

Gestion des aquifères pollués : vers des solutions innovantes

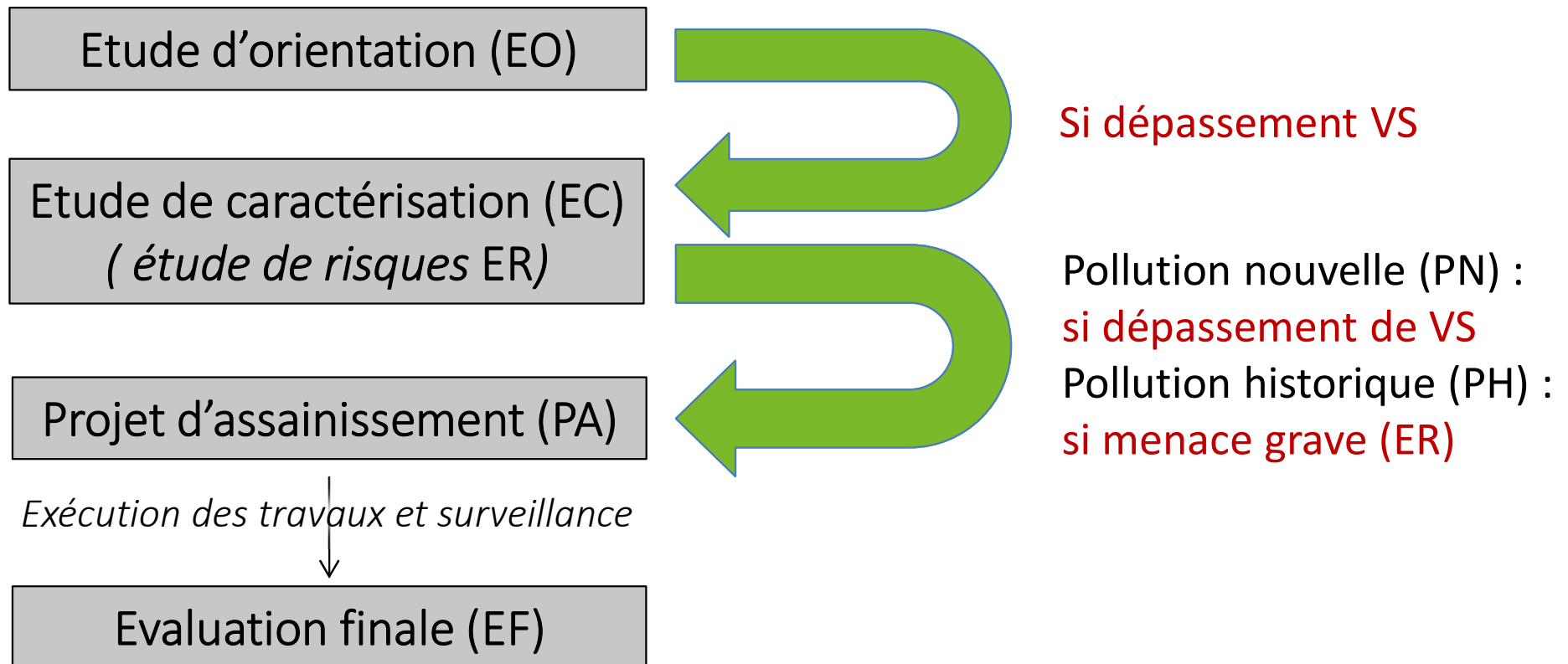
Serge Brouyère

Université de Liège, Groupe d'Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement

serge.brouyere@uliege.be



Mise en contexte : les études de sols pollués



Source: SPW-DAS, B.Dusart



Mise en contexte : les études de sols pollués

Caractérisation
Source(s) -
Cheminement(s)
- Récepteur(s)



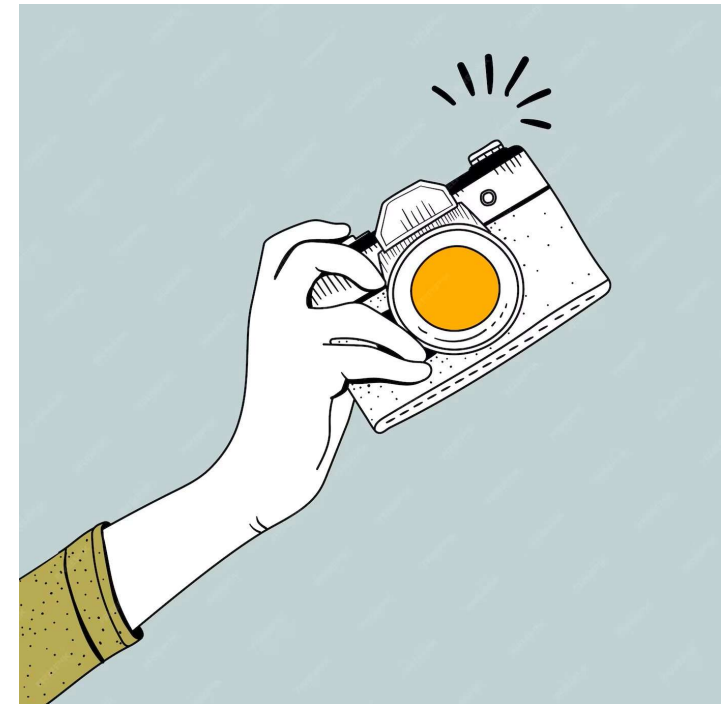
Étude
des risques



Plan
d'Assainissement

Le processus décisionnel prévalant pour la définition des investigations et les conclusions qui en découlent **repose sur des mesures de concentrations** en polluants dans le sol et dans l'eau souterraine...

... Et cela est bien compréhensible puisque **tout le système normatif est basé sur des concentrations** (normes de potabilité, écotoxicologiques ...)



<https://fr.freepik.com>



« Approche concentration » : ça coince où?

Elle nous amène parfois un peu à « *jouer aux fléchettes* » pour implanter des forages ...
Mais une fois encore, c'est bien logique puisque le cadre normatif nous impose en premier lieu de délimiter l'extension spatiale et verticale de la pollution ...

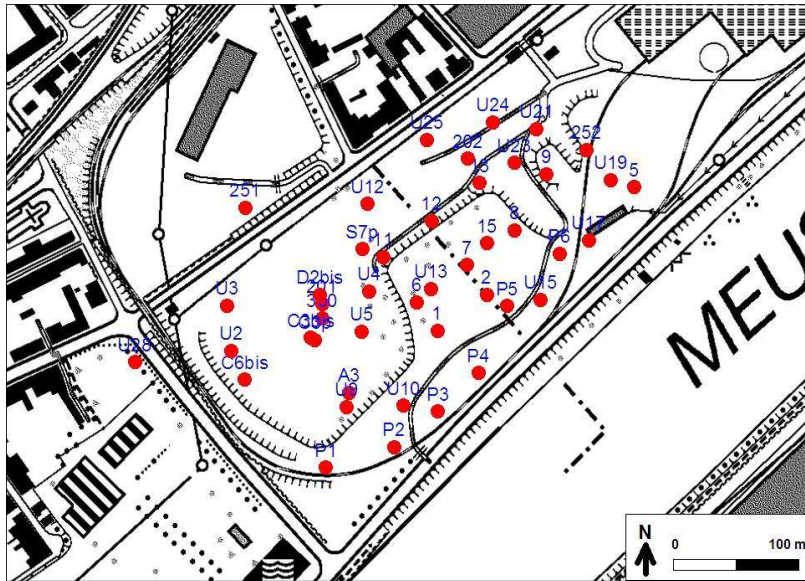
Conséquences =

1. On est fréquemment amenés à forer « dans toutes les directions »
2. Sur base de ces mesures de concentrations, on a fréquemment du mal à évaluer la dynamique temporelle du panache
3. On a tendance à “courir derrière” la pollution

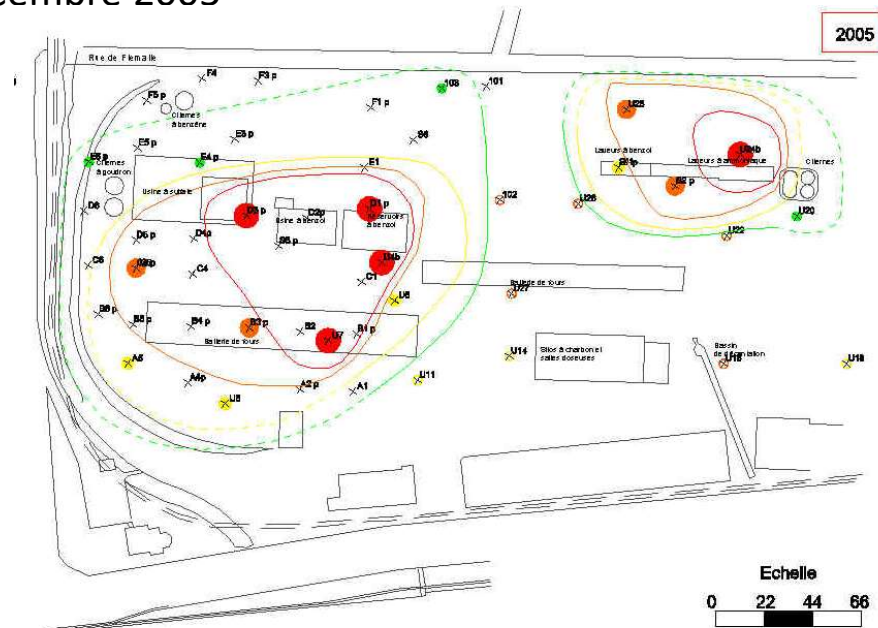




Pollution délimitée, oui ... Et pourtant, elle bouge!



Situation en
décembre 2005



	Nappe des graviers	Niveau sablo-silteux	Remblais
Nbre de piézomètres	44	41	20

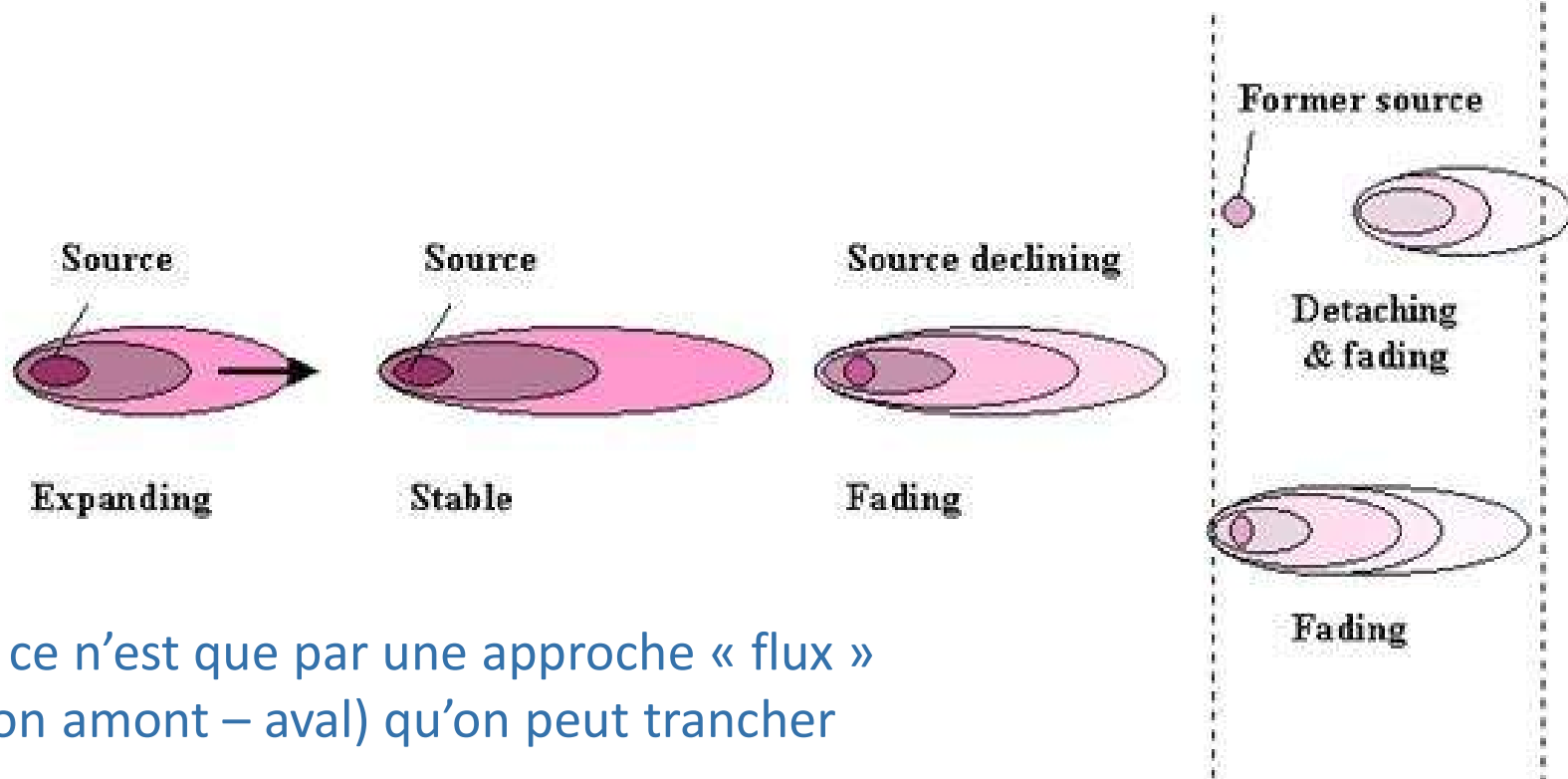
La pollution est délimitée mais a-t-elle un impact sur le cours d'eau voisin?

→ **besoin de déterminer la mobilité des polluants!**



Pollution délimitée, oui ... Et pourtant, elle bouge!

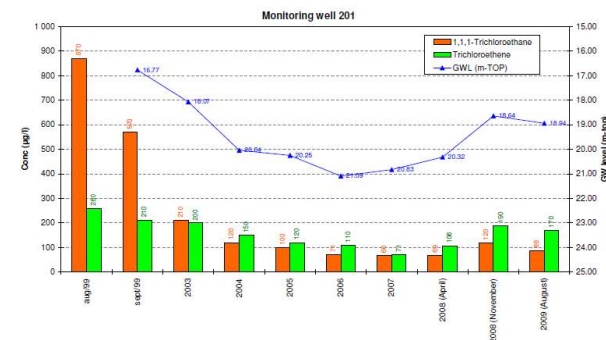
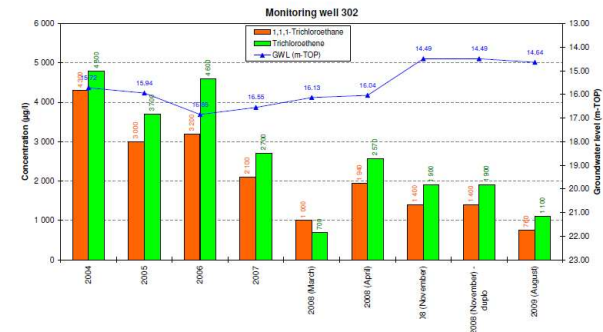
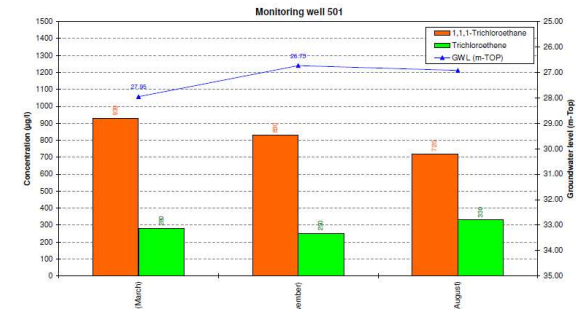
Mais un même panache peut correspondre à plusieurs cas de figures très contrastés, avec des conséquences potentiellement très différentes ...



A nouveau, ce n'est que par une approche « flux » (comparaison amont – aval) qu'on peut trancher



Elle court, elle court la pollution, oui mais jusqu'où?

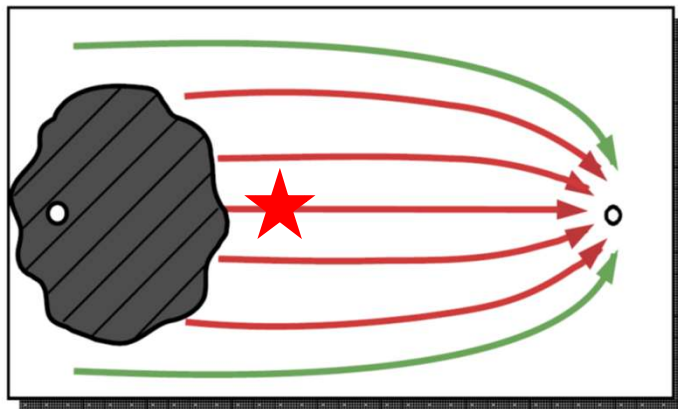




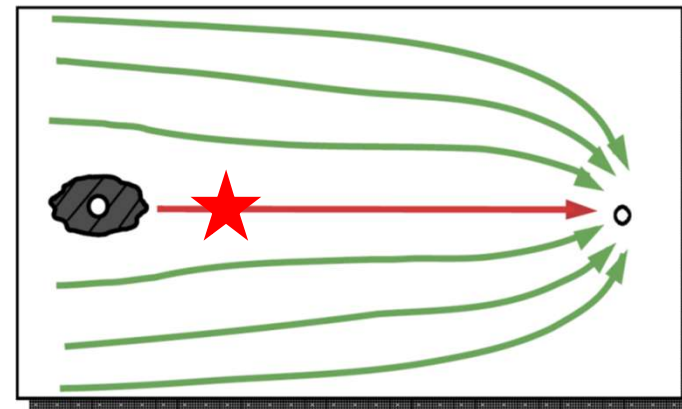
« Approche concentration » : ça coince où ?

Importance du volume de sol pollué

Case A: Large Release
High Max. Conc. and High Md



Case B: Small Release
High Max. Conc. and Low Md



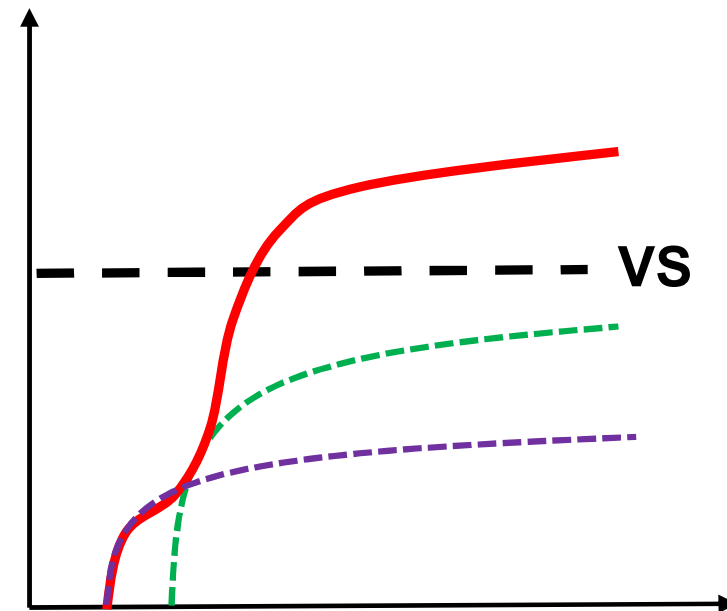
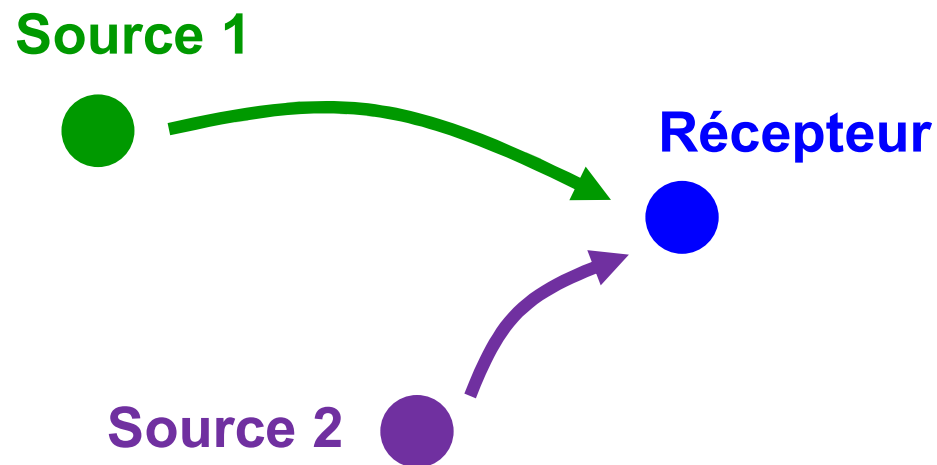
Source: ITRC Technology Overview Document
Use and Measurement of Mass Flux and Mass Discharge

Ce qui pose un problème, c'est la quantité (masse) de polluant qui est en jeu,
pas seulement sa concentration en tant que telle



« Approche concentration » : ça coince où ?

Problématique de l'additivité des tâches



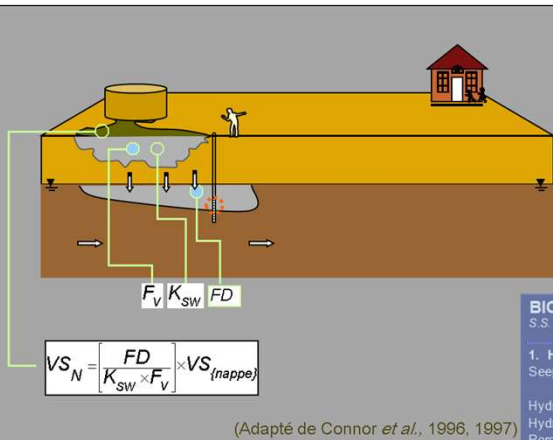
L'effet cumulé des quantités de polluants conduit à un dépassement du seuil,
pas les concentrations effectivement associées à chaque source prise individuellement



« Approche concentration » : où ça coince ?

Module lessivage puis module dispersion...

- VS_N : seuil de concentration pour le sol garantissant le respect à long terme du critère $VS_{(nappe)}$ compte tenu des risques de migration des polluants
- F_v : fraction contaminée de la zone non saturée (= 1 par défaut pour le calcul $VSN_{standard}$)
- K_{sw} : (inverse du) coefficient de partition sol-eau ($K_{sw} = 1/K_d^*$)
- FD : facteur de dilution (= 30 par défaut pour le calcul $VSN_{standard}$)



(Adapté de Connor *et al.*, 1996, 1997)

Problème:
par leur conception, les deux modules
ne s'articulent pas vraiment:
 C_{out} lessivage $\neq C_{in}$ dispersion

BIOSCREEN-AT Natural Attenuation Decision Support System
S.S. Papadopoulos & Associates, Inc. Version 1.43 M. Karanovic (Jul 2007)

1. HYDROGEOLOGY
Seepage Velocity* V_s 1609.08 (ft/yr)
Hydraulic Conductivity K 8.1E-03 (cm/sec)
Hydraulic Gradient i 0.048 (ft/ft)
Porosity n 0.25 (-)

2. DISPERSION
Longitudinal Dispersivity* α_x 28.503 (ft)
Transverse Dispersivity* α_y 2.850 (ft)
Vertical Dispersivity* α_z 0.000 (ft)
Estimated Plume Length L_p 1450 (ft)

3. ADSORPTION
Retardation Factor* R 1.2 (-)
Soil Bulk Density ρ_b 1.7 (kg/l)
Partition Coefficient K_{oc} 38 (L/kg)
Fraction Organic Carbon f_{oc} 8.0E-4 (-)

4. BIODEGRADATION
1st Order Decay Coeff* λ 6.9E+0 (per yr)
Solute Half-Life $t_{1/2}$ 0.10 (year)
or Instantaneous Reaction Model
Delta Oxygen* DO 5.78 (mg/L)
Delta Nitrate* NO_3 17 (mg/L)
Observed Ferrous Iron* Fe^{2+} 11.3 (mg/L)
Delta Sulfate* SO_4 100 (mg/L)
Observed Methane* CH_4 0.414 (mg/L)

5. GENERAL
Modeled Area Length* 1450 (ft)
Modeled Area Width* 320 (ft)
Simulation Time* 5.00 (yr)

6. SOURCE DATA
Source Thickness 10 (ft)
Source Width (ft) Conc. (mg/L)
100 9
Exponentially Decaying Conc.

7. FIELD DATA FOR COMPARISON
Concentration (mg/L) Dist. from Source (ft)
9.0 0 145 290 435 580 725 870 1015 1160 1305 1450

8. CHOOSE TYPE OF OUTPUT TO SEE:
RUN CENTERLINE RUN PLUME
View Centerline View Plume
View BIOSCREEN

Data Input Instructions:
1. Enter value directly... or
2. Calculate by filling in grey cells below. (To restore formulas, hit button below).
Variable* 20 Data used directly in model.
(Don't enter any data.)

Observed Centerline Concentrations at Monitoring Wells
If No Data Leave Blank or Enter "0"

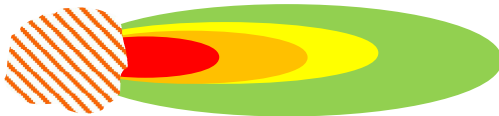
Buttons:
Recalculate This Sheet
Paste Example Dataset
Paste Dataset from BIOSCREEN
Restore Formulas for Vs,

Les études de risques nous confrontent aussi à des paradoxes quand on se base sur les concentrations ...

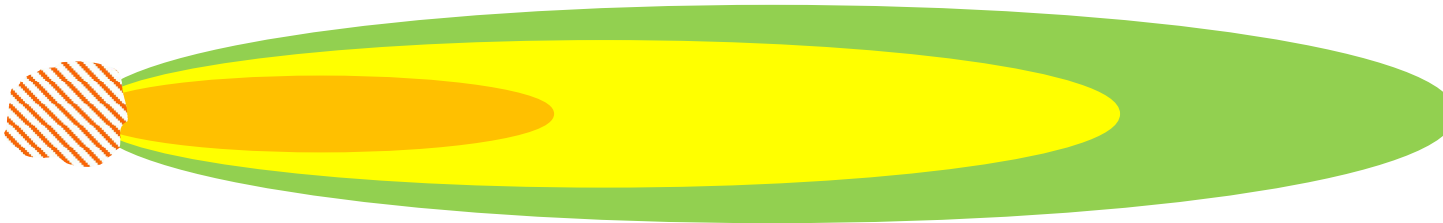


→ Le « paradoxe » du coefficient de dilution qui rend les aquifères perméables moins à risque ...

Aquifère « moins perméable » : $Q_{ESO} \ll \rightarrow$ panache moins étendu et plus concentré



Aquifère « plus perméable » : $Q_{ESO} \gg \rightarrow$ panache plus étendu et moins concentré

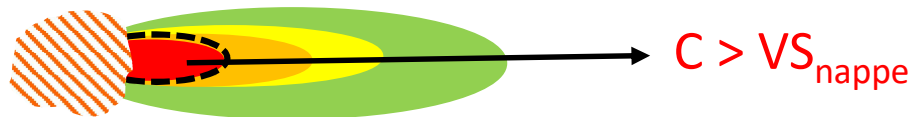


Les études de risques nous confrontent aussi à des paradoxes quand on se base sur les concentrations ...

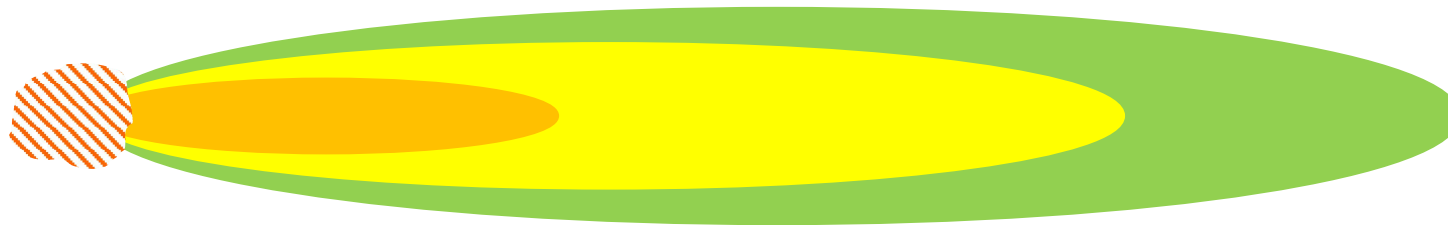


→ Le « paradoxe » du coefficient de dilution qui rend les aquifères perméables moins à risque ...

Aquifère « moins perméable » : $Q_{ESO} \ll \rightarrow$ panache moins étendu et plus concentré



Aquifère « plus perméable » : $Q_{ESO} \gg \rightarrow$ panache plus étendu et moins concentré



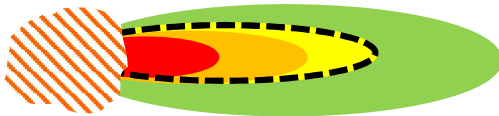
Si la VS_{nappe} correspond au rouge et au-delà (intérieur du contour en tirets noirs),
le 1^{er} cas de figure conduit à un risque avéré, le 2^{ème} pas...

Les études de risques nous confrontent aussi à des paradoxes quand on se base sur les concentrations ...

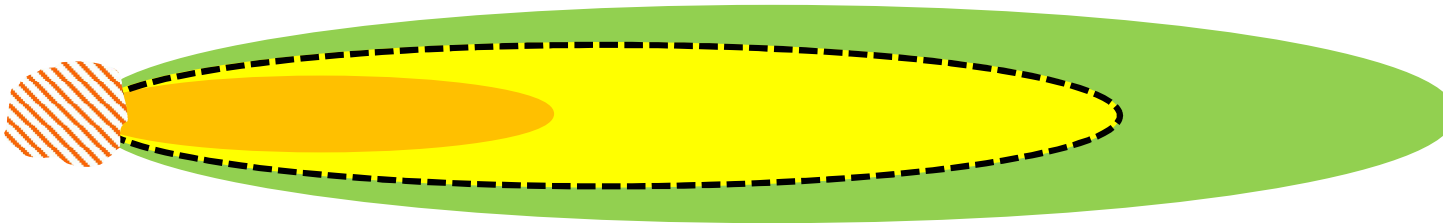


→ Le « paradoxe » du coefficient de dilution qui rend les aquifères perméables moins à risque ...

Aquifère « moins perméable » : $Q_{ESO} \ll \rightarrow$ panache moins étendu et plus concentré

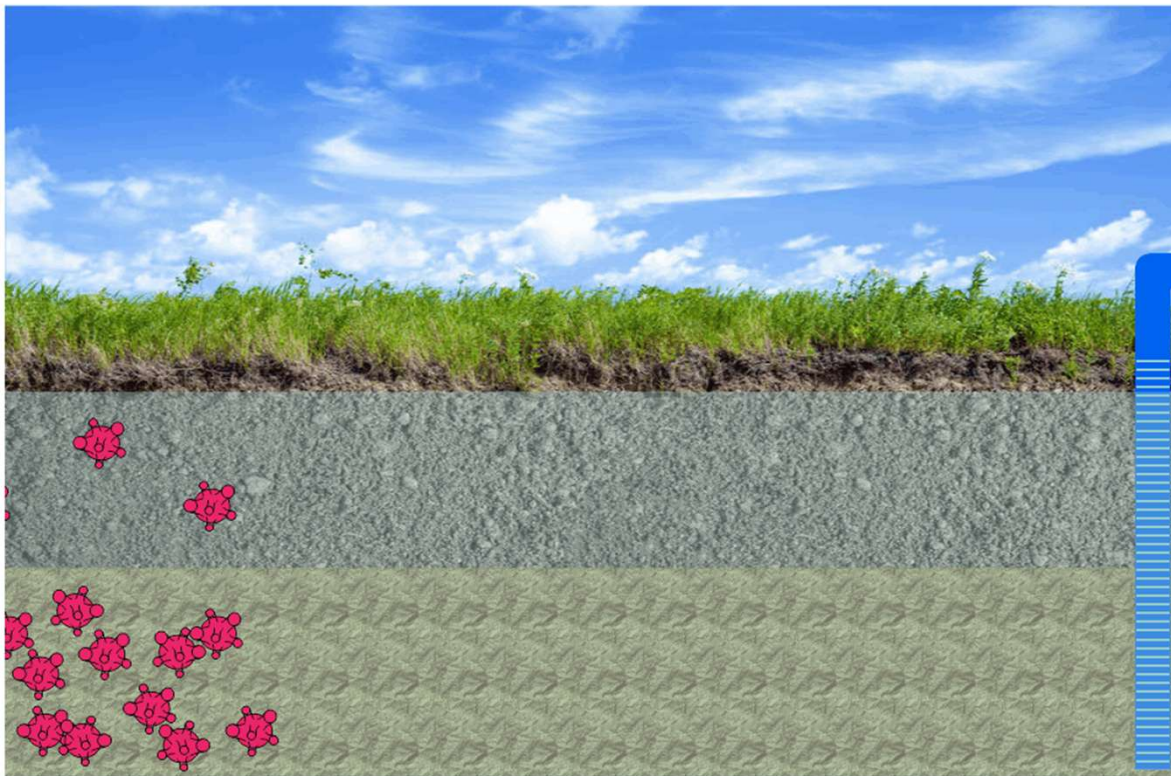


Aquifère « plus perméable » : $Q_{ESO} \gg \rightarrow$ panache plus étendu et moins concentré



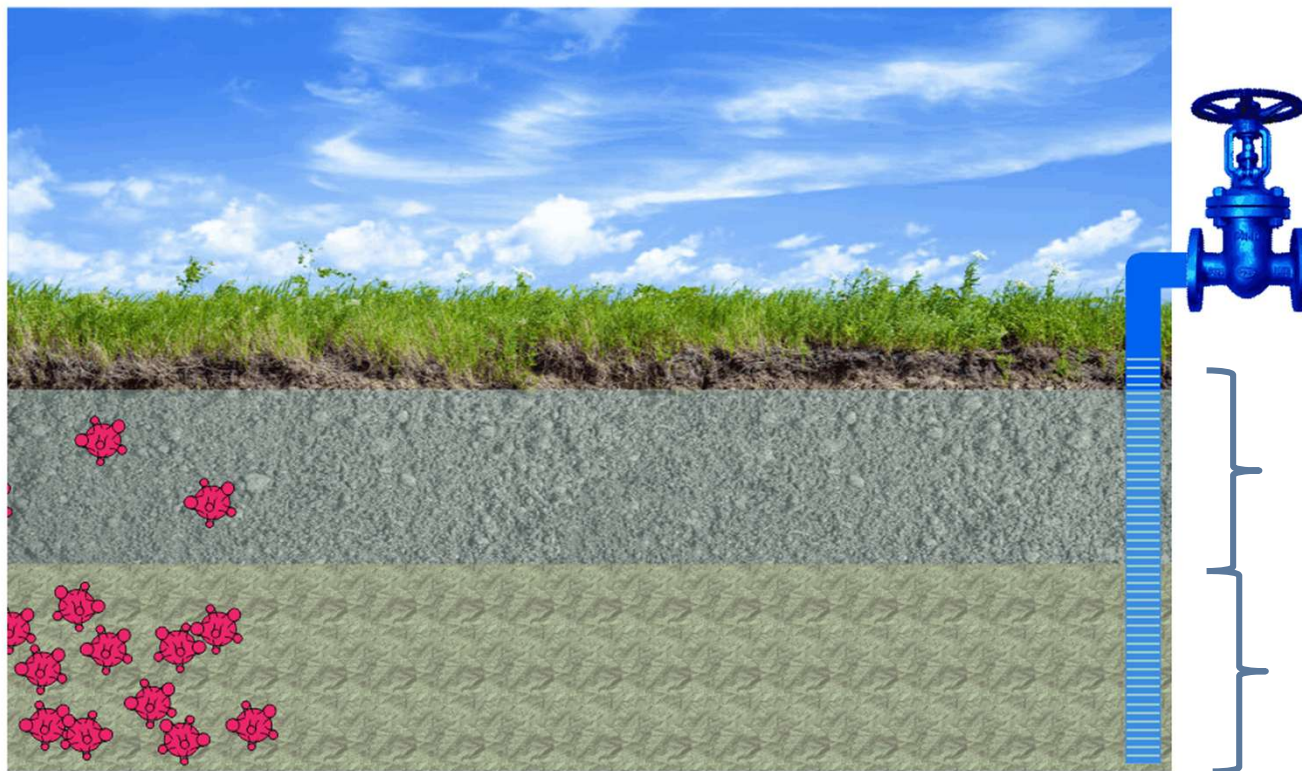
Si la VS_{nappe} correspond au jaune et au-delà (intérieur du contour en tirets noir),
le volume d'eau dégradée est plus important dans le 2^{ème} cas, même si les concentrations sont moins élevées!

Les études de risques nous confrontent aussi à des paradoxes quand on se base sur les concentrations ...



Source image et animation : P. Jamin, Nagaré

Les études de risques nous confrontent aussi à des paradoxes quand on se base sur les concentrations ...



Ce qui pose problème, ce sont les polluants qui bougent (vers la nappe puis dans la nappe)

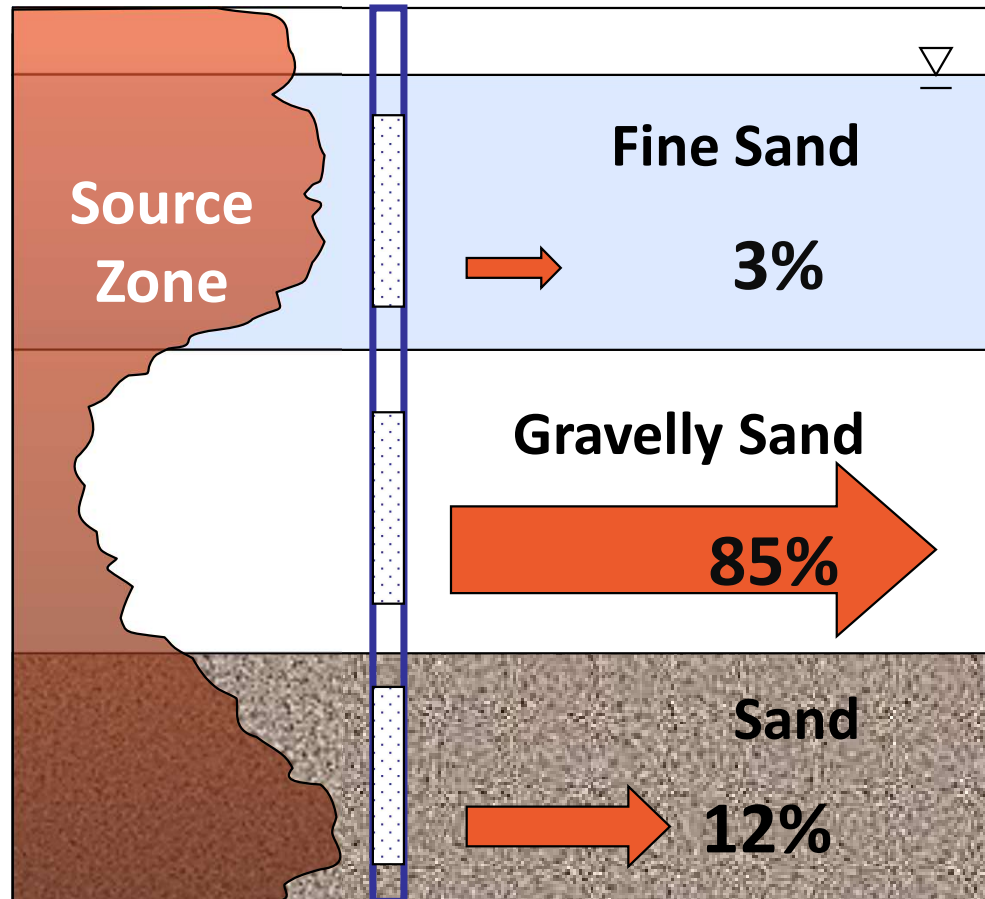
Flux élevé, risque élevé

Flux faible, risque faible

Source image et animation : P. Jamin, Nagaré



Flux massiques versus concentrations



$$\text{Mass Flux } (J) = qC = KiC$$

$$K = 1.0 \text{ m/day}$$

$$i = 0.003 \text{ m/m}$$

$$C = 10,000 \text{ } \mu\text{g/L}$$

$$\text{Mass Flux} = 0.03 \text{ g/m}^2/\text{day}$$

$$K = 33.3 \text{ m/day}$$

$$i = 0.003 \text{ m/m}$$

$$C = 10,000 \text{ } \mu\text{g/L}$$

$$\text{Mass Flux} = 1 \text{ g/m}^2/\text{day}$$

$$K = 5.0 \text{ m/day}$$

$$i = 0.003 \text{ m/m}$$

$$C = 10,000 \text{ } \mu\text{g/L}$$

$$\text{Mass Flux} = 0.15 \text{ g/m}^2/\text{day}$$



Retour au contexte des études de sols pollués

Caractérisation
Source(s) -
Cheminement(s)
- Récepteur(s)



Étude
des risques



Plan
d'Assainissement

Si on souhaite voir comment tout cela évolue au cours du temps, on doit disposer **d'un film** et donc d'informations sur la mobilité de l'eau et des polluants

→ besoin de quantifier, par des approches complémentaires, **les flux d'eau et de polluants** et leur dynamique temporelle



<https://fr.freepik.com>

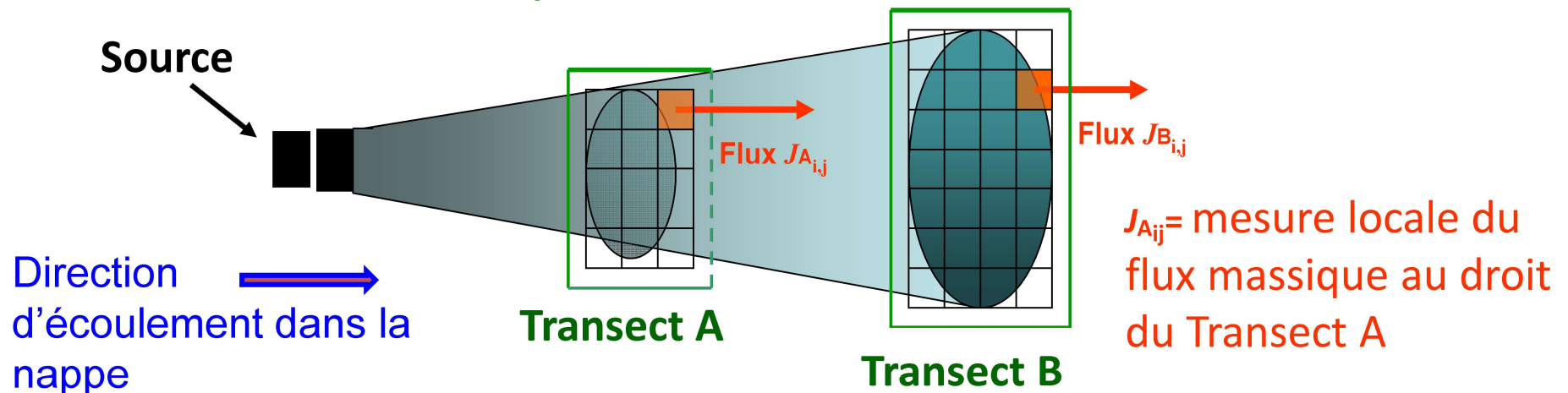


Qu'entend-on par flux?

- **Flux massique de polluant (JA_{ij})**

- Quantité de polluant qui transite localement par unité de surface (A_{ij}) à travers un transect (*panneau de contrôle*) recoupant le panache de polluant (unités= $M.L^{-2}.T^{-1}$)
- Mesure locale de la quantité de polluant qui circule

Flux massique à travers divers transects



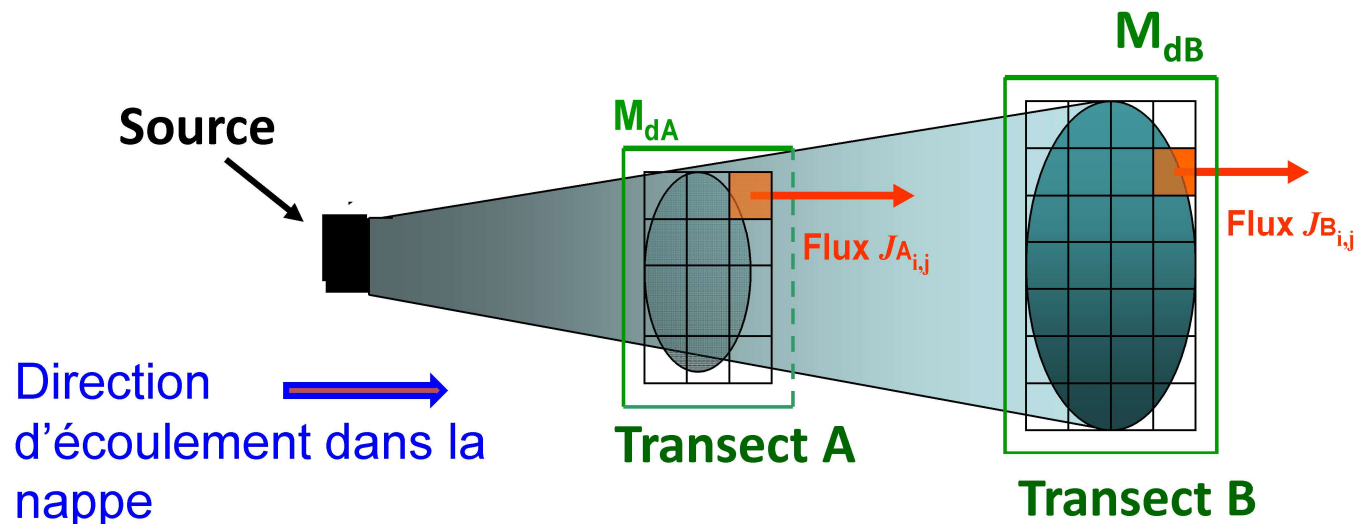
Source image : https://maf-1.itrcweb.org/2-concept-and-theory-of-mass-flux-and-mass-discharge/#2_1



Qu'entend-on par flux?

- **Débit massique de polluant (M_d)** (*mass discharge*)

- Intégrale à l'échelle du transect des flux massiques
- Masse de polluant en transit par unité de temps [M.T⁻¹]
- Mesure globale de la quantité de polluant qui circule
- Indicateur de la “puissance globale” de la source ou du panache



$$M_d = \int_A J_c dA$$

M_{dA} = débit massique à travers le transect A

$$M_{dA} = \sum [J_{a_{ij}} \times A_{ij}]$$

Source image : https://maf-1.itrcweb.org/2-concept-and-theory-of-mass-flux-and-mass-discharge/#2_1

Dans tous les cas de figures évoqués, l'approche flux est la solution...



Pollution délimitée, oui ... Et pourtant, elle bouge!



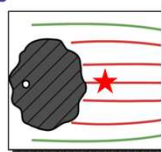
Situation en décembre 2005

2005

« Approche concentration » : où ça coince ?

Importance du volume de sol pollué

Case A: Large Re
High Max. Conc. and



Source: ITRC Technology Overview Do
Use and Measurement of Mass Flux at

Ce qui pose un problème,
pas seulement sa concent

Des solu

Nappe des
graviers sal
Nbre de
piézomètres
44

La pollution est délir
→ besoin de déterm

« Approche concentration » : où ça coince ?

Problématique de l'additivité des tâches

Source 1



Source 2

L'effet cumulé des quantités c
pas les concentrations effectiv

Des solu

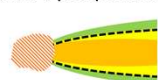
Les études de risques nous confrontent aussi à des paradoxes quand on se base sur les concentrations ...

→ Le « paradoxe » du coefficient de dilution qui rend les aquifères perméables moins à risque ...

Aquifère « moins perméable »



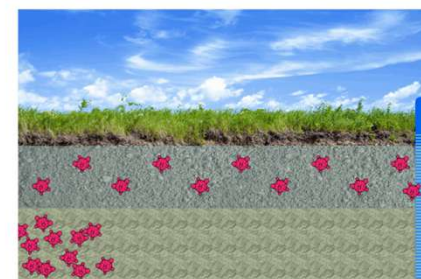
Aquifère « plus perméable »



Si la VS_{nappe} correspond
le volume d'ESO dégrad
sont moins élevées!

« Approche concentration » : où ça coince ?

Les approches basées sur les concentrations ont leurs limites...



Ce qui pose problème,
ce sont les polluants qui
bougent (vers la nappe
puis dans la nappe)

Source image et animation : P. Jamin, Nagaré

Des solutions innovantes pour la gestion des aquifères pollués

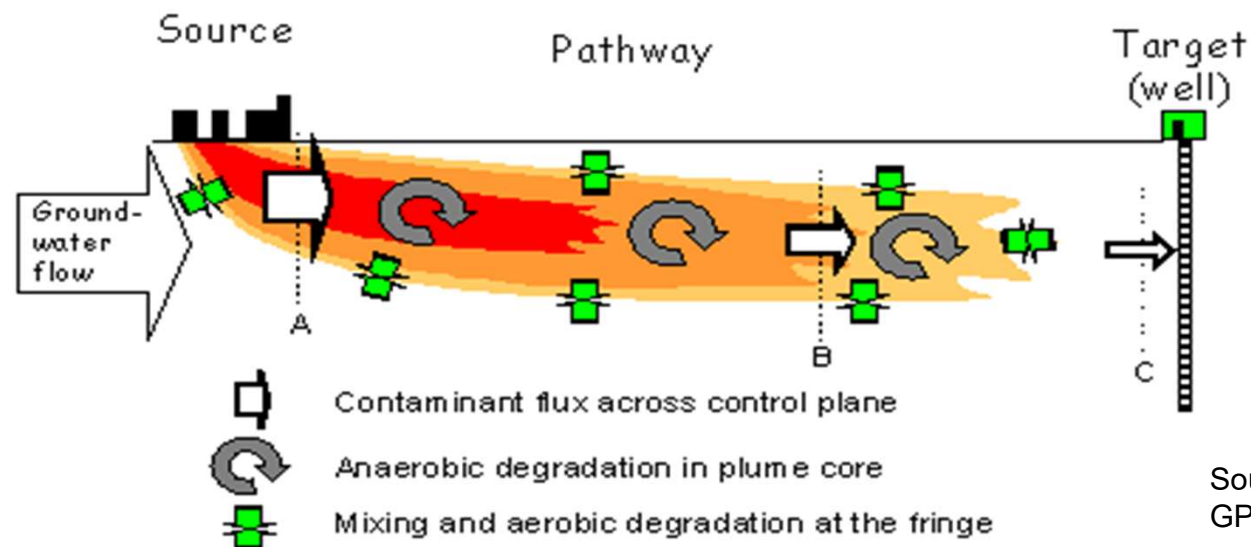
15



Au niveau du PA aussi il y a des besoins...

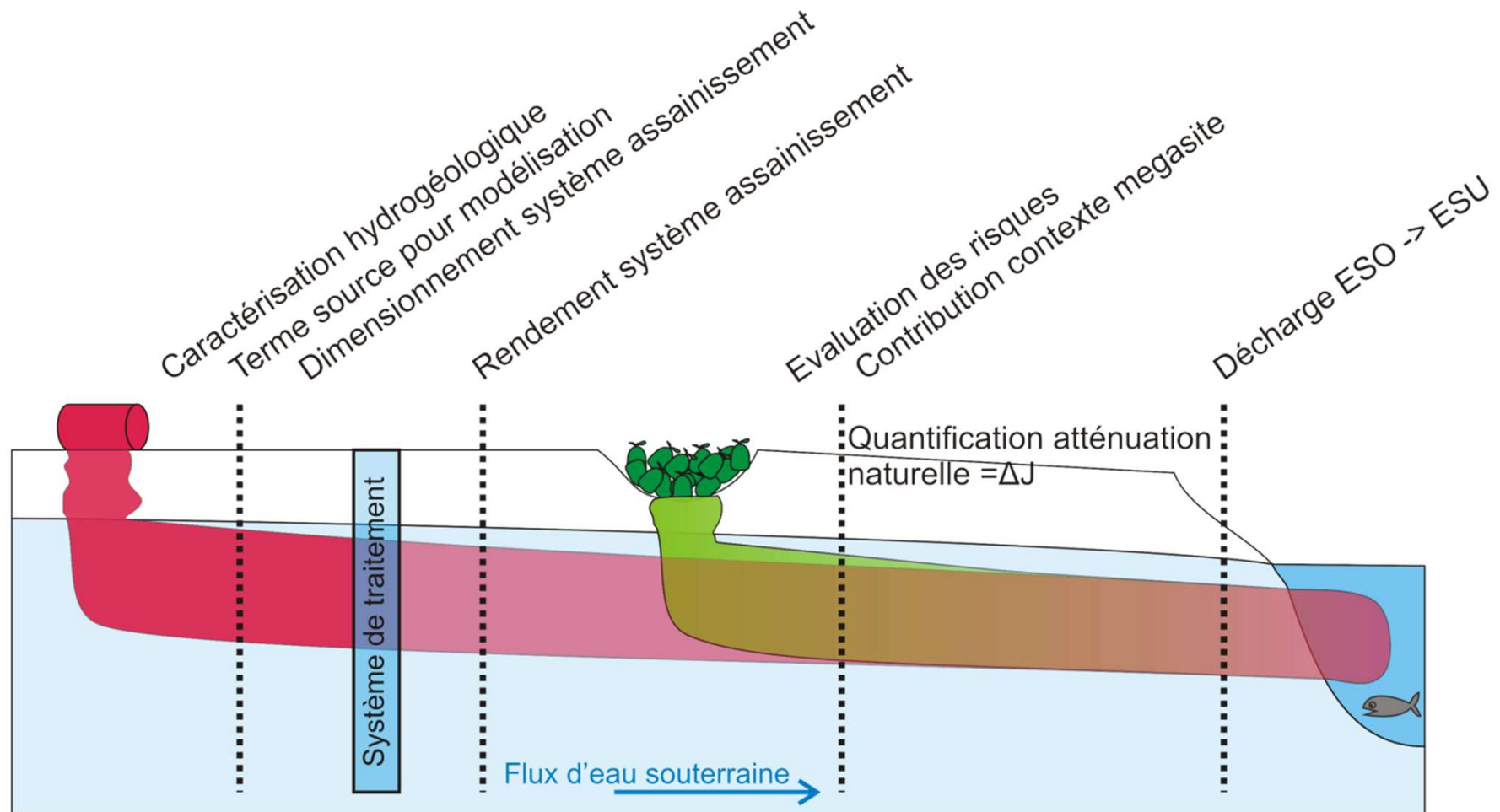
L'efficacité d'un assainissement in situ repose sur une bonne connaissance du milieu souterrain, des flux d'eau, de polluants et d'éventuels co-réactifs (naturellement présents ou injectés)

Ex: Atténuation naturelle contrôlée de produits pétroliers:
balance entre le flux de polluant et taux de dégradation



Source image:
GPRG Sheffield

Mesures des flux massiques : intérêt et applications



Merci pour votre attention

Serge Brouyère

Université de Liège,
Hydrogéologie & Géologie de l'Environnement
Quartier Polytech 1, Bât. B52/3
Allée de la Découverte, 9
4000 Sart Tilman



Serge.brouyere@uliege.be - +32 43 66 23 77
<https://www.linkedin.com/in/serge-brouy%C3%A8re-89640510/>

Flux massiques versus concentrations



1. Flux d'eau (flux de Darcy) : $q_D = K \times i$ [L.T⁻¹] ou [L³.L⁻².T⁻¹]

2. Concentration Moyenne : C_{avg} [M/L³]

3. Flux massique: $J = q_D \times C_{avg}$ [M.L⁻².T⁻¹]

