

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

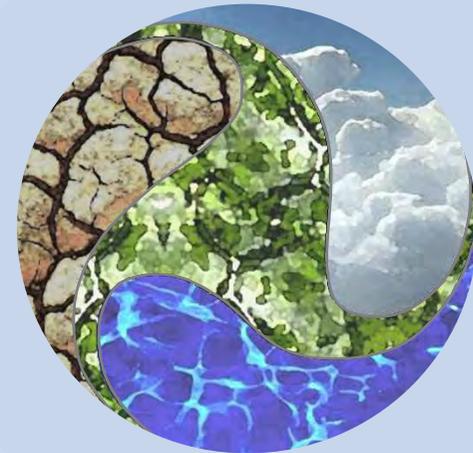
Faire avancer la sûreté nucléaire

Modélisation de l'exposition des populations humaines à une pollution environnementale

Marie Simon-Cornu

IRSN/PRP-ENV/SERIS/LM2E

Session ECCOREV



Plan

- **Contexte/terminologie** : exposition, risque, radioactivité, codes de calcul en radioécologie...
- **Modélisation physique** de la dispersion :
 - dans l'atmosphère
 - dans les cours d'eau
- **Modélisation empirique** des transferts (sol, faune, flore)
- Propagation **incertitude/variabilité**
- **Etude de cas**

		
	x	
	x	x
 		x

Identification du danger

Danger = substance susceptible d'entraîner un effet néfaste

Appréciation de l'exposition

Caractérisation du danger

➤ Quantité de danger « reçu » (ingéré, inhalé...) par le ou les exposé(s)

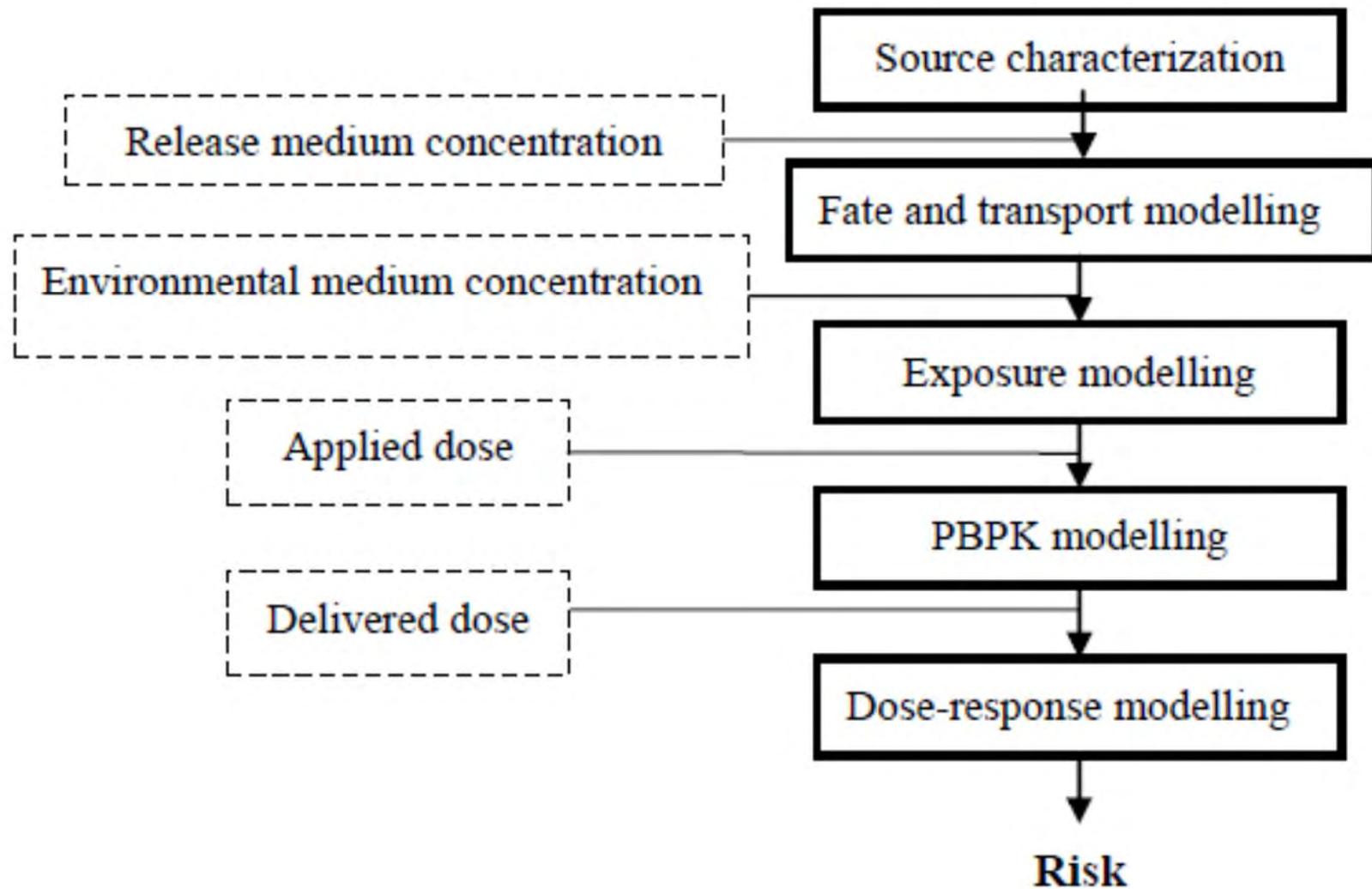
➤ VTR :
 ○ Valeur limite
 ○ Paramètre(s) d'une f° dose-réponse

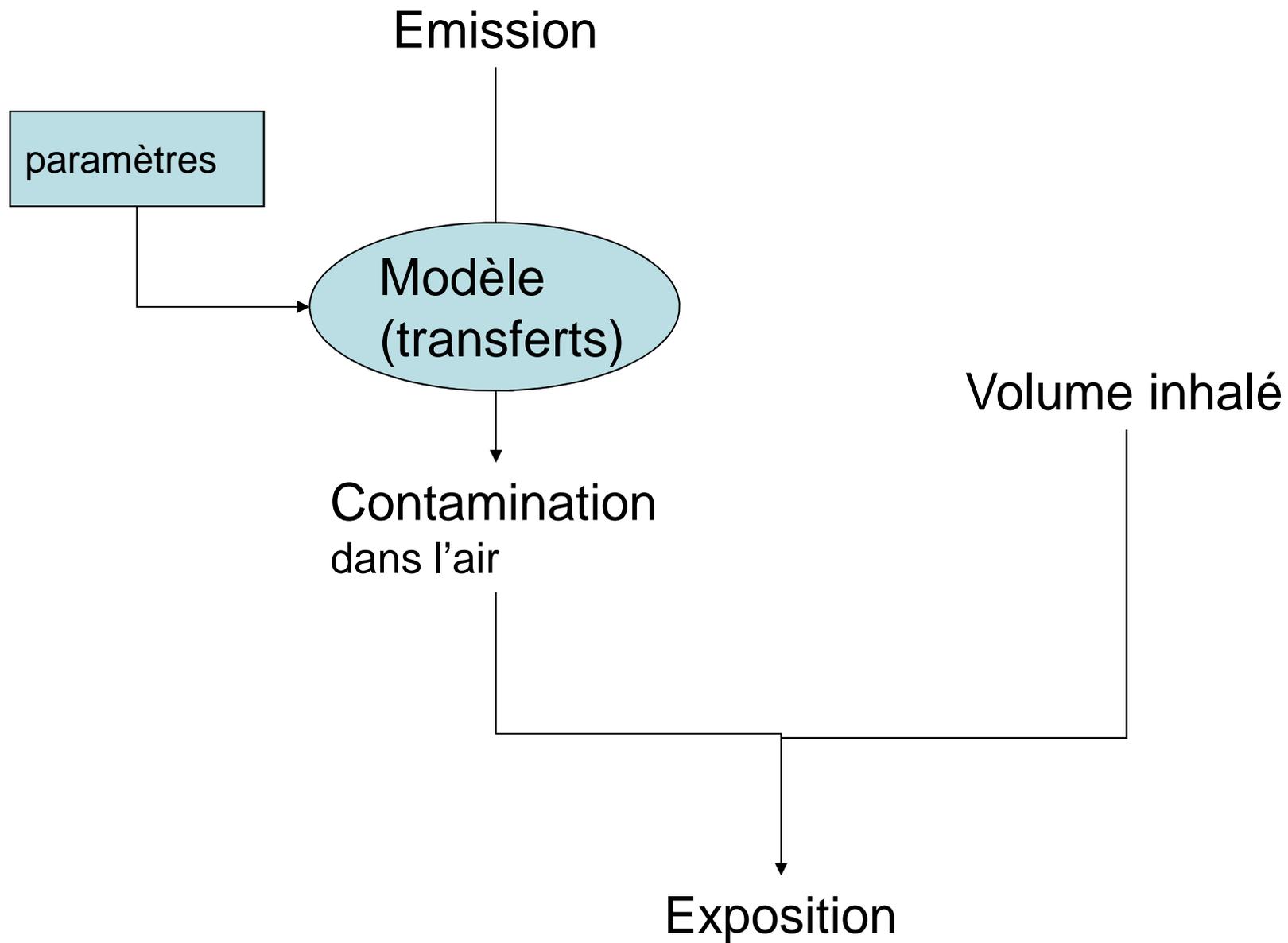
Caractérisation du risque

Risque = fonction de la probabilité d'occurrence et de la gravité de l'effet néfaste

Pour un effet (=1 gravité)

- Risque = 0 si exposition < VTR, indice de risque = exposition/VTR sinon
- Risque = f° dose-réponse (exposition, VTR)





Emission

paramètres

Modèle
(transferts)

Consommation

Contamination
Dans l'aliment consommé

Exposition

CONTEXTE

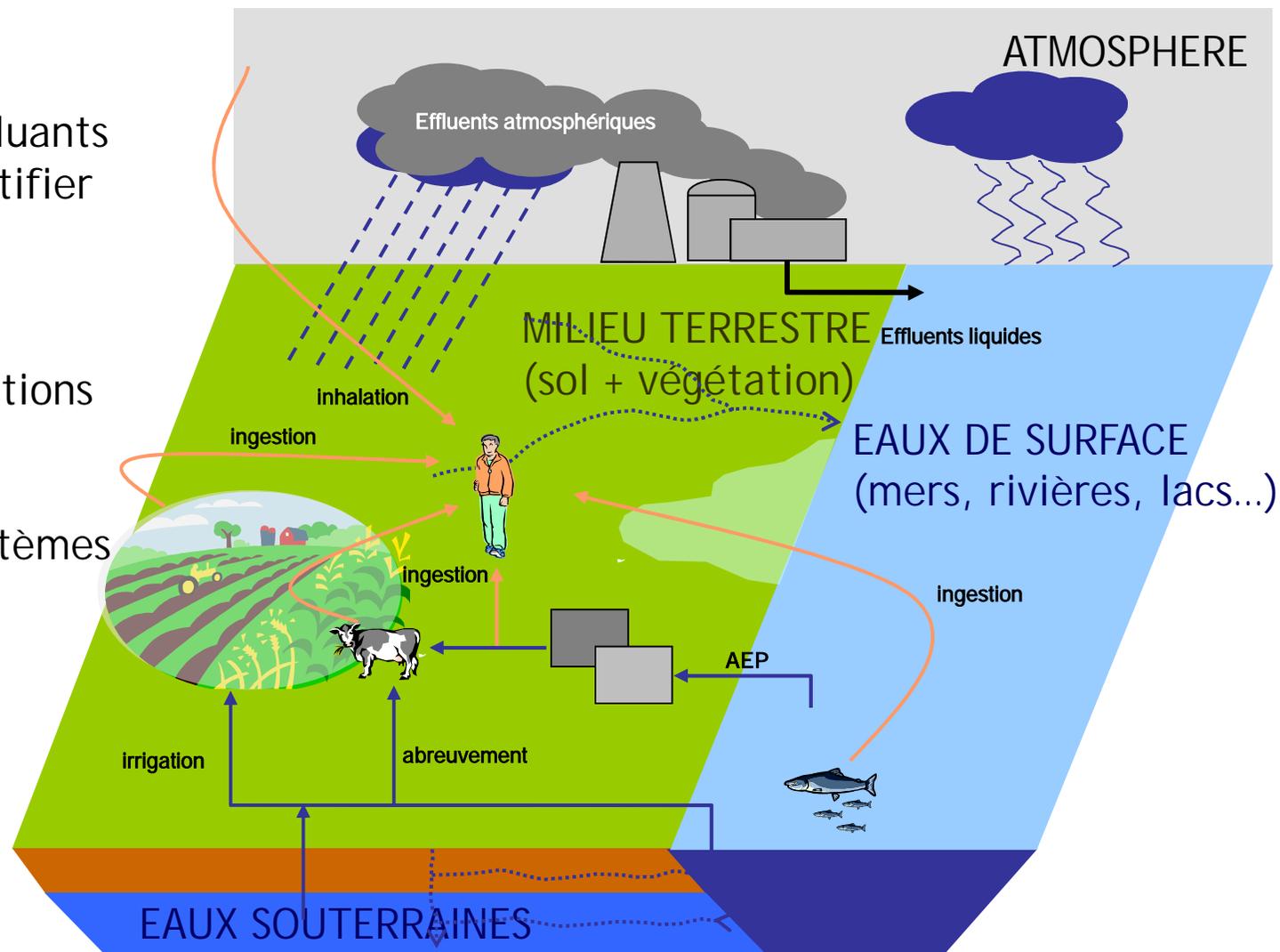
L'environnement : un ensemble

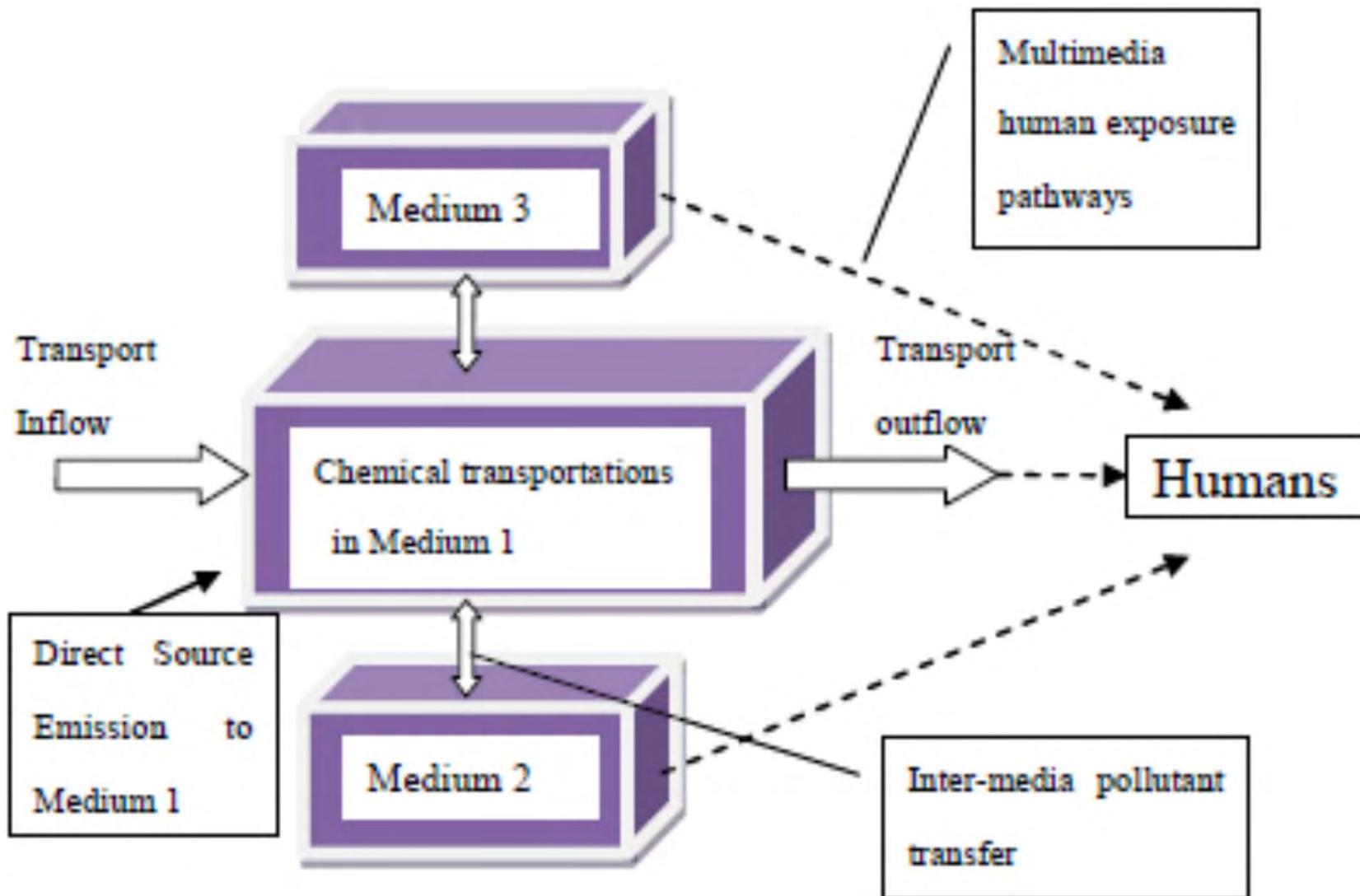
- de **composantes**, physiques et biologiques,
- d'**interactions**, naturelles ou induites par l'homme, entre et au sein de ces composantes

⇒ dispersion des polluants
⇒ à localiser & quantifier
pour évaluer :

① Impact aux populations
humaines

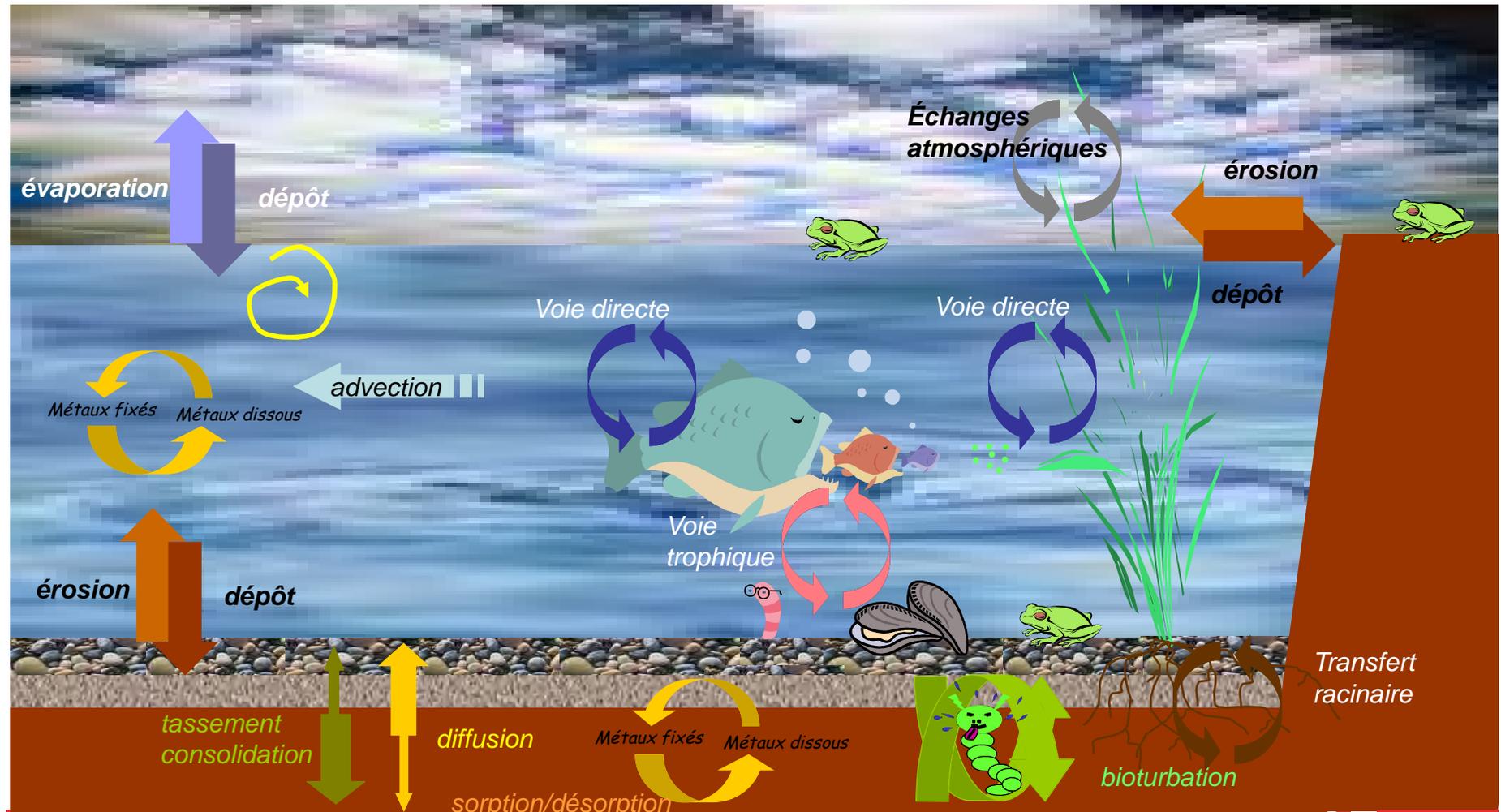
② Impact aux écosystèmes





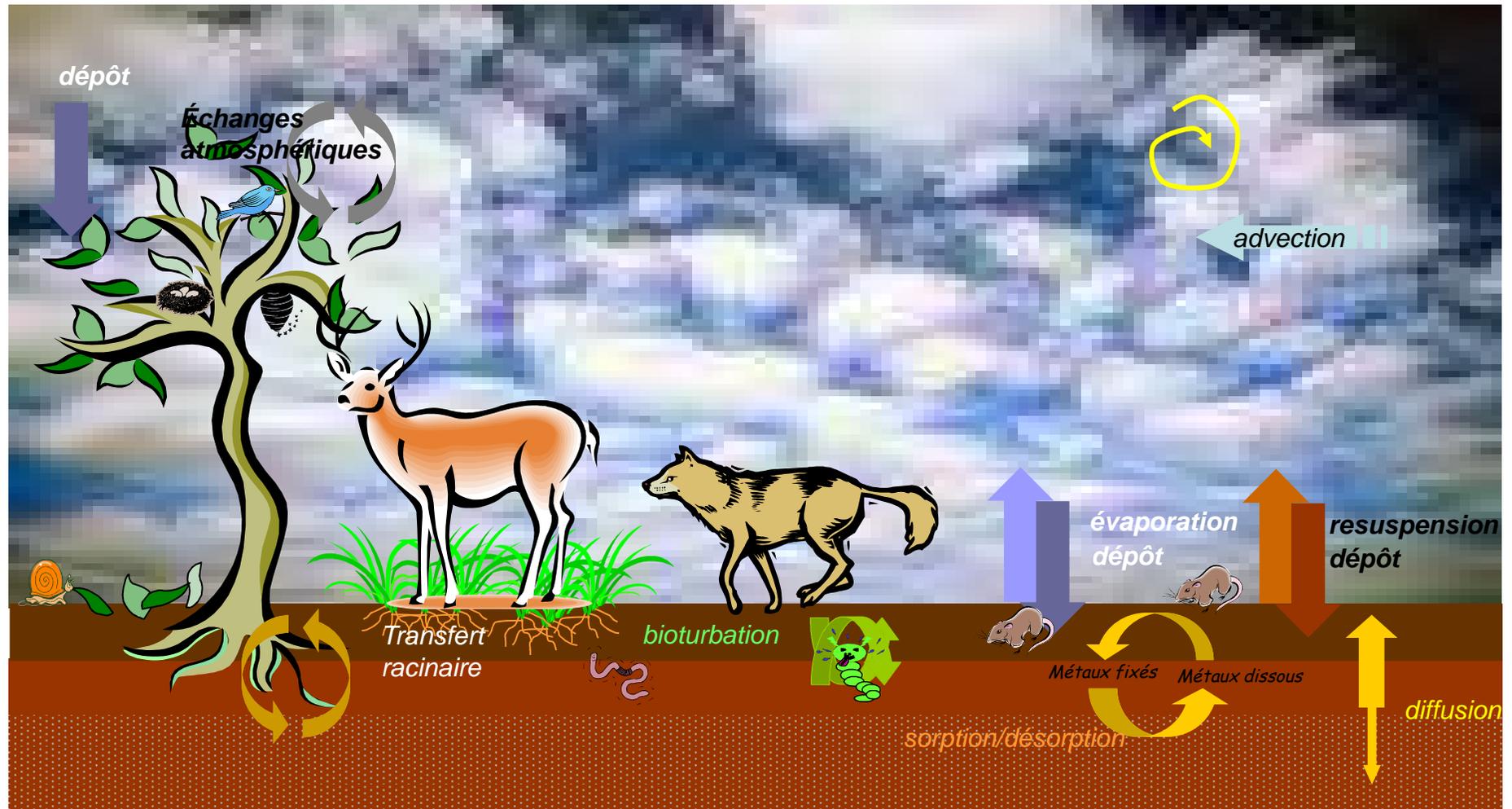
Milieux aquatiques

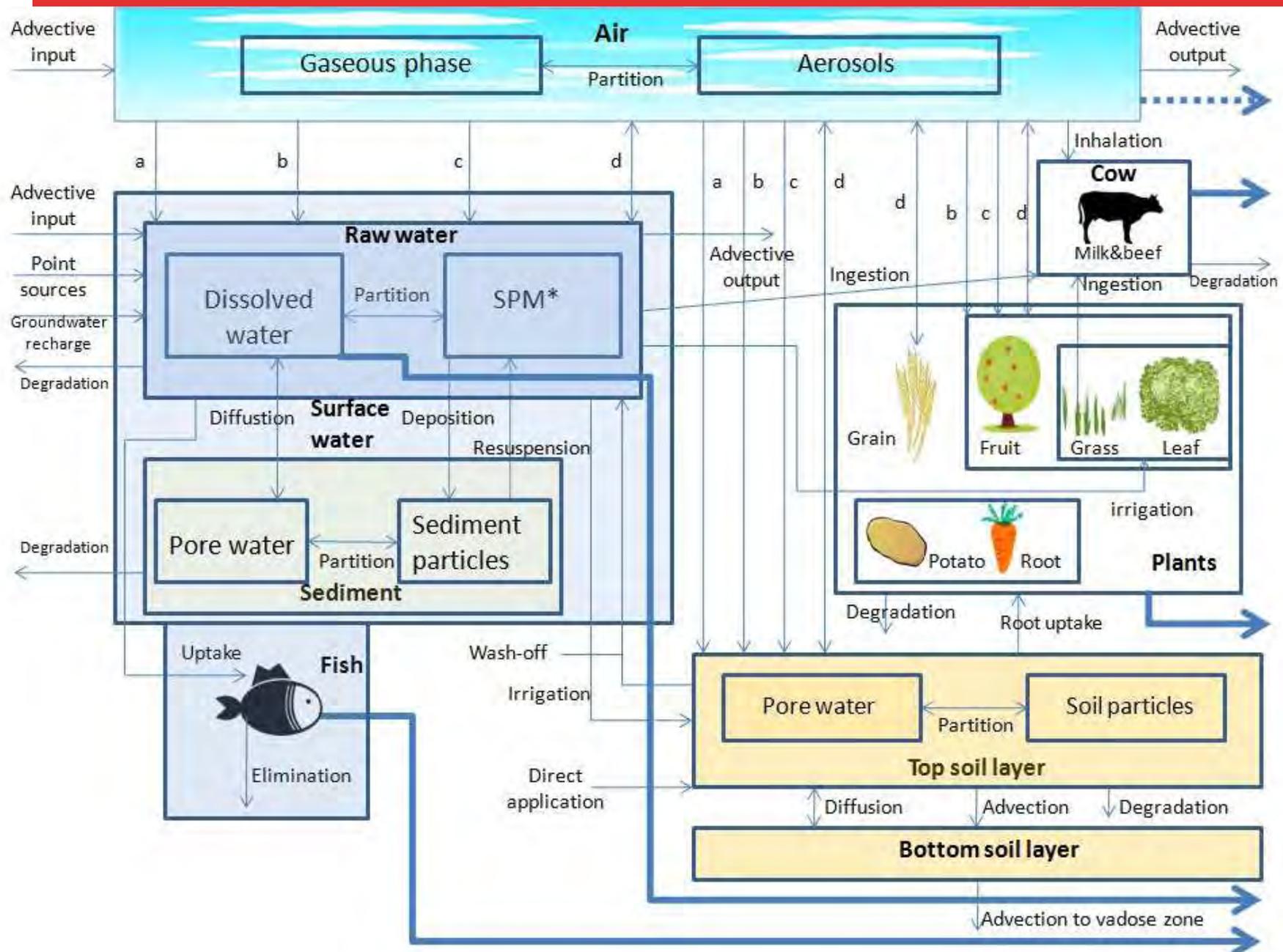
➤ Des processus physiques et biologiques, et des interfaces



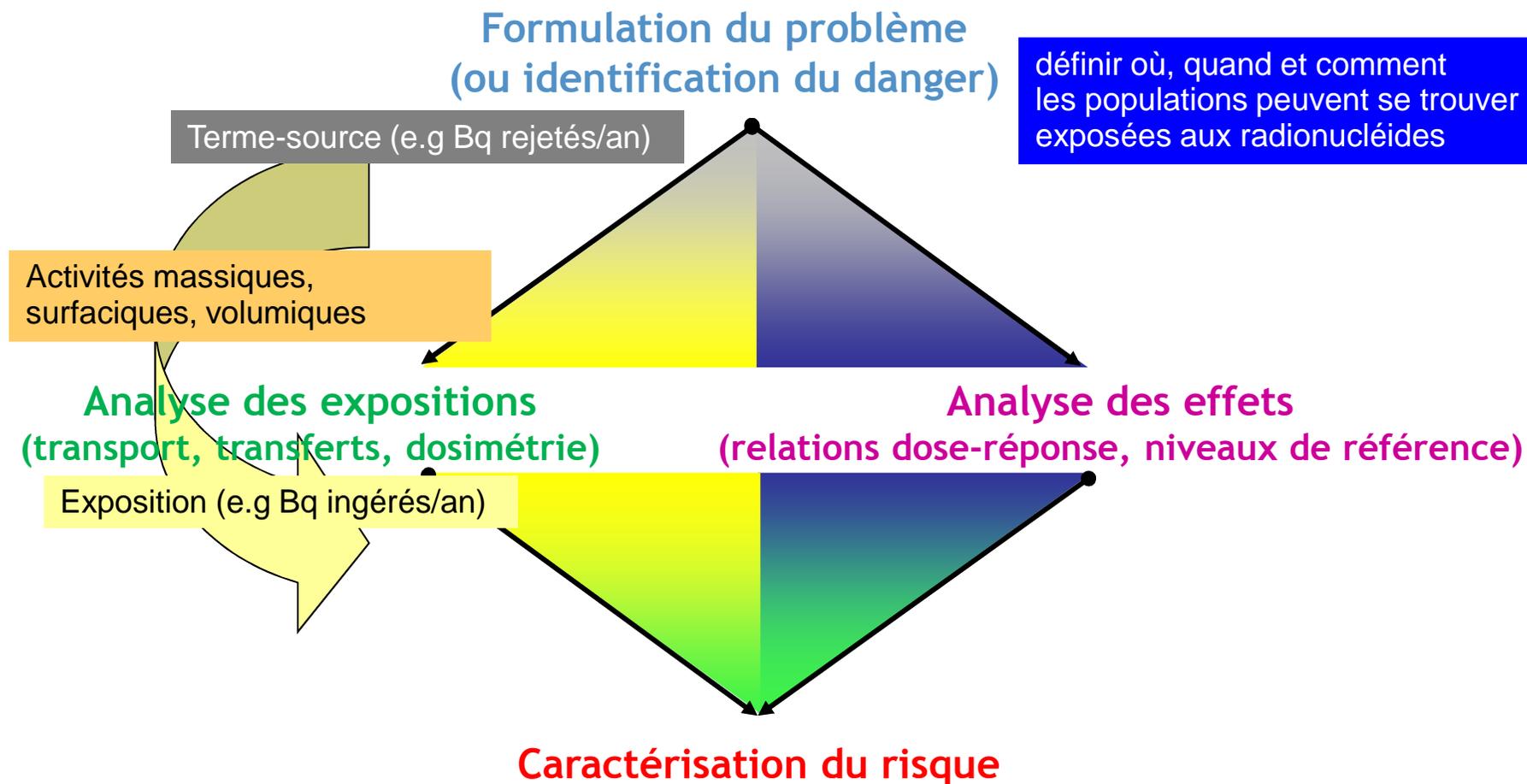
Milieu terrestre

➔ Des processus physiques, biologiques et des interfaces !

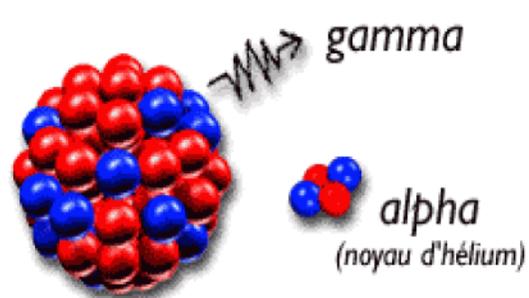




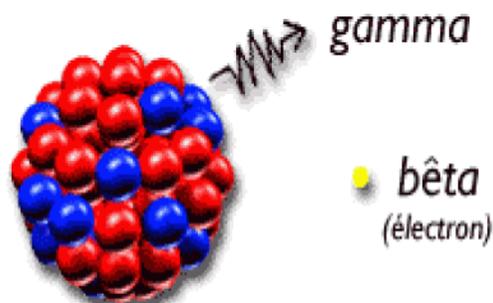
➔ Cas particulier des radionucléides



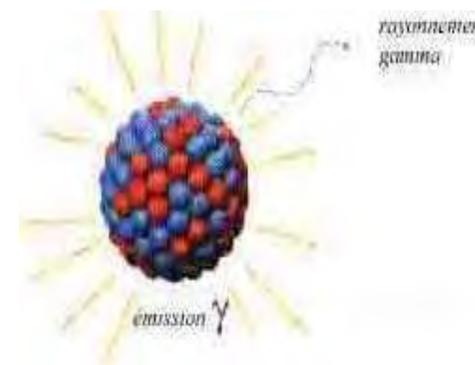
Radioactivité : Lorsque les neutrons et les protons du noyau d'un isotope ne sont pas à l'équilibre, il va tendre vers un état plus stable en libérant son excès d'énergie sous forme de rayonnements. Il se transforme en un autre isotope.



Le noyau instable se transforme en éjectant en une seule fois 2 neutrons et 2 protons.

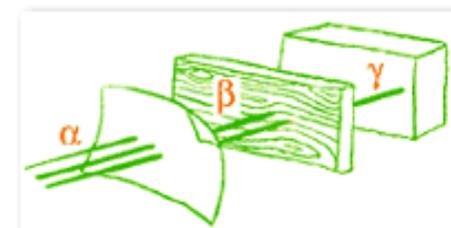


Le noyau instable éjecte un électron b^- ou un positron b^+ .



Le rayonnement gamma est un flux de photons.

Becquerel (Bq) : 1Bq = 1 désintégration par seconde.



Décroissance et filiations radioactives

Eléments	Période de décroissance radioactive
^{137}Cs	30,2 ans
^3H	12,3 ans
^{60}Co	5,3 ans
^{54}Mn	312 jours
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	249,8 jours
^{131}I	8 jours

- Processus plus ou moins prépondérant en fonction des échelles de temps considérées.
- Doit intégrer les filiations aux grandes échelles de temps et pour les vies courtes.

$$\frac{\partial [A]_j}{\partial t} = -\lambda_j \cdot [A]_j + \sum_{i \neq j} \alpha_i \cdot \lambda_i \cdot [A]_i \quad \text{Avec : } \lambda_i = \frac{\text{Ln}(2)}{T_i}$$

SOURCES NATURELLES

- **Rayonnements cosmiques**

Provenance de l'espace extra-terrestre et en particulier du soleil.

- **Éléments radioactifs du sol**

Uranium, thorium ou potassium et émanations gazeuses de certains produits issus de la désintégration de l'uranium contenu dans le sol tel que le radon ou le potassium des aliments.

SOURCES ARTIFICIELLES

- **Industries non nucléaires**

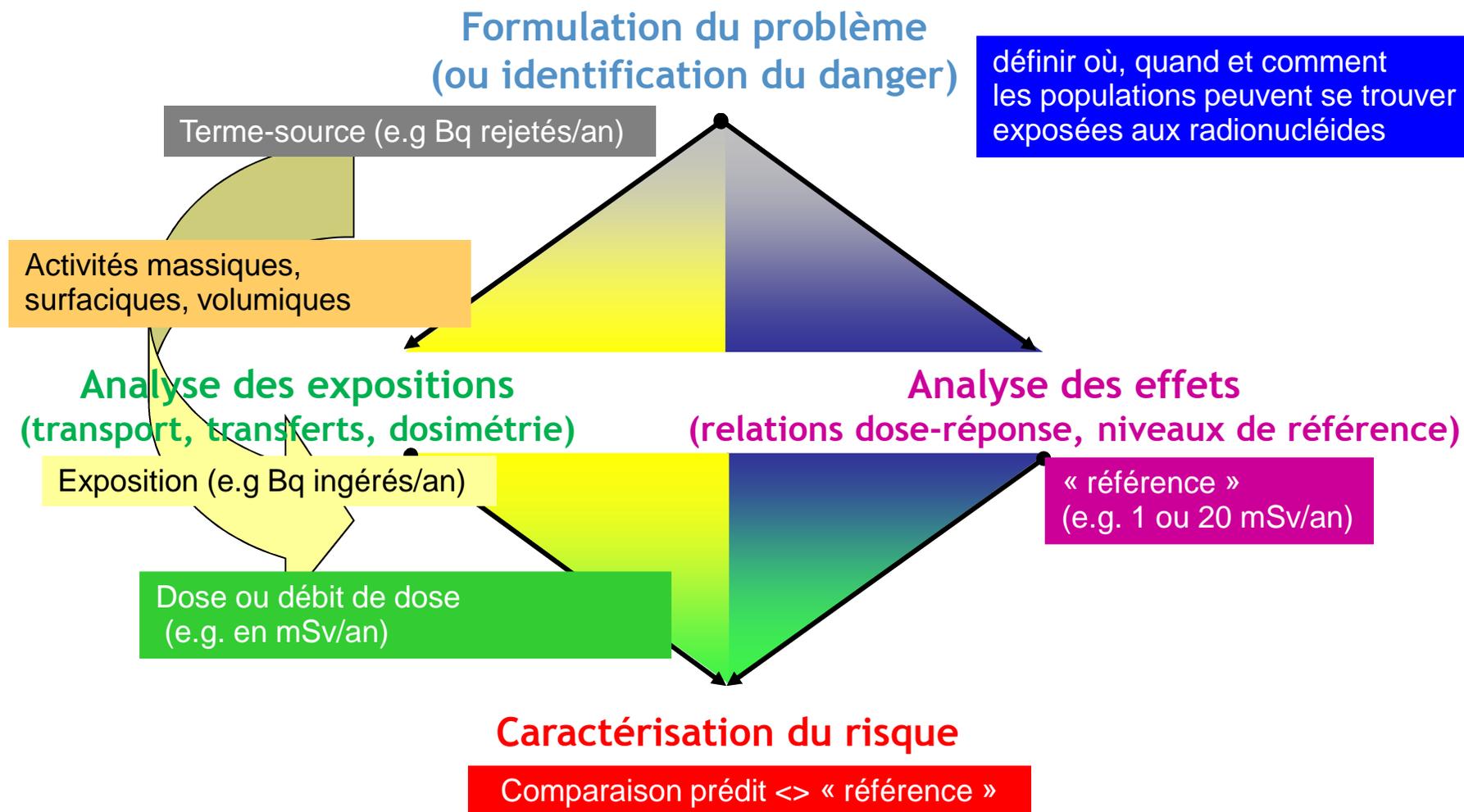
Combustion du charbon, utilisation d'engrais phosphatés, montres à cadrans lumineux (etc...)

- **Industries nucléaires**

Centrales nucléaires, usines de retraitements, retombées des anciens essais nucléaires atmosphériques, Tchernobyl, chute de satellite, etc...



➔ Cas particulier des radionucléides



Terminologie (vocabulaire dosimétrie)

Dose absorbée

Définition : quotient de la quantité d'énergie $d\varepsilon$ délivrée par les rayonnements ionisants par la masse dm , tel que : $D = d\varepsilon / dm$

Unité : J/kg ou Gray (Gy)

Dose équivalente à l'organe (ou au tissu) T

Définition : dose absorbée à l'organe (ou au tissu) T par le rayonnement R x facteur de pondération lié à la nature du rayonnement R

Unité : J/kg ou Sievert (Sv)

Dose efficace

Définition : somme des doses équivalentes à chaque organe ou tissu de l'organisme pondérées par un facteur dépendant de la sensibilité aux effets stochastiques du tissu irradié W_T

Unité : J/kg ou Sievert (Sv)

Les ordres de grandeurs de la dose efficace

10 mSv



Scanner abdomino-pelvien

3,8 mSv/an



Exposition moyenne aux rayonnements en F.

1 mSv/an



Limite annuelle d'exposition au public

0,05 mSv



Radio des poumons

0,03 mSv



Vol Paris - New York

0,01 mSv/an



Voisinage d'une installation nucléaire

Codes de calcul en radioécologie - domaine d'application

■ Nature et objectif des calculs

- **Simulation** du transport/transfert des radionucléides dans l'environnement
 - Transport = phénomènes physiques (e.g. dispersion atmosphérique)
 - Transferts = phénomènes bio-géo-chimiques
 - Activités massiques, volumiques, surfaciques (Bq/kg, Bq/m²...)
- **Evaluation** de l'impact dosimétrique à l'homme s
 - Débits de dose (Sv/an...)
 - Doses (Sv)

■ Scenarios

- Fonctionnement **normal**, incidentel ou **accidentel** d'installations nucléaires
- **Multi-rejets** : atmosphérique, aquatique fluvial et marin
- **Multi-milieus** : atmosphérique, fluvial, marin, agricole, et interfaces
- **Multi-expositions** :
 - Irradiation externe : immersion panache, exposition aux dépôts
 - Contamination interne : inhalation (panache et remise en suspension), ingestion (boisson, aliments, accidentelle)

Matrice de transfert (impact homme)

SOURCE 	Rejet atmo	Rejet fluvial	Rejet marin			
	ATMO 	Dépôts	Dépôts	Dépôts		Inhalation externe
		FLUVIAL 		Abreuvement Irrigation	Prélèvement	Inhalation externe
			MARIN 		Prélèvement	Inhalation externe Ingestion acc.
				AGRICOLE 	Prélèvement	Inhalation externe
					ALIMENT 	Ingestion
						DOSE HOMME 

Quels codes de calcul et pour quoi faire ?

- **Fonction de l'évaluateur et de la disponibilité du code :**
 - Codes développés/utilisés par CEA, AREVA, ANDRA, IRSN/EDF...
 - Codes libres (e.g. développés sous l'égide de l'AIEA ou de l'Europe)
 - Codes commerciaux
- **Fonction du besoin de l'évaluateur :**
 - Screening
 - Expertise
 - Recherche
- **Fonction du contexte :**
 - Quelle situation : chronique ou accidentelle ?
 - Quel délai de réponse attendu : crise ou hors crise ?
- **Fonction du scénario :**
 - Quel(s) rejet(s) : réels ou théoriques ? liquides et/ou atmo ?
 - Quel(s) milieu(x) ?
 - Quelle(s) voie(s) d'exposition ?

Adapter la complexité à l'enjeu

Trois grandes familles de codes

- **Codes utilisant des modèles 'à l'équilibre'**
 - Equations statiques ('règles de trois')
 - Type de scénario traité : rejet constant, liquide OU atmosphérique
 - Adapté au screening, ou à l'expertise dans des cas simples (rejet en 'plateau')
 - Quelques exemples (non exhaustif) : CROM, ERICA...
- Codes supposant un pic unique de contamination
 - Equations analytiques (« décroissance » post-accidentelle)
 - Type de scénario traité : rejet ponctuel ('pic'), atmosphérique
 - Adapté au screening, ou à l'expertise dans des cas simples (rejet en 'pic')
 - Quelques exemples (non exhaustif) : ASTRAL, RODOS...
- Codes (ou plate-formes) flexibles
 - Equations différentielles (solveur numérique)
 - Type de scénario traité : toutes situations
 - Adapté à l'expertise dans des cas complexes ou à la recherche
 - Quelques exemples (non exhaustif) : SYMBIOSE, ECOLEGO...

Trois grandes familles de codes

- Codes utilisant des modèles 'à l'équilibre'
 - Equations statiques ('règles de trois')
 - Type de scénario traité : rejet constant, liquide OU atmosphérique
 - Adapté au screening, ou à l'expertise dans des cas simples (rejet en 'plateau')
 - Quelques exemples (non exhaustif) : CROM, ERICA...
- Codes supposant un pic unique de contamination
 - Equations analytiques (« décroissance » post-accidentelle)
 - Type de scénario traité : rejet ponctuel ('pic'), atmosphérique
 - Adapté au screening, ou à l'expertise dans des cas simples (rejet en 'pic')
 - Quelques exemples (non exhaustif) : ASTRAL, RODOS...
- Codes (ou plate-formes) flexibles
 - Equations différentielles (solveur numérique)
 - Type de scénario traité : toutes situations
 - Adapté à l'expertise dans des cas complexes ou à la recherche
 - Quelques exemples (non exhaustif) : SYMBIOSE, ECOLEGO...

Trois grandes familles de codes

- Codes utilisant des modèles 'à l'équilibre'
 - Equations statiques ('règles de trois')
 - Type de scénario traité : rejet constant, liquide OU atmosphérique
 - Adapté au screening, ou à l'expertise dans des cas simples (rejet en 'plateau')
 - Quelques exemples (non exhaustif) : CROM, ERICA...
- Codes supposant un pic unique de contamination
 - Equations analytiques (« décroissance » post-accidentelle)
 - Type de scénario traité : rejet ponctuel ('pic'), atmosphérique
 - Adapté au screening, ou à l'expertise dans des cas simples (rejet en 'pic')
 - Quelques exemples (non exhaustif) : ASTRAL, RODOS...
- Codes (ou plate-formes) flexibles
 - Equations différentielles (solveur numérique)
 - Type de scénario traité : toutes situations
 - Adapté à l'expertise dans des cas complexes ou à la recherche
 - Quelques exemples (non exhaustif) : SYMBIOSE, ECOLEGO...

Plan

- **Contexte/terminologie** : exposition, risque, radioactivité, codes de calcul en radioécologie...
- **Modélisation physique** de la dispersion :
 - dans l'atmosphère
 - dans les cours d'eau
- **Modélisation empirique** des transferts (sol, faune, flore)
- Propagation **incertitude/variabilité**
- **Etude de cas**

Cours SGE

« Modélisation de la pollution atmosphérique »

Dispersion atmosphérique

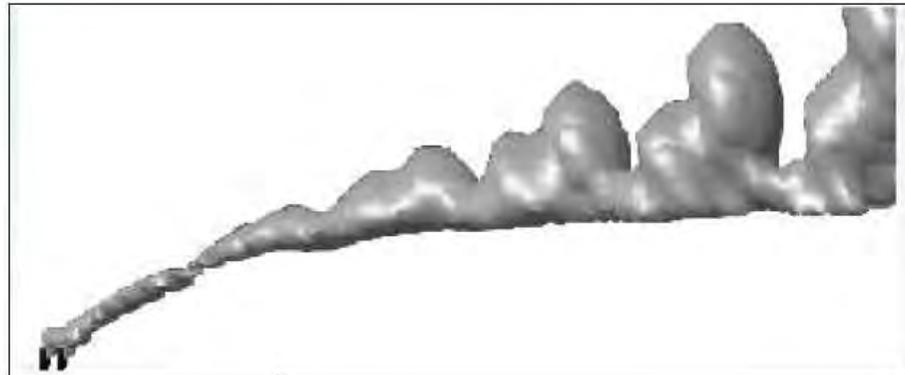
Christian Seigneur
Cerea

Dispersion atmosphérique

La dispersion est due à la turbulence car la diffusion moléculaire est trop lente aux échelles de temps concernant la pollution atmosphérique

Coefficient de diffusion moléculaire : $\sim 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

Coefficient de diffusion turbulente : $\sim 1 \text{ m}^2/\text{s}$ (stable) à $\sim 100 \text{ m}^2/\text{s}$ (instable)



Modèles de qualité de l'air

Modèles de panache gaussiens : pollution de proximité

Modèles de rue-canyon : pollution de proximité

Modèles lagrangiens : pollution de proximité et à longue-distance d'un nombre limité de sources

Modèles eulériens : pollution de fond urbaine, régionale, voire globale de toutes les sources

Modèles hybrides (plume-in-grid) : pollution de fond et pollution de proximité

Représentations lagrangienne et eulérienne

La représentation lagrangienne consiste à suivre le mouvement de l'objet par rapport au mouvement moyen du système en mouvement



Déplacement du voyageur par rapport au siège

La représentation eulérienne consiste à suivre le mouvement de l'objet par rapport à un repère fixe



Déplacement du voyageur par rapport aux gares

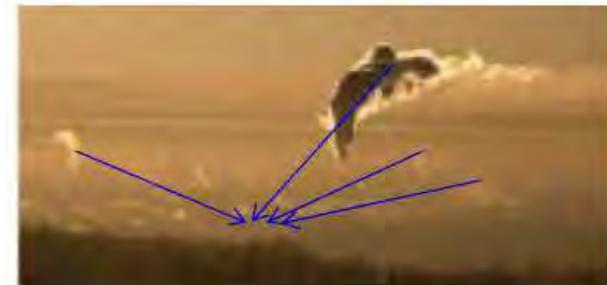
Représentations lagrangienne et eulérienne

La représentation lagrangienne de la dispersion atmosphérique consiste à suivre le mouvement des polluants (particules, molécules) par rapport au mouvement moyen de la masse d'air



Déplacement des polluants par rapport au centre du panache

La représentation eulérienne consiste à suivre le mouvement des polluants par rapport à un repère fixe

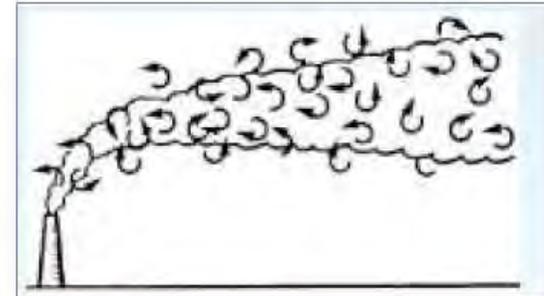


Déplacement des polluants par rapport à la station de mesure

Écart-type σ

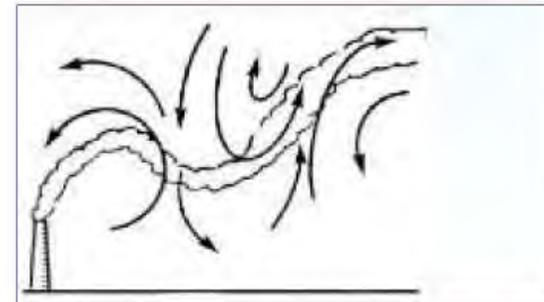
Évolution de la source vers l'aval

Près de la source, seuls les tourbillons plus petits que le panache vont disperser le panache : dispersion relative



Les tourbillon plus grands que le panache vont le déplacer

Déplacement + dispersion relative :
dispersion absolue

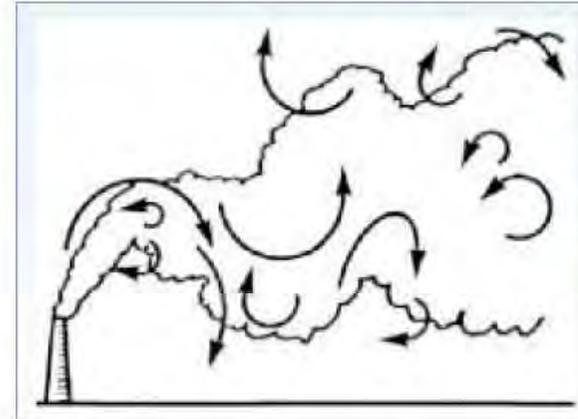


Écart-type σ

Évolution de la source vers l'aval

Plus le panache grossit, plus il y a de tourbillons qui sont de taille inférieure à la taille du panache, donc plus la dispersion du panache est importante

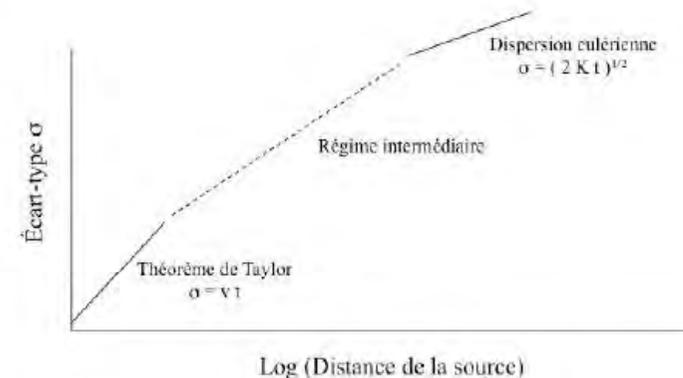
Une fois que la taille du panache englobe la plupart des tourbillons, la dispersion relative est égale à la dispersion absolue et la dispersion lagrangienne est alors équivalente à la dispersion eulérienne



Écart-type σ

Évolution de la source vers l'aval

Comme l'atmosphère n'est pas un milieu stationnaire et homogène, l'évolution des écarts-types peut différer de manière significative de cette représentation théorique.



Néanmoins, il est important de noter le passage de la dispersion lagrangienne (qui dépend de la distance de la source et est utilisée dans les modèles de proximité) à une dispersion eulérienne (qui est indépendante de la distance de la source et est utilisée dans les modèles urbains et régionaux)

Modèles gaussiens

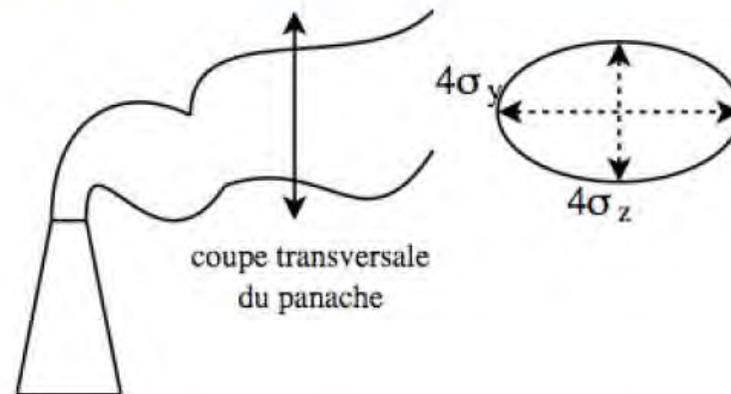
Les modèles gaussiens permettent de simuler la dispersion atmosphérique de polluants non-réactifs à proximité de la source.

On distingue :

- les modèles de panache stationnaires*
- les modèles de bouffées (qui peuvent être non-stationnaires)

* Stationnaire : les conditions des variables d'entrée (émission, météorologie) sont constantes dans le temps (généralement avec un pas de temps horaire) et, pour la météorologie, l'espace.

Modèle de panache gaussien



Les concentrations dans le panache sont représentées par l'équation suivante :

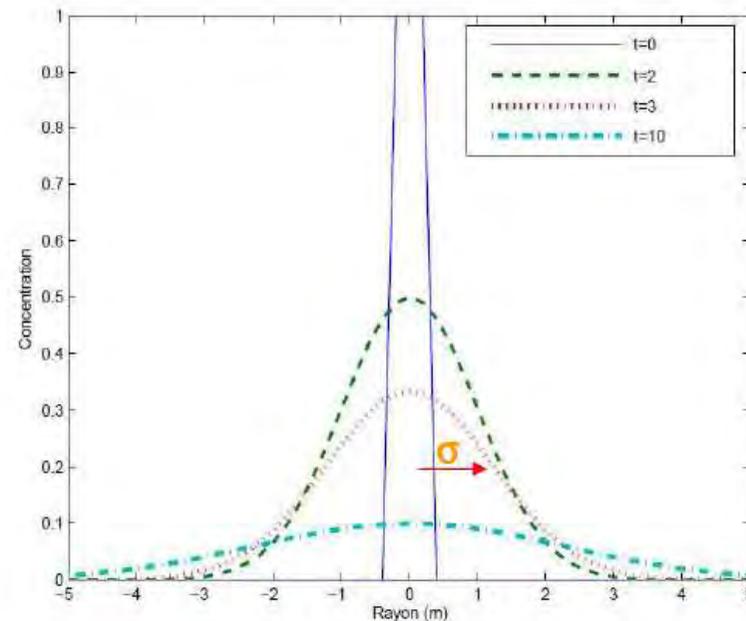
$$c(\mathbf{x}) = \frac{q}{2\pi v_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

L'ellipse ($4\sigma_y$, $4\sigma_z$) contient 95,4% de la masse du panache gaussien ;
l'ellipse ($2\sigma_y$, $2\sigma_z$) contient 68,2% de la masse du panache gaussien

Modèle de panache gaussien

Les coefficients de dispersion augmentent avec le temps (la distance de la source) ; ce sont les écarts types de la distribution gaussienne qui évoluent donc ainsi :

$$c(\mathbf{x}) = \frac{q}{2\pi v_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

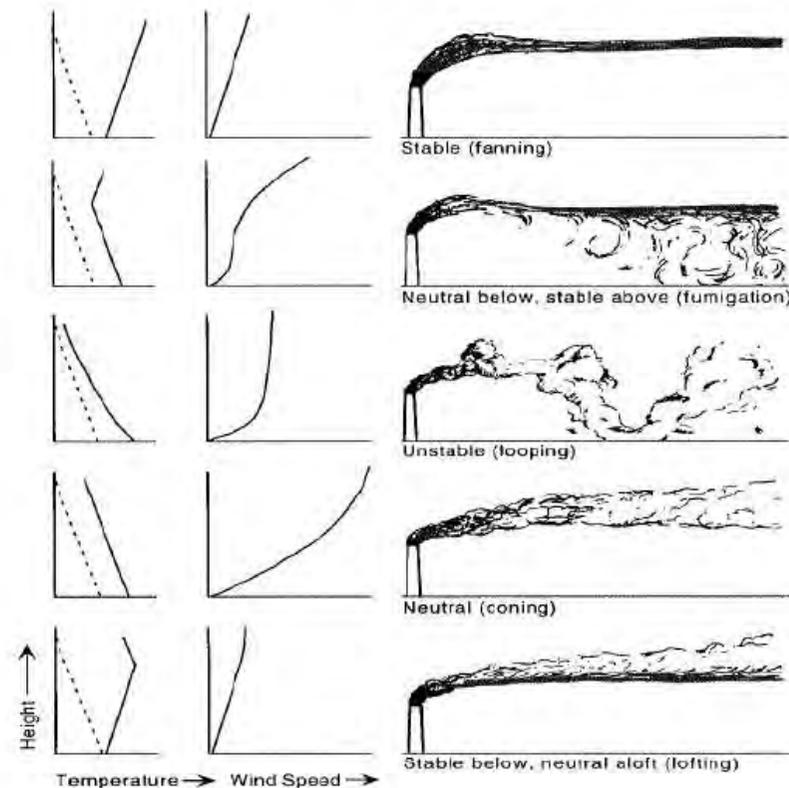


Modèle de panache gaussien

Effet de la stabilité atmosphérique

La stabilité atmosphérique influence la dispersion du panache :

la dispersion verticale peut être caractérisée qualitativement selon les profils de température verticaux



Plan

- **Contexte/terminologie** : exposition, risque, radioactivité, codes de calcul en radioécologie...
- **Modélisation physique** de la dispersion :
 - dans l'atmosphère
 - dans les cours d'eau
- **Modélisation empirique** des transferts (sol, faune, flore)
- Propagation **incertitude/variabilité**
- **Etude de cas**

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

ECCOREV

Modélisation des transferts de radionucléides dans les cours d'eau

CEREGE 22 février 2010

P.Boyer - DEI/SECRE/LME

Modélisation des transferts dans la colonne d'eau et les sédiments des radionucléides d'origine anthropique

Intégration à la chaîne trophique

Eau

(eau)

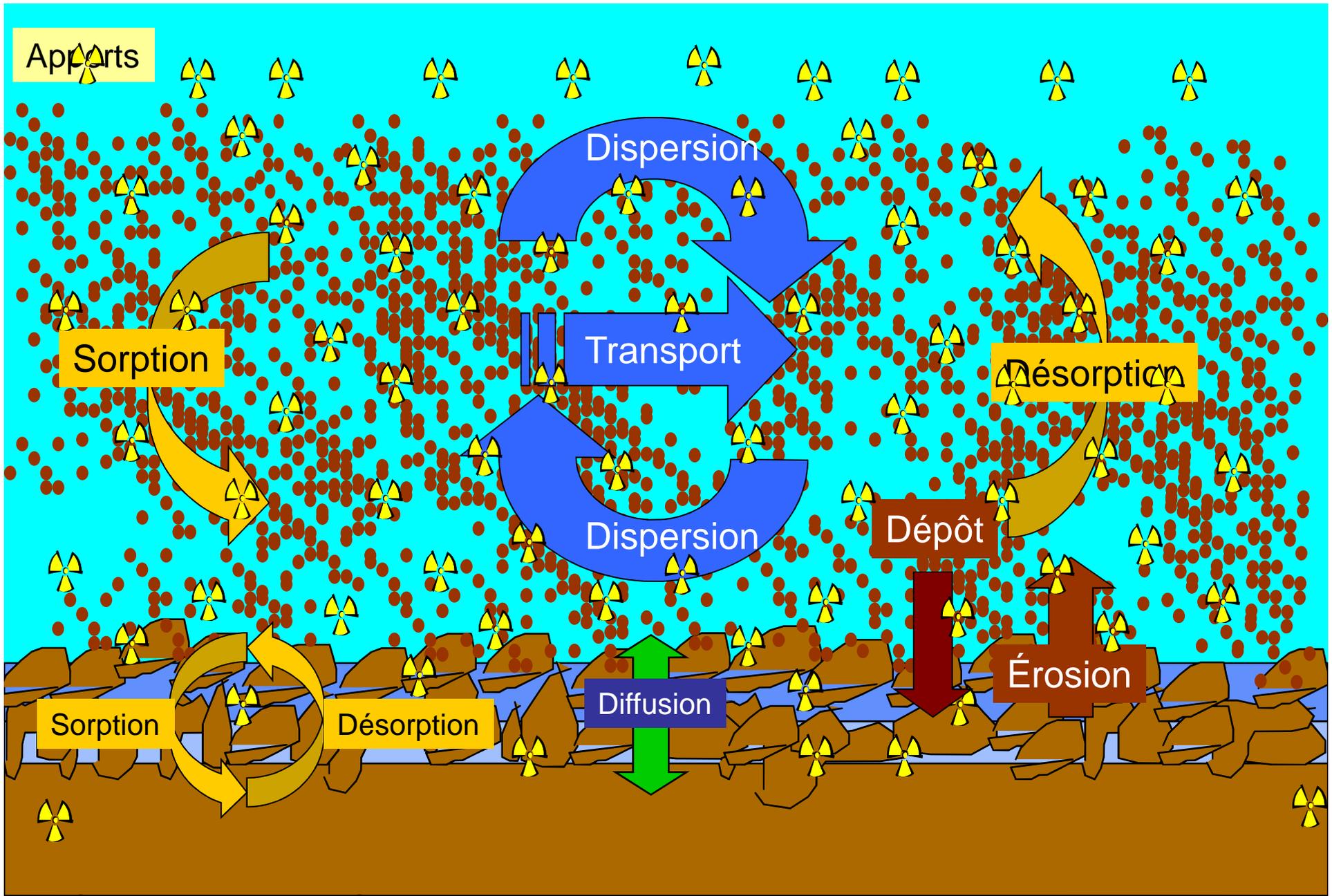
$$[A]_{col} = [A]_{col}^{eau} + [mat]_{col} \cdot [A]_{col}^{mat}$$

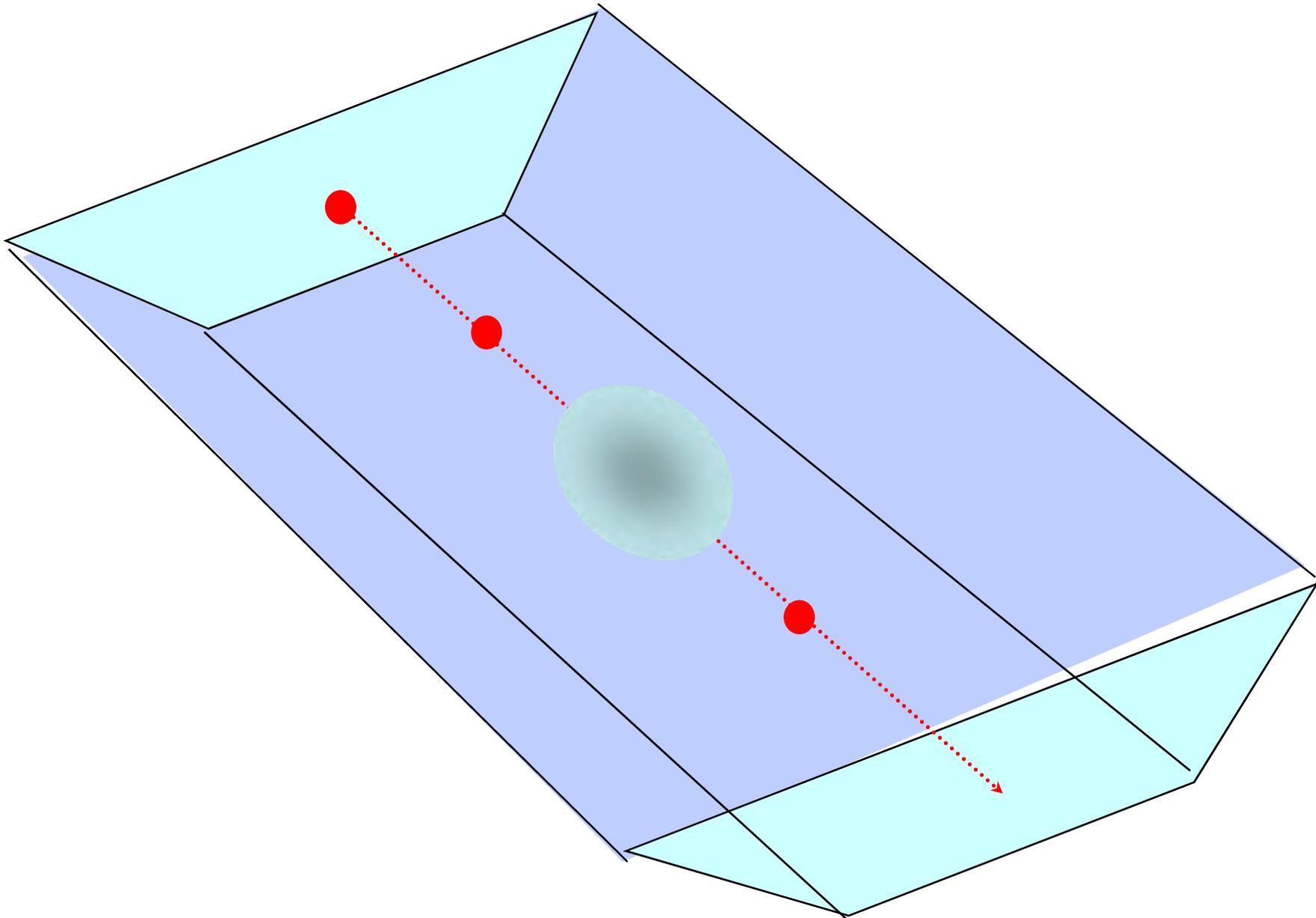
$(Bq \cdot m^{-3})$ $(kg \cdot m^{-3})$ $(Bq \cdot kg_{sec}^{-1})$

Matières
(mat)

$$[A]_{sed} = n_{sed} \cdot [A]_{sed}^{eau} + \rho_{mat} \cdot (1 - n_{sed}) \cdot [A]_{sed}^{mat}$$

$(Bq \cdot m^{-3})$ $(kg \cdot m^{-3})$ $(Bq \cdot kg_{sec}^{-1})$





Modélisation - Transport et dispersion

Equation générale de transport - diffusion

Transport **Diffusion** **Termes sources**

$$\frac{\partial [A]_{col}}{\partial t} + \underbrace{\vec{U} \cdot \nabla [A]_{col}}_{\text{Transport}} = \underbrace{\Delta(\epsilon_t \cdot \nabla [A]_{col})}_{\text{Diffusion}} + \underbrace{\sigma([A]_{col})}_{\text{Termes sources}}$$

Champ des vitesses moyennes ($m.s^{-1}$) Champ des diffusivités turbulentes ($m^2.s^{-1}$)

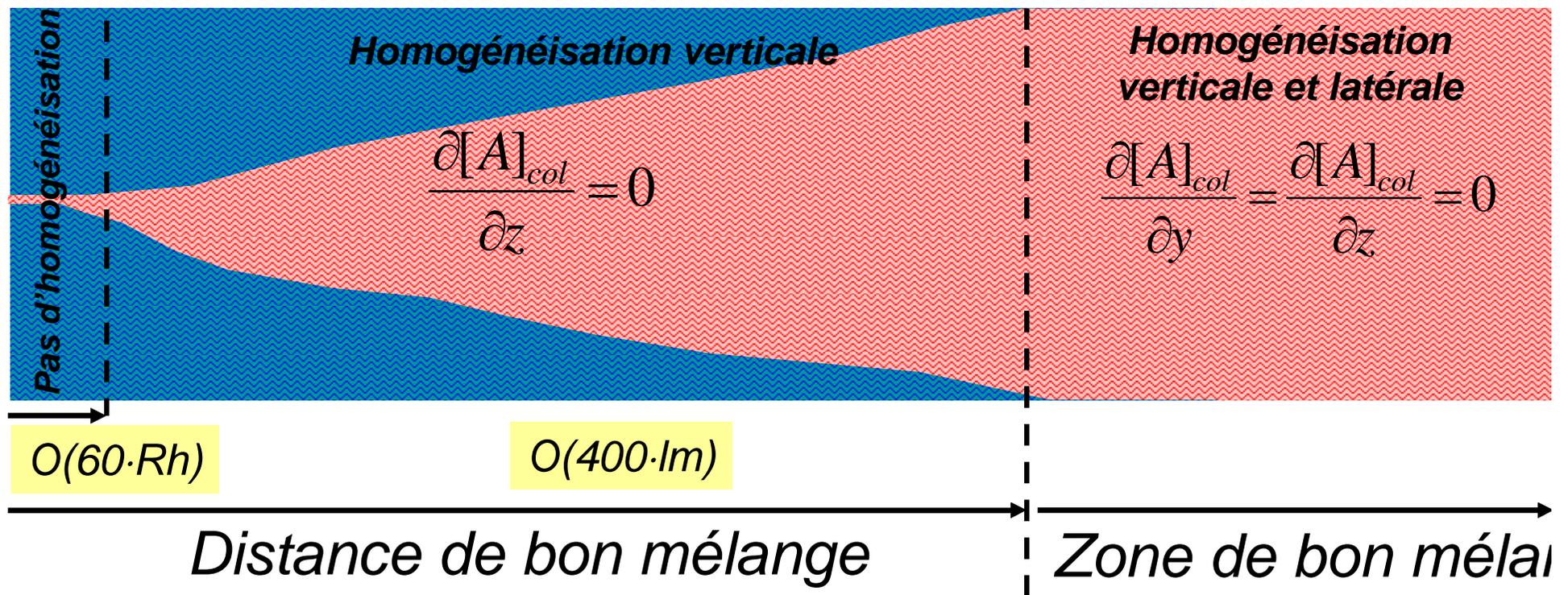
Modélisation - Transport et dispersion

Hauteur $O(1 \text{ m})$

Largeur = $O(100 \text{ m})$

Longueur = $O(100 \text{ km})$

Trois grandes zones de mélange pour un rejet ponctuel

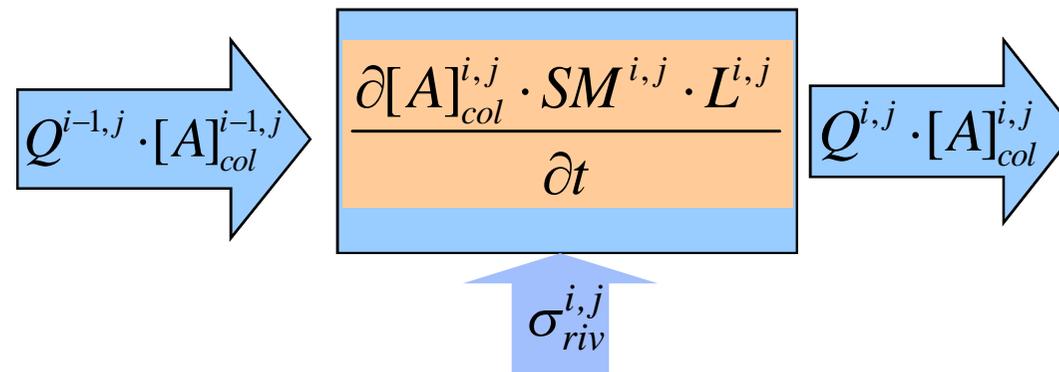


Modélisation - Transport et dispersion

- Régime hydraulique permanent et uniforme

$$[A]_{col}^{x,t} = \frac{M_{col}^{x_0,t_0}}{SM \cdot \sqrt{4 \cdot \pi \cdot D_{col} \cdot (t - t_0)}} \cdot \exp \frac{(x - x_0 - U \cdot (t - t_0))^2}{4 \cdot \pi \cdot D_{col} \cdot (t - t_0)}$$

- Modèle boîte (pas de diffusion)



- Régime hydraulique permanent et uniforme et rejet permanent

$$[A]_{col} = \text{Concentration de bon mélange} = \frac{[A]_{rejet} \cdot q_{rejet}}{Q}$$

Effectuer les prélèvements en zone de bon mélange

$$[A]_{col} = [A]_{col}^{eau} + [mat]_{col} \cdot [A]_{col}^{mat}$$

(Bq.m⁻³) (Bq.m⁻³) (kg.m⁻³) (Bq.kg⁻¹)

$$[A]_{sed} = n \cdot [A]_{sed}^{eau} + \rho_{mat} \cdot (1-n) \cdot [A]_{sed}^{mat}$$

(Bq.m⁻³) (Bq.m⁻³) (kg.m⁻³) (Bq.kg⁻¹)

Objectif : Déterminer les fractionnements solide - liquide

Première approche

Hypothèses : Echanges réversibles et instantanés

Colonne

$$Kd_{col} = \frac{[A]_{col}^{mat}}{[A]_{col}^{eau}} \quad (m^3 \cdot kg^{-1})$$

$$[A]_{col}^{eau} = \frac{[A]_{col}}{1 + Kd_{col} \cdot [mat]_{col}}$$

$$[A]_{col}^{mat} = \frac{Kd_{col} \cdot [A]_{col}}{1 + Kd_{col} \cdot [mat]_{col}}$$

Sédiment

$$\Rightarrow Kd_{sed} = \frac{[A]_{sed}}{\rho_{mat} \cdot (1-n) \cdot [A]_{col}^{eau}}$$

Activité totale du sédiment
ramenée à la masse solide

**Applicable uniquement pour
représenter des conditions
d'équilibre à long terme**

Une approche opérationnelle pour les transferts sédimentaires

Cinétique d'accumulation (S^{-1})

$$\frac{\partial [A]_{sed}}{\partial t} = \lambda_A^{acc} \cdot [A]_{col} - \lambda_A^{eli} \cdot [A]_{sed}$$

Cinétique d'élimination (S^{-1})

En considérant un flux de dépôt moyen D_{mat} :

$$\lambda_A^{acc} = \frac{D_{mat} \cdot Kd_{col}}{h_{sed} \cdot (1 + [mat]_{col} \cdot Kd_{col})}$$

$$\lambda_A^{eli} = \frac{D_{mat} \cdot Kd_{sed}^*}{h_{sed} \cdot (n_{sed} + \rho_{mat} \cdot (1 - n_{sed}) \cdot Kd_{sed}^*)} + \lambda$$

$$Kd_{sed}^* = \frac{[A]_{sed}^{mat}}{[A]_{sed}^{eau}} \approx Kd_{col} \text{ en conditions oxiques} \quad \rho_{mat} \approx 2650 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$D_{mat} \approx 50 \text{ à } 60 \text{ kg.m}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$$

$$n_{sed} \approx 70 \text{ à } 90\%$$

$$h_{sed} \approx \frac{D_{mat} \cdot 1 \text{ an}}{\rho_{mat} \cdot (1 - n_{sed})} \approx 15 \text{ à } 5 \text{ cm}$$

Plan

- **Contexte/terminologie** : exposition, risque, radioactivité, codes de calcul en radioécologie...
- **Modélisation physique** de la dispersion :
 - dans l'atmosphère
 - dans les cours d'eau
- **Modélisation empirique** des transferts (sol, faune, flore)
- Propagation **incertitude/variabilité**
- **Etude de cas**

Transfert à l'équilibre (similaire Kd)

➤ Facteurs de concentration

- Organisme contaminé par le sol

$$CR = \frac{\text{concentration organisme (Bq.kg}^{-1} \text{ poids frais)}}{\text{concentration sol (Bq.kg}^{-1} \text{ poids sec)}}$$

- Organisme contaminé par l'air

$$CR = \frac{\text{concentration organisme (Bq.kg}^{-1} \text{ poids frais)}}{\text{concentration air (Bq.m}^{-3} \text{)}}$$

- Organisme contaminé par l'eau

$$CR = \frac{\text{concentration organisme (Bq.kg}^{-1} \text{ poids frais)}}{\text{concentration eau (Bq.l}^{-1} \text{)}}$$

Dose ingestion poissons (homme)

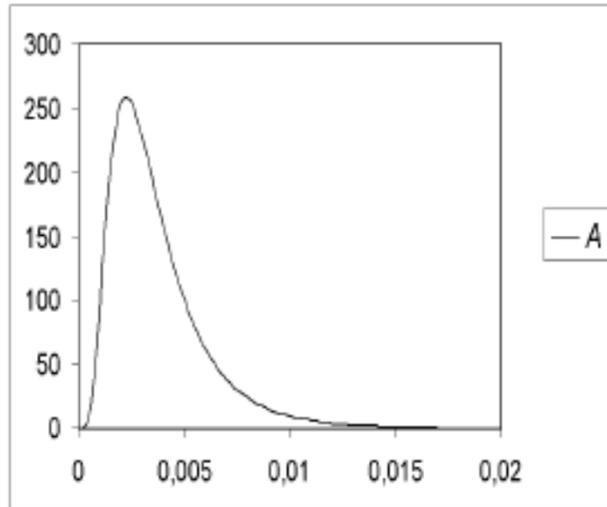
- $F(i,o)$ débit de dose reçu par un consommateur de poissons o exposé à une concentration unitaire d'un radionucléide donné i (consommation exprimée en kg/jour)

$$F(i,o) = DCC_{int}(i) \cdot CR(i,o) \cdot \text{Consommation}(o)$$

DCC : « coefficient de dose » en Sv/Bq

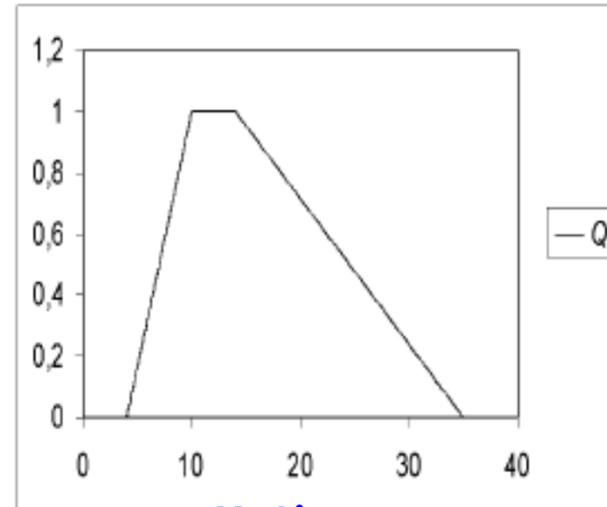
Calculs similaires mis en œuvre (a minima) dans de très nombreux codes de calcul d'impact dosimétrique aux populations humaines

Facteur de transfert aux pdts an^x



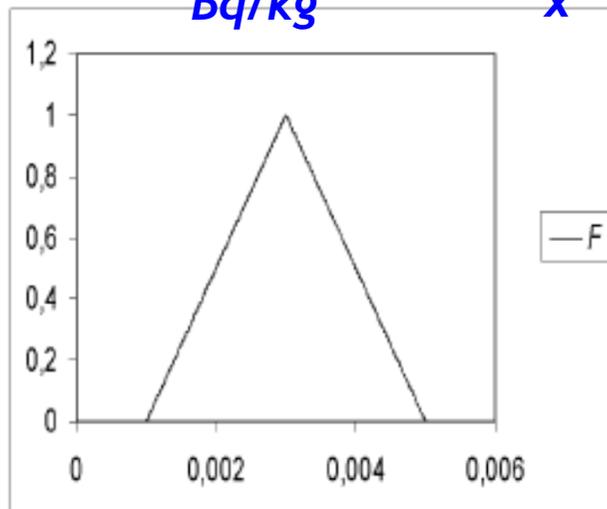
Bq/kg

x



Kg/jour

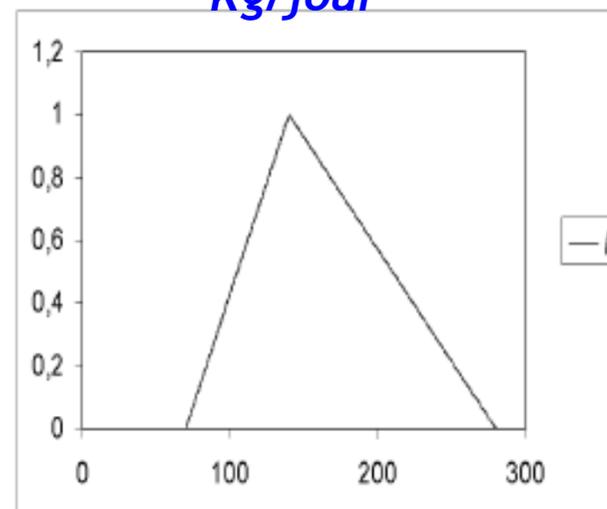
→ *Bq/an*



Jour/L

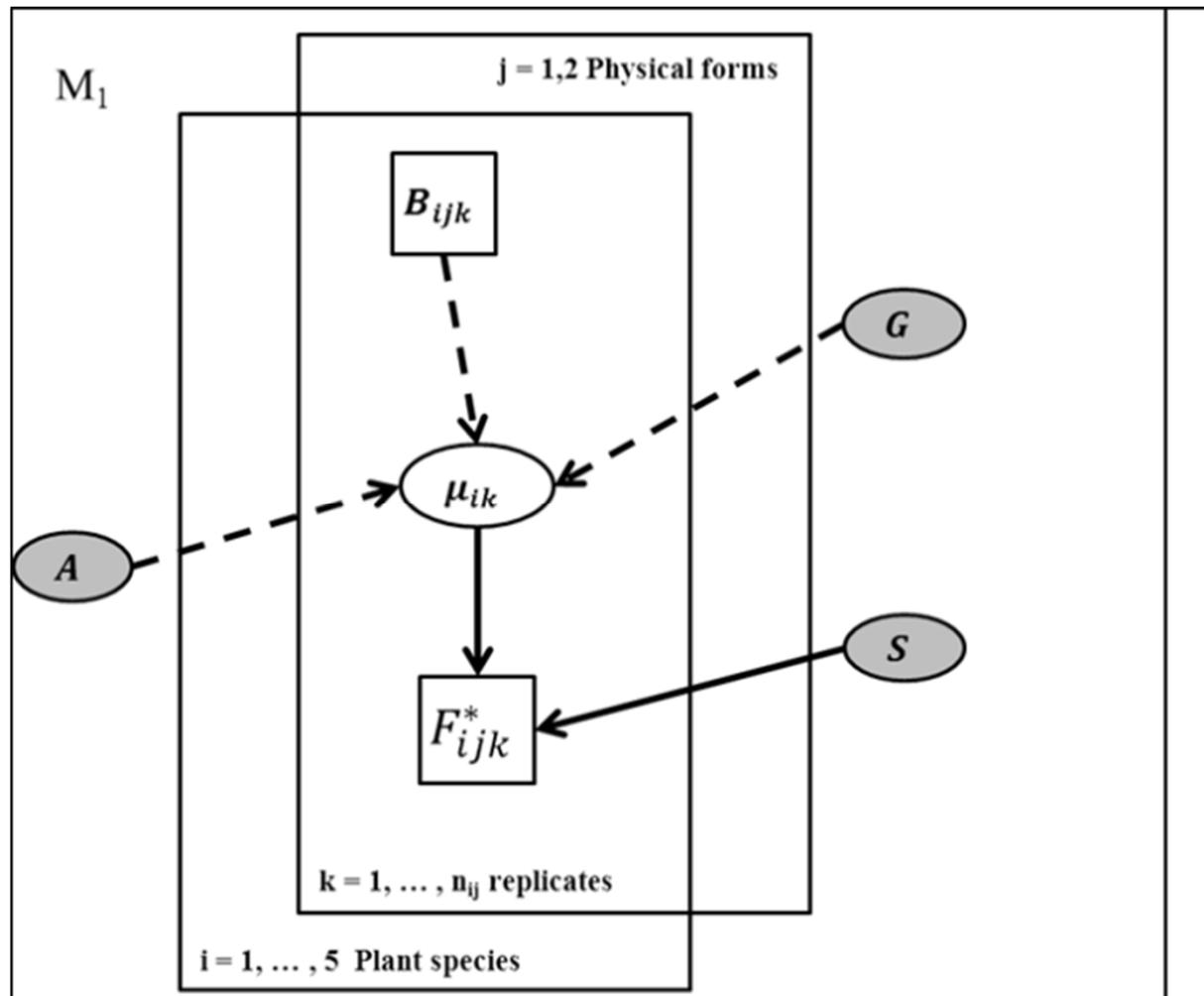
x

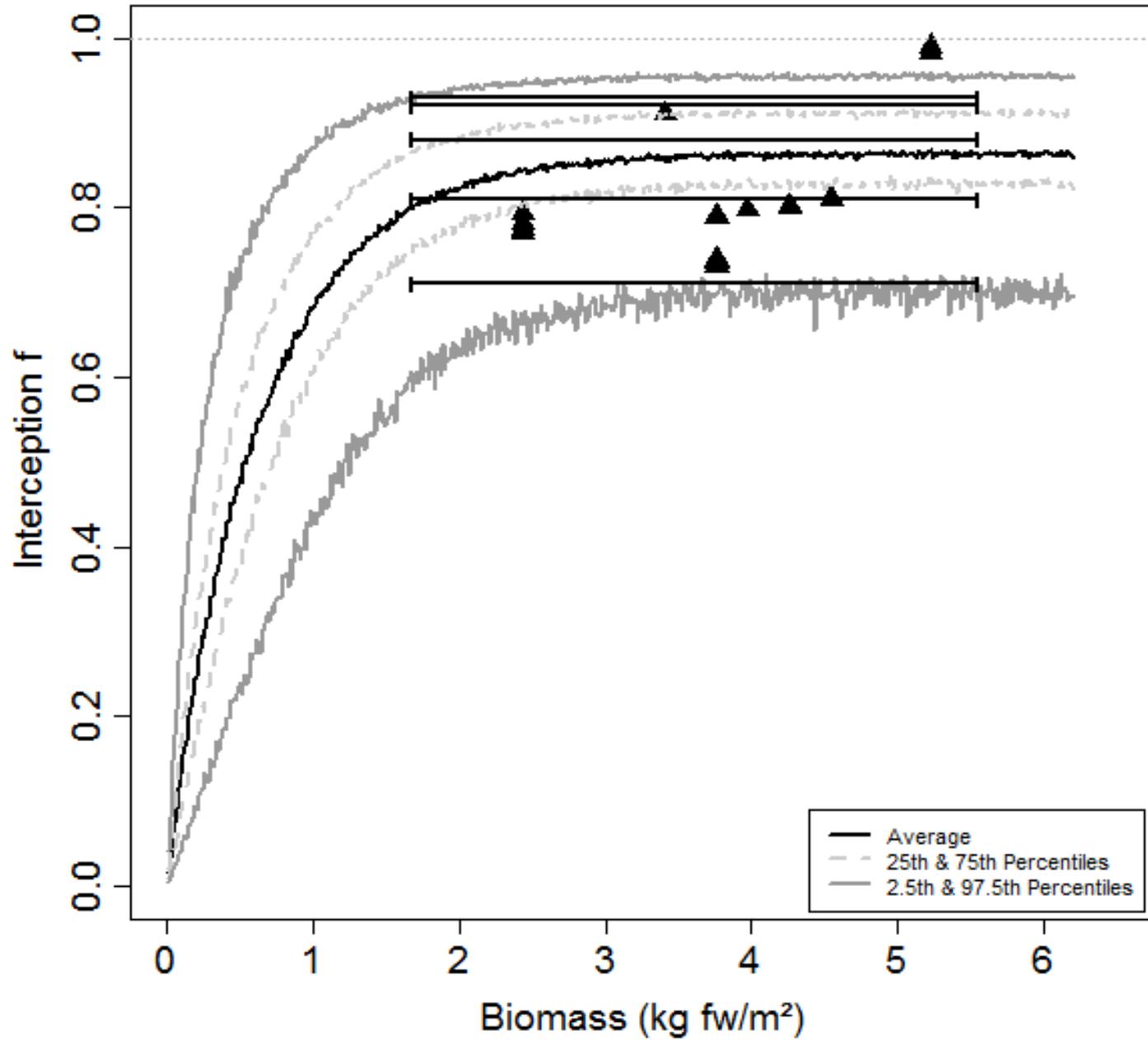
x



L/an







Plan

- **Contexte/terminologie** : exposition, risque, radioactivité, codes de calcul en radioécologie...
- **Modélisation physique** de la dispersion :
 - dans l'atmosphère
 - dans les cours d'eau
- **Modélisation empirique** des transferts (sol, faune, flore)
- Propagation **incertitude/variabilité**
- **Etude de cas**

Incertitude

L'incertitude représente notre manque de connaissance et inclut :

■ L'incertitude de scénario

Incertitude liée à la nécessaire sélection d'un (nombre limité de) processus
Erreur de description, erreur d'agrégation, analyse incomplète...

■ L'incertitude de modélisation

Incertitude liée à la nécessaire simplification des processus sélectionnés
Erreur de spécification ou d'utilisation d'une équation...

■ L'incertitude paramétrique

- Absence ou manque de connaissance sur la valeur d'un paramètre, susceptible d'être réduite par une augmentation de l'information.

Incertitude analytique (↓ si précision mesure ↑)

Incertitude d'échantillonnage (↓ si taille échantillon ↑)

o *Incertitude aléatoire, irréductible par la mesure → Variabilité*

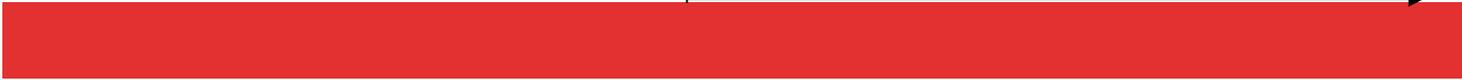
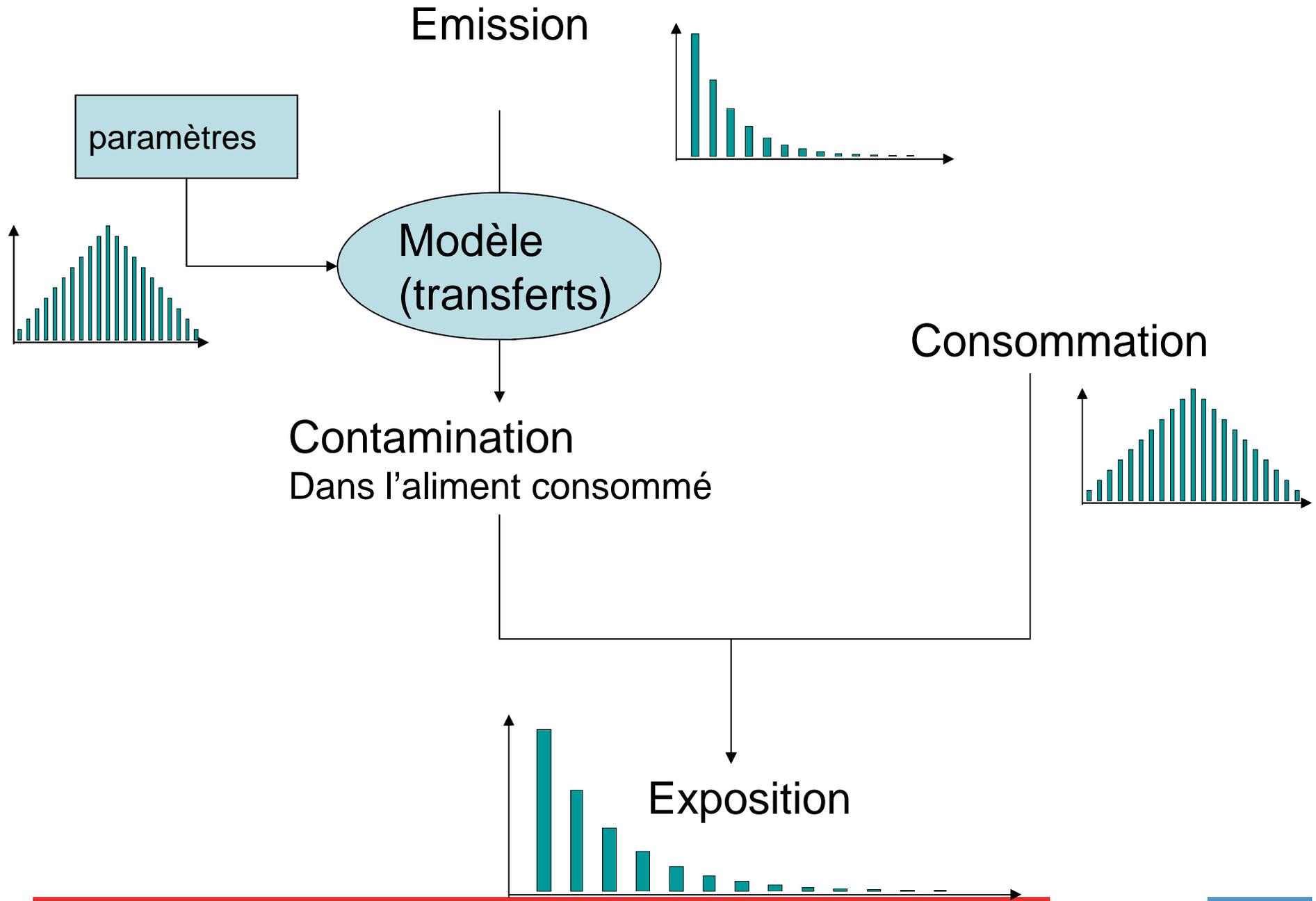
Variabilité

La variabilité représente l'hétérogénéité vraie qui est une conséquence du système physique/biologique étudié

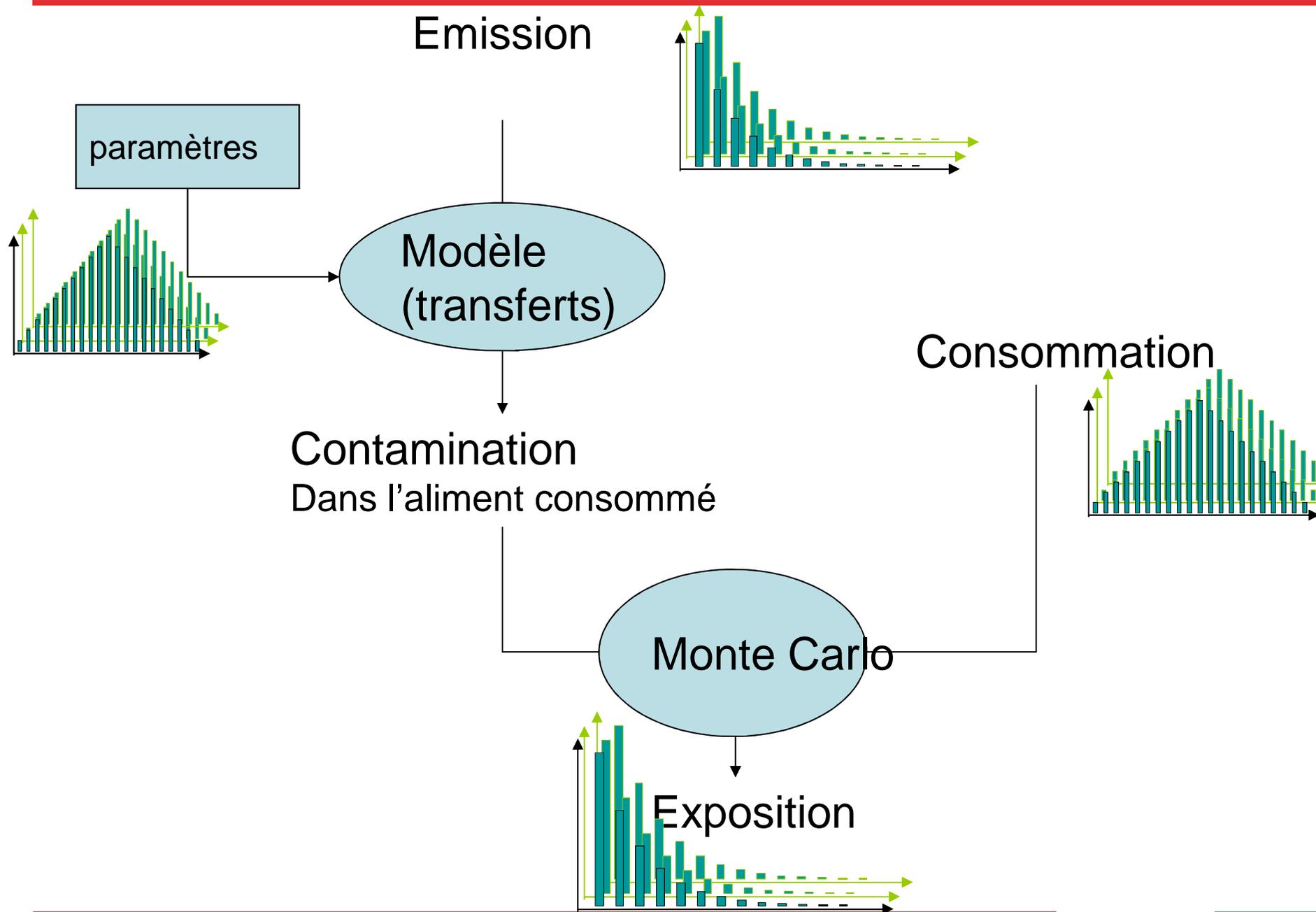
Elle est irréductible (mais mieux caractérisée) par l'augmentation de l'information (données supplémentaires, méthode plus précise...).

- Variabilité entre scénarios
- Variabilité paramétrique entre sous-populations ou sous-systèmes
 - Exemples des rations (auto)consommées. Différences entre classes d'âge ; entre styles de vie/lieux d'habitation...
- Variabilité paramétrique au sein d'un(e) (sous) population/système
 - Exemples: diversité des portions d'une personne à l'autre, d'un type de repas à un autre (toast de saumon fumé à un cocktail vs. entrée de réveillon)...

L'interprétation des résultats (surtout en gestion du risque) peut différer selon si incertitude et/ou variabilité sont pris en compte



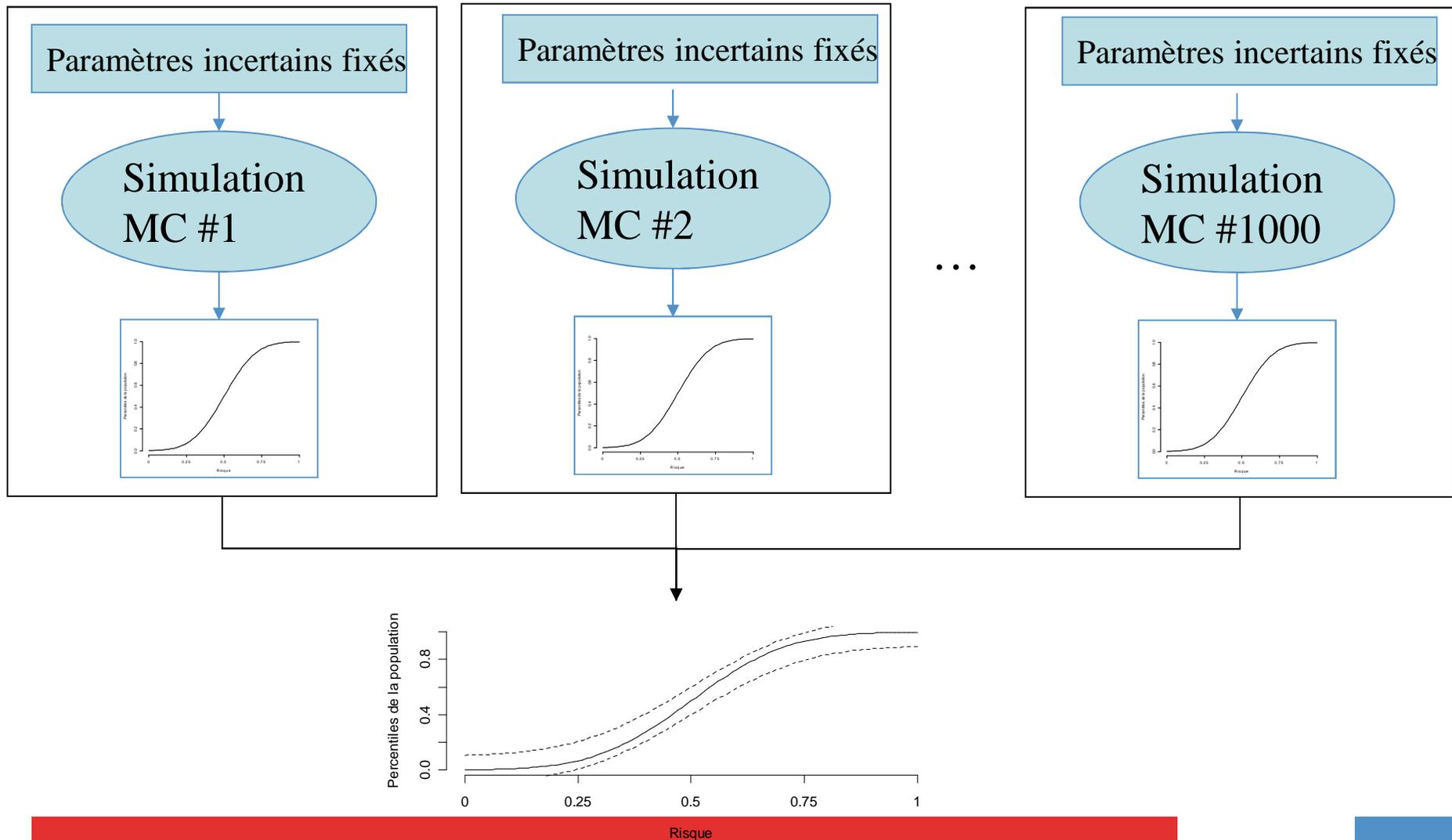
Incertitude et variabilité



Quels outils statistiques pour décrire l'incertitude et/ou la variabilité sur les entrées d'un tel modèle ?

- *Distribution « empiriques »*
- *Elicitation d'expert*
- *Méthodes possibilistes*
- *Méthode utilisant la vraisemblance (MLE, EM)*
- *Méthodes de rééchantillonnage (Bootstrap)*
- *Méthodes bayésiennes*

Monte Carlo à 2 dimensions



Plan

- **Contexte/terminologie** : exposition, risque, radioactivité, codes de calcul en radioécologie...
- **Modélisation physique** de la dispersion :
 - dans l'atmosphère
 - dans les cours d'eau
- **Modélisation empirique** des transferts (sol, faune, flore)
- Propagation **incertitude/variabilité**
- **Etude de cas**

Deriving PDFs from TRS 472 for SYMBIOSE probabilistic database

- To express uncertainty...
- ...about key element-dependant factors: CR, TF, Kd...
- ...for the multi-dimensional database of SYMBIOSE
 - 277 isotopes of 64 elements
 - 16 types of animals
 - 14 types of crops
 - 25 food products

How TECDOC 1616 was (initially) used

■ For each data set (1 input, 1 element) :

- n (size of the data set),
- min (minimal value),
- max (maximal value),
- GM (geometric Mean) if $n > 2$,
- GSD (geometric Standard Deviation) if $n > 2$.

■ Applied rules

- If $n \geq 10$, PDF=95%-truncated log normal (GM, GSD)
➤ entered as lognormal(min=2.5th percentile, max=97.5th percentile)
- If $2 < n < 10$, PDF= log uniform (min, max)
- If $n=0$ or $n=1$ or min=max, no PDF

Statistical justifications

■ Justification for the log-normal

- Theoretical: result of the multiplication of positive independent variables tends to a log-normal distribution
- Empirical: QQ-plot-like-graph with minimal and maximal values



QQ-plot-like-graph

Root transfer factors

-: minimal value

+: max. value

Statistical justifications

■ Justification for the log-normal

- Theoretical: result of the multiplication of positive independent variables tends to a log-normal distribution
- Empirical: QQ-plot-like-graph with minimal and maximal values

■ Fitting a data set without the data set

- Theoretical result: 'matching moments' method = 'Maximizing Likelihood Estimation' method for a normal distribution
- After logarithmic transformation, lognormal (GM, GSD) is then the theoretical best fit according to MLE

Incertitudes paramétriques

$$CR (L.kg^{-1} \text{ poids frais}) = \frac{\text{concentration organisme (Bq.kg}^{-1} \text{ poids frais)}}{\text{concentration eau (Bq.L}^{-1} \text{)}}$$

Quelques ordres de grandeur des incertitudes paramétriques :

Cs: Lognormal (GM=3000, GSD=2.6)

I: Lognormal (GM=650, GSD=2.1)

U: Lognormal (GM=2.4, GSD=11)

$$K_d = \frac{\text{concentration dans les sédiments (Bq.kg}^{-1} \text{ poids sec)}}{\text{concentration dans la phase dissoute (Bq.L}^{-1} \text{)}}$$

Quelques ordres de grandeur des incertitudes paramétriques :

Cs: Lognormal (GM=29000, GSD=5.9)

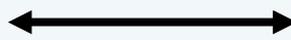
I: Lognormal (GM=4400, GSD=14)

U: Lognormal (GM=50, GSD=1.6)

Input	Definition	Unit	U/V/F	PDF or value	-
A_{river}	Activity in the raw water of the river stream	Bq.liter^{-1} $A_{\text{river}} \times CR_{\text{Fish}}$	F	1	-
CR_{fish}	Concentration ratio for freshwater fishes	liter.kg ⁻¹ fresh weight	U	Cs: Lognormal (GM=3000, GSD=2.6)	-
$Cons_{\text{fish}}$	Local river fishes consumption by humans	kg fresh weight.day ⁻¹	V	Empirical (from 0 to 20 100-gram-serving(s) per year)	-
DCC_{ing}	Dose coefficient conversion	nSv.Bq ⁻¹	F	¹³⁷ Cs: 13	-

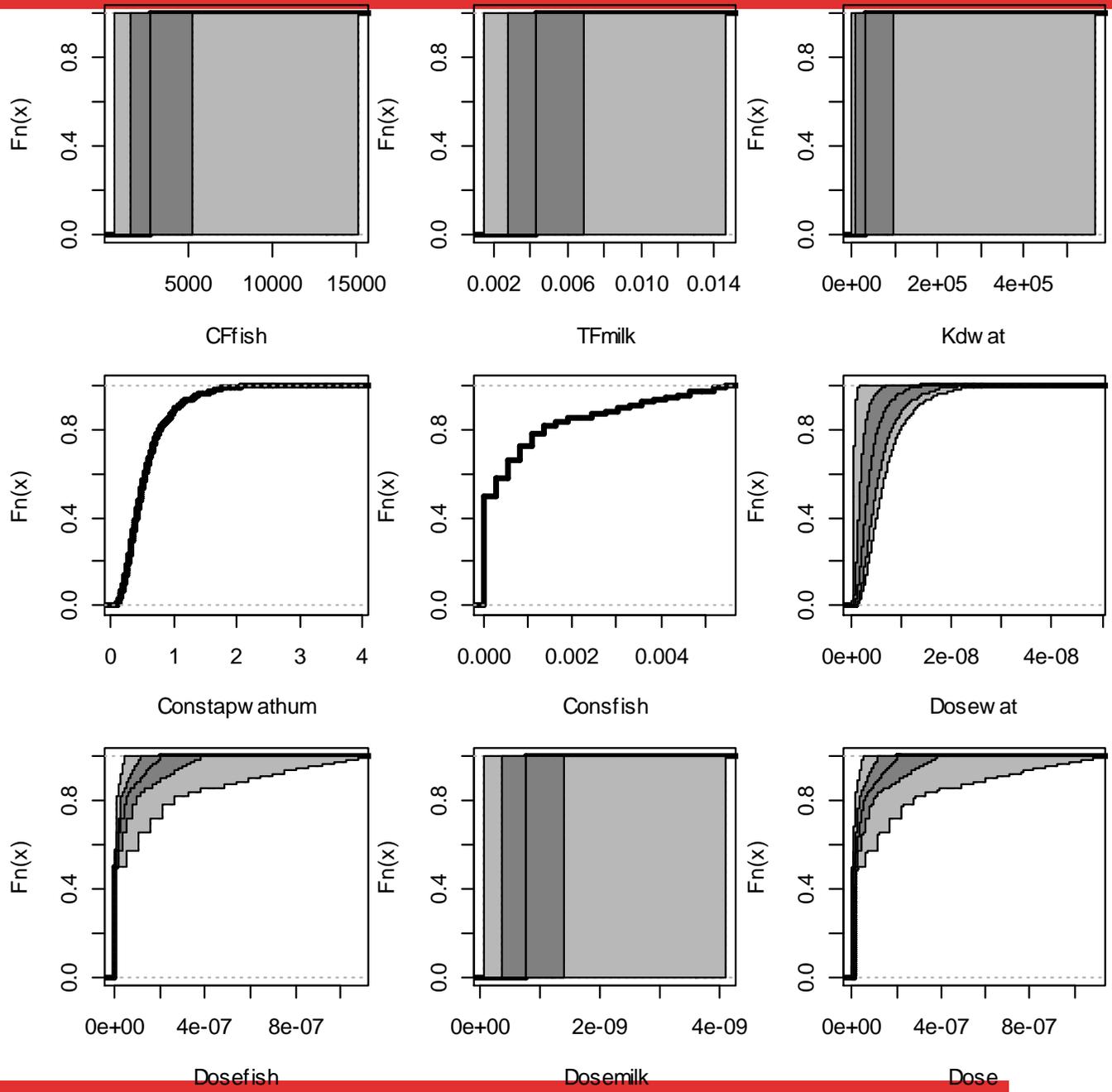
Output	Definition	Unit	U/V	Simplified formula
A_{fish}	Activity in the fishes taken from the river stream	Bq.kg fresh weight ⁻¹	U	$CR_{\text{fish}} \times A_{\text{river}}$
Ing_{fish}	Ingestion exposure (daily)	Bq.day ⁻¹	U&V	$Cons_{\text{fish}} \times A_{\text{fish}}$
$Dose_{\text{fish}}$	Ingestion dose (daily)	nSv.day ⁻¹	U&V	$Ing_{\text{fish}} \times DCC_{\text{ing}}$

Incertitude (paramétrique sur CR) et variabilité des consommations

Daily Dose nSv/jour par Bq/L	2.5%	25%	50%	75%	97.5%
	 Variabilité des consommations de poissons de rivières (presque 50% de non consommateurs)				
¹³⁷ Cs, Fish	0 [0; 0]	0 [0; 0]	11 [2; 52]	44 [9; 209]	202 [41; 965]
					

Effet de l'incertitude sur CR
(Monte Carlo)

```
library(mc2d)
ndvar(1001)
ndunc(1001)
Ariver <- 1
CFfish <- mcstoc(rlnorm, meanlog = log(3000), sdlog = log(2.6), type = "U", rtrunc =
TRUE, linf = 444, lsup = 20280)
Consfish <- mcstoc(rempiricalD, type = "V", values =
1/365000*c(rep(0,49),rep(100,8),rep(200,8),rep(300,7),rep(400,6),rep(500,4),
rep(600,3),700,800,900,(9:20)*100))
DCC <- 1.3e-8
Afish<-Ariver*CFfish
Ingfish<-Consfish*Afish
Dosefish<-Ingfish*DCC
EC <- mc(CFfish, Consfish, Dosefish)
summary(EC)
plot(EC)
```

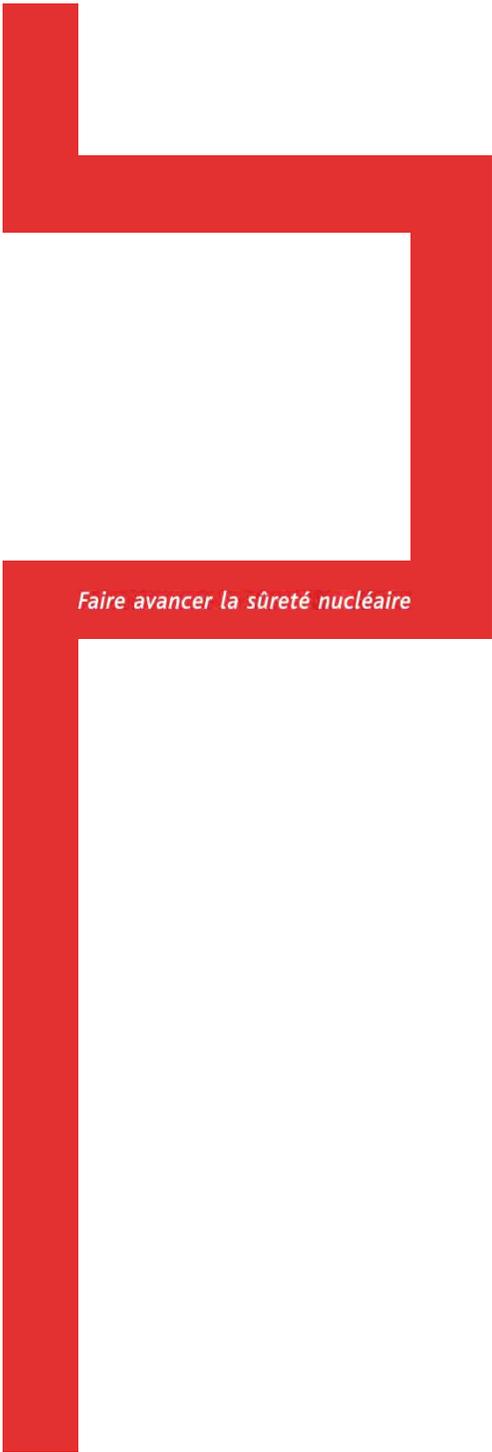




Conclusion

Le « meilleur modèle » n'existe pas sans connaître les contraintes :

- question posée, délai et niveau de réponse attendus
- disponibilité/qualité des données d'entrée en amont
- disponibilité éventuelle de données de validation en aval



Faire avancer la sûreté nucléaire

