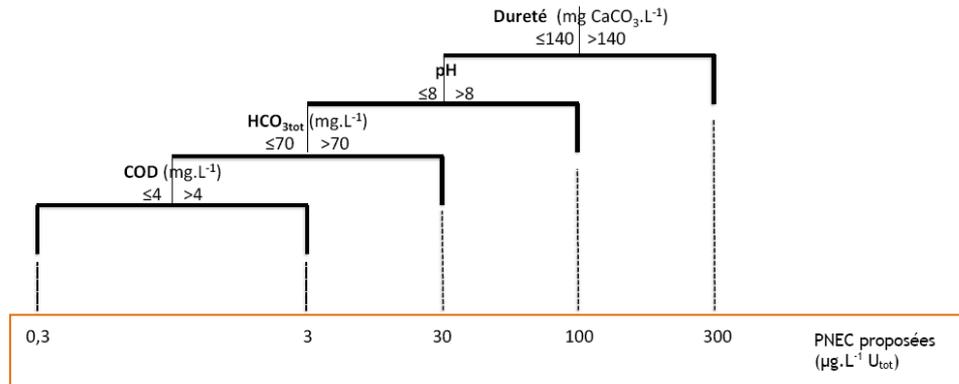


Hassler et al. (2009) DOI: (10.1897/03-149)

Biodisponibilité et spéciation chimique de l'U

DES LIENS COMPLEXES

- Les données publiées remettant en question le postulat du modèle d'activité des ions libres
= **fortes présomption de biodisponibilité de formes complexées** (hydroxylées, carbonatées)
- La considération des espèces biodisponibles a permis de déterminer des **domaines physico-chimiques délimitant des classes de PNEC conditionnelles** (à consolider)



IRSN (2014)
domaine d'application (BDD FOREGS)

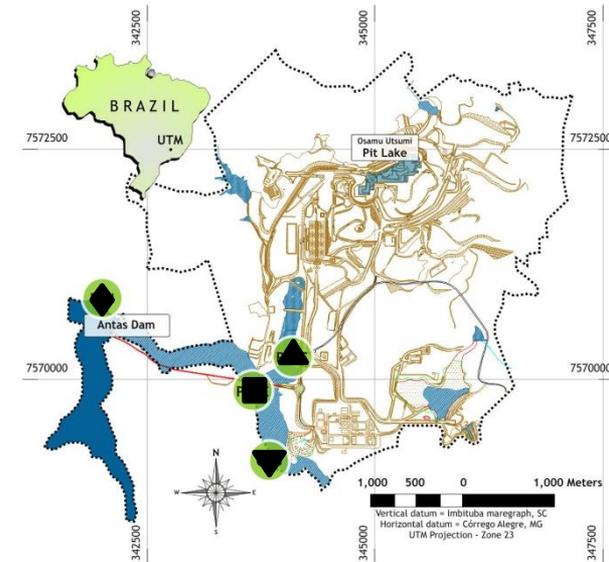
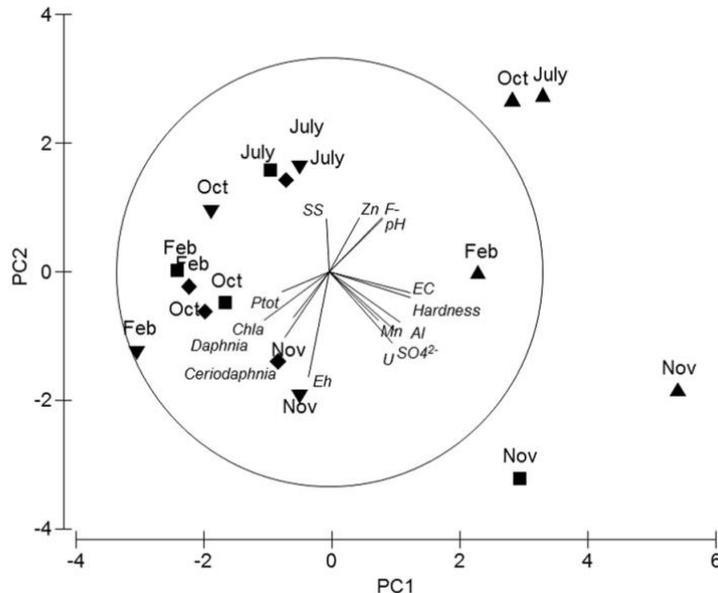
- $6,4 \leq \text{pH} \leq 8,8$
- $8,8 \leq \text{HCO}_3^{\text{tot}} \leq 420,6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$
- $11,4 \leq \text{Dureté} \leq 1090,6 \text{ mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$
- $0,3 \leq \text{COD} \leq 23,4 \text{ mg C}\cdot\text{L}^{-1}$

Approche « matrice »

[BASSIN DE L'ANTAS (UTM, MINAS GERAIS, BRÉSIL)

■ **Analyses chimiques et tests écotoxicologiques** (bioessais aigus, *Ceriodaphnia silvestrii* et *Daphnia magna*)

■ **Dépassement des valeurs limites** (approche chimique) pour l'U et d'autres contaminants (F, SO₄, Mn, Al)



Ferrari et al (2017), Sci Reports DOI:10.1038/s41598-017-14100-w

■ **Corrélation entre l'écotoxicité et l'uranium, mais aussi les métaux (Mn, Al, F), conductivité, pH**

→ utilité pour évaluer les zones critiques au sein des écosystèmes aquatiques potentiellement impactés

→ La dureté de l'eau réduit potentiellement la **biodisponibilité** de l'U et des autres métaux

Conclusion

[L'ÉCOTOXICITÉ DE L'URANIUM...

- | Dominance de la **toxicité chimique** (métal trace)
ne pas oublier la contribution des descendants/isotopes particulières
- | Connaissances principales sur l'écotoxicité en **eau douce**
(peu par exposition aux sédiments ou par voie trophique)
- | **Biodisponibilité** très influencée par la **spéciation chimique** de l'U
Données convergentes sur les espèces chimiques à considérer, **connaissances encore partielles** : manque de données chroniques, peu de réalisme dans les calculs de spéciation (colloïdes, matière organique...)
- | **Détermination d'une NQE** à l'étude dans le cadre de la DCE
Nécessite un consensus sur les **données d'écotoxicité critiques à considérer**
et sur les **choix méthodologiques** (cible de protection critique, traitement statistique, facteur de sécurité)
- | **Contamination multiple** (la norme plutôt que l'exception ; ex. mines)
méthodologies pour l'**évaluation du risque cumulé** (*a priori*), **pas d'interactions pharmacodynamiques fortes** (synergie/antagonisme), mais l'attribution univoque des effets écologiques à l'U reste complexe
- | Complémentarité des approches « **écotoxicologique** » et « **écologique** » avec l'approche « **substance** »



CONCLUSION : DIFFERENCES ENTRE ÉVALUATIONS DE RISQUES CHIMIQUE ET RADIOLOGIQUE

Différences entre les deux méthodes

■ Risque radiologique

- Cible : espèces animales et végétales
- Additivité des débits de dose
- Peu de données d'écotox chronique, applicabilité surtout en situation d'exposition chronique (ou postaccident) versus beaucoup de données d'écotox aigu
- Chaîne trophique modélisée (ou agrégée)
- Perspectives sur les approches matrice et écologique

■ Risque chimique pour les écosystèmes

- Cible: compartiment environnemental, p.e. tous les organismes aquatiques (algues/invertébrés/poissons) pour une PNEC
- Additivité du risque par défaut
- Notion de risque aigu (ou court terme)
- Empoisonnement secondaire uniquement pour S bioaccumulable
- Possibilité de compléter l'étude avec d'autres approches (matrice et écologique)

MERCI DE VOTRE ATTENTION