

#### ECCOREV

# Modélisation des transferts de radionucléides dans les cours d'eau

CEREGE 22 février 2010

**P.Boyer - DEI/SECRE/LME** 

#### Modélisation des transferts de radionucléide dans les cours d'eau

- 1. Contexte et objectifs
- 2. Problématique générale
- 3. Modélisations opérationnelles



seule fois 2 neutrons et 2

protons.

<u>Radioactivité</u> : 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 sont trop plein d'énergie sous forme de rayonnements. Il se transforme en un autre isotope.



électron b<sup>-</sup> ou un positron b<sup>+</sup>.

*Le rayonnement gamma est un flux de photons.* 



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



#### **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...





Modélisation des transferts de radionucléide dans les cours d'eau - ECCOREV - 25 février 2010



### <u>Apports indirects</u>

- Ruissellement
- Nappe
- Dépôts atmosphériques

<u>Industries</u> non nucléaires

# **Industries nucléaires**

- Rejets radioactifs
- Rejets chimiques
- Rejets thermiques
- Modifications débits

• Usages domestiques

- Baignades
- Irrigations
- Navigation
- Consommation

Transferts et impacts

# Pourquoi modéliser les transferts dans les cours d'eau ?

Les cours d'eau sont des :

- Lignes de vie écologique, sociale et économique
- Ressources en eau, halieutique, énergétique...
- zones de biodiversité
- Collecteurs de leurs bassins versants

### La modélisation

- 1. Un outil d'optimisation et d'anticipation.
  - a) Préalable à l'évaluation de l'impact des futures activités.
  - b) Aide à la décision en situations de crise.
- 2. Une aide à l'interprétation des mesures et à la surveillance,

Modélisation des transferts de radionucléide dans les cours d'eau - ECCOREV - 25 février 2010



# **Objectifs de cette présentation**

Eau

(eau)

**Matières** 

(mat)

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



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

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

 $(kg \cdot m^{-3})$ 

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



 $(Bq \cdot m^{-3})$ 

 $(Bq \cdot m^{-3})$ 

RSI

 $(Bq \cdot kg_{se}^{-1})$ 

# **Problématique**



Modélisation des transferts de radionucléide dans les cours d'eau - ECCOREV - 25 février 2010

#### Décroissance et Filiations Radioactives

Transport et Dispersion

Échanges Solide – Liquide et Transferts Sédimentaires



#### **Modélisation** - Décroissance et filiations radioactives

Eléments	Période de décroissance radioactive	
<sup>137</sup> Cs	30,2 ans	
<sup>3</sup> H	12,3 ans	
<sup>60</sup> Co	5,3 ans	
<sup>54</sup> Mn	312 jours	
<sup>110m</sup> Ag	249,8 jours	
131	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.

$$\frac{\partial [A]_{j}}{\partial t} = -\lambda_{j} \cdot [A]_{j} + \sum_{i \neq j} \alpha_{i} \cdot \lambda_{i} \cdot [A]_{i} \quad \text{Avec}: \ \lambda_{i} = \frac{Ln(2)}{T_{i}}$$





Modélisation des transferts de radionucléide dans les cours d'eau - ECCOREV - 25 février 2010

#### Equation générale de transport - diffusion









#### Sources

Types Régimes	Ponctuel	Linéique	Surfacique
Instantané	Bq	Bq.m <sup>-1</sup>	Bq.m <sup>-2</sup>
Transitoire	Bq.s <sup>-1</sup>	Bq.s <sup>-1</sup> .m <sup>-1</sup>	Bq.s <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup>
Permanent			

#### Autres paramètres

- Quantité de mouvement
- Densité



Zone de mélange

• Sans hypothèse

$$\frac{\partial [A]_{col}^{x,y,t}}{\partial t} + u_{col}^{x,y,t} \cdot \frac{\partial [A]_{col}^{x,y,t}}{\partial x} + v_{col}^{x,y,t} \cdot \frac{\partial [A]_{col}^{x,y,t}}{\partial y} = \frac{1}{h_{col}^{x,y,t}} [\frac{\partial}{\partial x} (h_{col}^{x,y,t} \cdot \varepsilon_{tx}^{x,y,t} \cdot \frac{\partial [A]_{col}^{x,y,t}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (h_{col}^{x,y,t} \cdot \varepsilon_{ty}^{x,y,t} \cdot \frac{\partial [A]_{col}^{x,y,t}}{\partial y})] + \sigma_{riv}^{x,y,t}$$

$$\implies \text{Résolution numérique}$$

• <u>Régime hydraulique permanent et uniforme</u>

$$\begin{array}{l}
 \mathbf{Rejet instantan\acute{e}} \quad [A]_{col}^{x,y,t} = \frac{M_{col}^{x_0,y_0,t_0}}{h_{col} \cdot 4 \cdot \pi \cdot (t-t_0) \cdot \sqrt{\varepsilon_{tx} \cdot \varepsilon_{ty}}} \cdot e^{-\frac{[x-x_0-U\cdot(t-t_0)]^2}{4 \cdot \varepsilon_{tx} \cdot (t-t_0)}} \cdot e^{-\frac{[y-y_0]^2}{4 \cdot \varepsilon_{ty} \cdot (t-t_0)}} \\
 \mathbf{Rejet permanent} \quad [A]_{col}^{x,y,t} = \frac{q^{x_0,y_0}}{h_{col} \cdot \sqrt{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_{ty}} \cdot (x-x_0) \cdot \overline{U}}} \cdot e^{-\frac{(y-y_0)^2 \cdot \overline{U}}{4 \cdot \varepsilon_{ty} \cdot (x-x_0)}} \\
 \overline{\varepsilon_{ty}} \approx [0.15 ; 0.6] \cdot h_{col} \cdot u_* \quad \overline{\varepsilon_{tx}} \approx 0.6 \cdot h_{col} \cdot u_* \quad \text{Diffusivités turbulentes (m}^2.s^{-1}) \\
 u_* \approx 0.1 \cdot \overline{U} : \text{Vitesse de frottement (m.s^{-1})} \quad \overline{U} = \frac{Q}{SM}
\end{array}$$

Modèlisation des transferts de radionuclèide dans les cours d'eau - ECCOREV - 25 fèvrier 2010

### Zone de mélange

Milieu restreint  $\Rightarrow$  sources images virtuelles



$$[A]_{col}^{x,y,t} = [A]_{col}^{x,y,t}\Big|_{y_0} + [A]_{col}^{x,y,t}\Big|_{-y_0} + \sum_{n=1}^{N} [A]_{col}^{x,y,t}\Big|_{-2 \cdot n \cdot l - y_0} + [A]_{col}^{x,y,t}\Big|_{-2 \cdot n \cdot l + y_0} + [A]_{col}^{x,y,t}\Big|_{2 \cdot n \cdot l - y_0} + [A]_{col}^{x,y,t}\Big|_{2 \cdot n \cdot l + y_0}$$

IRSM

#### Zone de mélange





### Zone de bon mélange

Zone monodimensionnelle qui concerne la plus grande partie du cours d'eau.

$$\frac{\partial [A]_{col}}{\partial z} = \frac{\partial [A]_{col}}{\partial y} = 0 \implies \frac{\partial [A]_{col}^{x,t}}{\partial t} + U_{col}^{x,t} \cdot \frac{\partial [A]_{col}^{x,t}}{\partial x} = \frac{1}{SM_{col}^{x,t}} \cdot \frac{\partial}{\partial x} (SM_{col}^{x,t} \cdot D_{col}^{x,t} \cdot \frac{\partial [A]_{col}^{x,t}}{\partial x}) + \sigma_{col}^{x,t}$$

$$profondeur$$

$$\int_{0}^{0} \frac{1}{2} + U_{col}^{x,t} \cdot \frac{\partial [A]_{col}^{x,t}}{\partial x} = \frac{1}{SM_{col}^{x,t}} \cdot \frac{\partial}{\partial x} (SM_{col}^{x,t} \cdot D_{col}^{x,t} \cdot \frac{\partial [A]_{col}^{x,t}}{\partial x}) + \sigma_{col}^{x,t}$$

$$D_{col} \approx 6 \cdot h_{col} \cdot u_{*}$$

$$D_{col} \approx 6 \cdot h_{col} \cdot u_{*}$$

#### Sans hypothèses ⇒ Résolution numérique

• <u>Régime hydraulique permanent et uniforme</u>

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

• Modèle boite (pas de diffusion)

$$Q^{i-1,j} \cdot [A]_{col}^{i-1,j} \qquad \boxed{\frac{\partial [A]_{col}^{i,j} \cdot SM^{i,j} \cdot L^{i,j}}{\partial t}} \qquad \boxed{Q^{i,j} \cdot [A]_{col}^{i,j}} \\ \sigma^{i,j}_{riv}$$

• <u>Régime hydraulique permanent et uniforme et rejet permanent</u>

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

Modélisation des transferts de radionucléide dans les cours d'eau - ECCOREV - 25 février 2010

#### **EMRAS (AIEA) : Migration du <sup>3</sup>H dans le système Loire de juillet à décembre 1999**





#### EMRAS (AIEA) : Migration du <sup>3</sup>H dans le système Loire de juillet à décembre 1999





#### Incident SOCATRI – Juillet 2008



Modélisation des transferts de radionucléide dans les cours d'eau - ECCOREV - 25 février 2010

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

$$(Bq.m^{-3}) \qquad (Bq.m^{-3}) \qquad (kg.m^{-3}) \qquad (Bq.kg^{-1})$$

$$\begin{bmatrix} A \end{bmatrix}_{sed} = n \cdot \begin{bmatrix} A \end{bmatrix}_{sed}^{eau} + \rho_{mat} \cdot (1-n) \cdot \begin{bmatrix} A \end{bmatrix}_{sed}^{mat}$$

$$(Bq.m^{-3}) \qquad (Bq.m^{-3}) \qquad (kg.m^{-3}) \qquad (Bq.kg^{-1})$$

#### **Objectif :** Déterminer les fractionnements solide - liquide



#### Première approche

Hypothèses : Echanges réversibles et instantanés





#### Une approche opérationnelle pour les transferts sédimentaires

Cinétique d'accumulation (S<sup>-1</sup>)  

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

Cinétique d'élimination (S<sup>-1</sup>)

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

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

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

$$\lambda_{A}^{acc} = \frac{D_{mat} \cdot Kd_{col}}{h_{sed} \cdot (1 + [mat]_{col} \cdot Kd_{col})} \qquad \qquad \lambda_{A}^{eli} = \frac{D_{mat} \cdot Kd_{sed}^{*}}{h_{sed} \cdot (n_{sed} + \rho_{mat} \cdot (1 - n_{sed}) \cdot Kd_{sed}^{*})} + \lambda$$

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

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

Modélisation des transferts de radionucléide dans les cours d'eau - ECCOREV - 25 février 2010

Exemple d'application : simulation d'un rejet atmosphérique accidentel



Principaux mécanismes d'échanges des métaux dans la colonne d'eau

#### Adsorption/désorption



### Échange ionique



Ces échanges impliquent plusieurs mécanismes et cinétiques



# qui dépendent :

- des couples {métal ; particule},
- des conditions locales (pH, T, NaCl...),
- de la charge en suspension,
- des conditions d'écoulement...

0.025 **⊣ km²** Surface spécifique en 0.02 fonction du diamètre pour 1 kg de matière Échanges à l'interface solide - liquide  $\Rightarrow$  prépondérance 0.015 de la surface spécifique et donc de la granulométrie 0.01 0.005 0 Matériaux dans un cours d'eau 0.01 100 10000 μm Taille Dénomination Nature > 20 cm Blocs 20 cm à 2 cm Roche cohérente Galets et cailloux Non cohésifs 2 cm à 2 mm Graviers 2 mm à 64 µm Sables silice (opale, guartz,...) aluminosilicates non argileux (feldspaths, ...); 64 µm à 2 µm Limons (ou silt) silice (opale, quartz,...) oxydes métalliques ; argiles ; **Cohésifs** 2 µm à 0,45 µm Vases, boues matière organique 0,45 µm> Colloïdes oxydes métalliques ; substances humiques



Considérations géométriques pour ajuster le Kd en fonction de la taille



Influence des hétérogénéités réactives et dynamiques des matières



distance from the entry (km)

Modélisation des transferts de radionucléide dans les cours d'eau - ECCOREV - 25 février 2010

2

1

3

IRSN

8

9

10