Quantification du lessivage des PFAS depuis le sol et la zone non saturée vers les eaux souterraines

Daniel Hunkeler, Francesco Scalottini und Nathan Claret
Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie (CHYN), Université de Neuchâtel
Ilka Wallis
National Center for Groundwater Research and Training, Adelaide, Australia

Biel/Bienne 21.10.2026

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

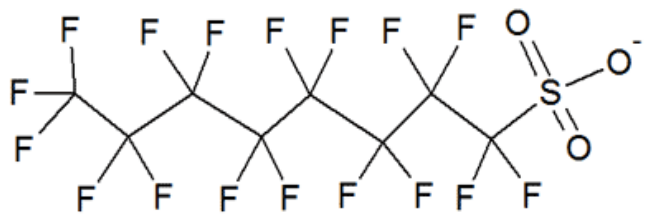
Bundesamt für Umwelt BAFU

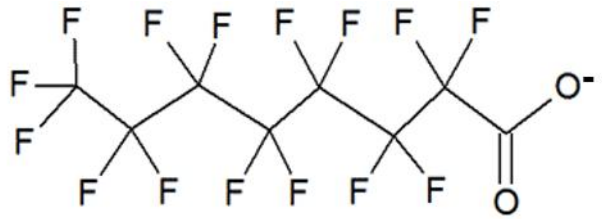
unine
Université de Neuchâtel

PFAS – Potentiel de mobilisation à partir du sol et de la zone non-saturée

- **Approches classiques dans le contexte de la gestion des sites contaminés**
  - Calcul de la concentration dans l'eau interstitielle à partir de la teneur totale
  - Essai en colonne conformément à l'Osites
  - Modélisation, p. ex. avec TransSim
- **Applicable aux PFAS ?**

PFOS





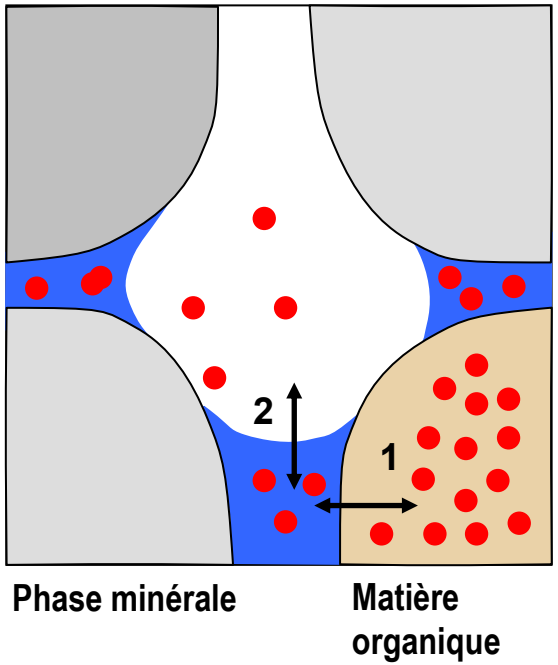
PFOA



hydrophob **hydrophil**

unine
Université de Neuchâtel

Quelles sont les spécificités des PFAS par rapport aux contaminants « classiques » ?



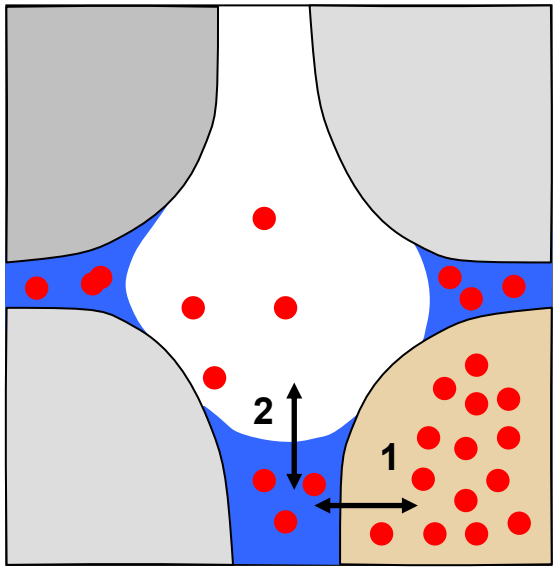
Processus de distribution – approache classique

1 Répartition eau – phase solide: $\mathbf{K_d = K_{OC} \cdot f_{OC}}$

➔ **Sorption sur la matière organique naturelle**

2 Partition entre l'air interstitiel et l'eau: K_h Loi de Henry

Quelles sont les spécificités des PFAS par rapport aux contaminants « classiques » ?

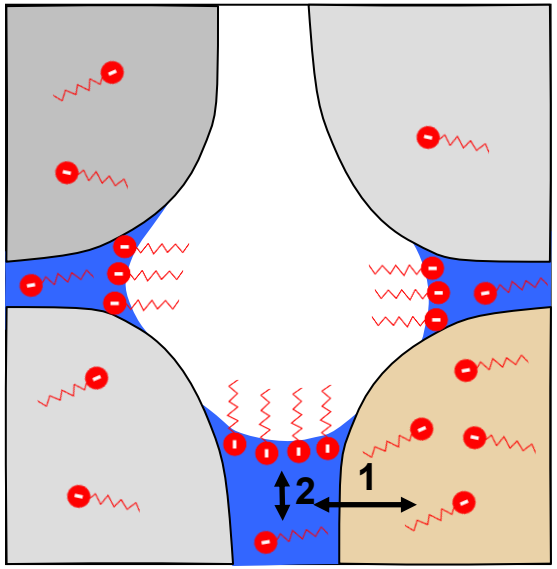


Processus de distribution – approache classique

1 Répartition eau – phase solide: $K_d = K_{OC} \cdot f_{OC}$

➔ **Sorption sur la matière organique naturelle**

2 Partition entre l'air interstitiel et l'eau: K_h Loi de Henry



Processus de distribution - PFAS

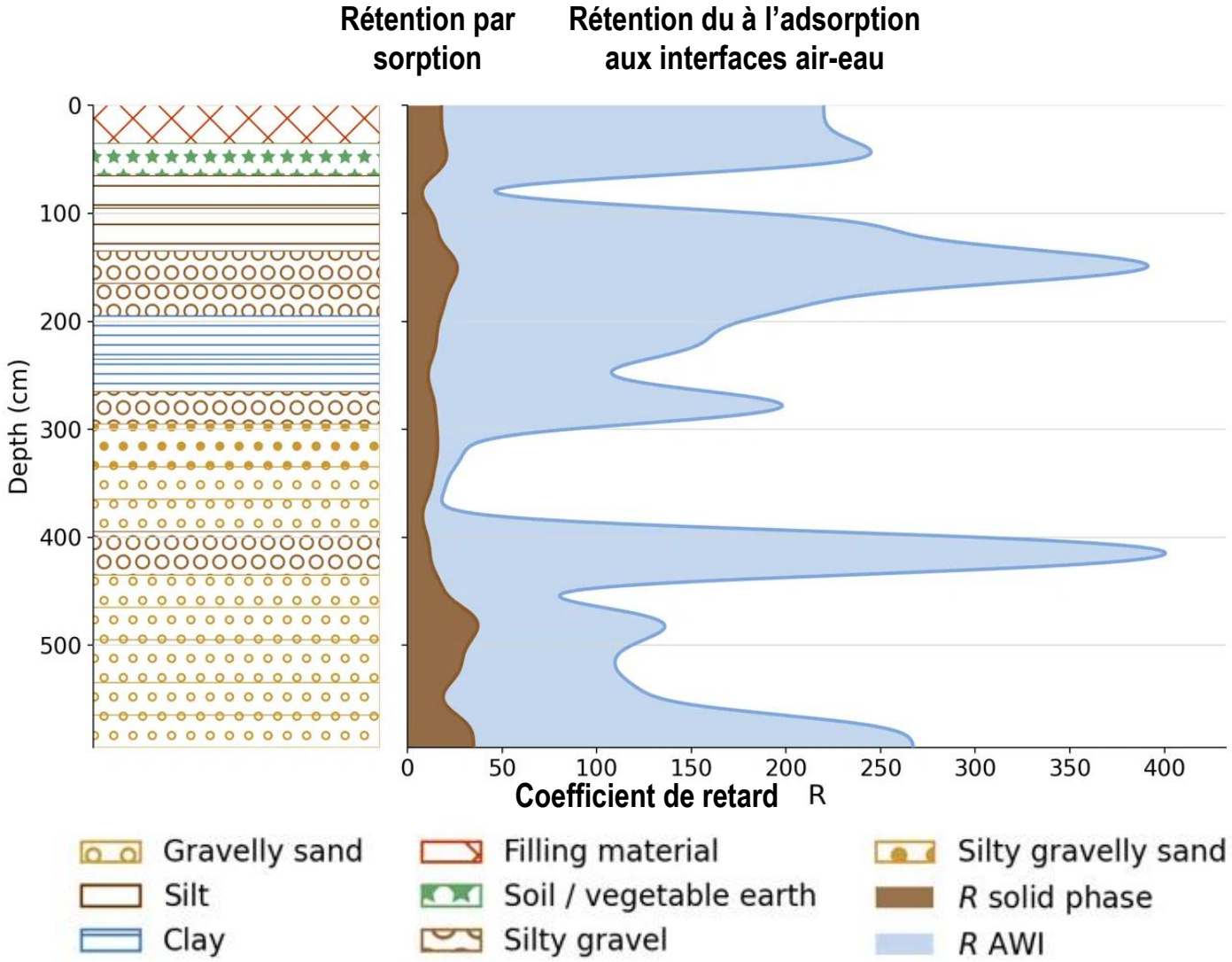
1 Répartition eau – phase solide : K_d = ?

-> Sorption également sur les phases minérales

2 **Adsorption aux interfaces air-eau: K_{aw}**

Quelle est l'importance de l’adsorption aux interfaces air-eau ?

Exemple PFOS



- La rétention due à l’adsorption aux interfaces air-eau est généralement plus importante que celle due à la sorption.
- Une forte rétention est également attendue dans les graviers limoneux !
- À prendre en compte lors de l’échantillonnage !

unine
Université de Neuchâtel

PFAS – Potentiel de mobilisation à partir du sol et de la zone non-saturée

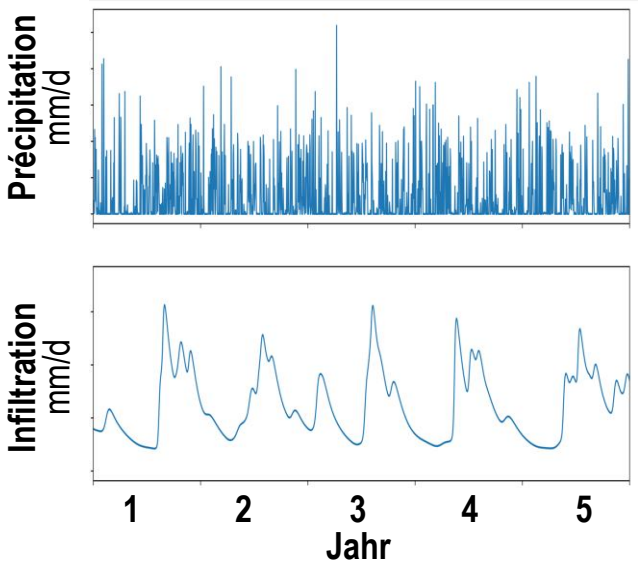
- **Approches classiques dans le contexte de la gestion des sites contaminés**
  - Calcul de la concentration dans l'eau interstitielle à partir de la teneur totale
  - Essai en colonne conformément à l'Osites
  - Modélisation, p. ex. avec TransSim?

Les formules classiques ne sont pas applicables, en particulier pour les PFAS à chaîne longue (à partir de C7).

L'essai en colonne n'est applicable que de manière très limitée, car l'adsorption aux interfaces air-eau n'y est pas représentée.

Modélisation du transfert des PFAS du sol et de la zone non saturée vers les eaux souterraines

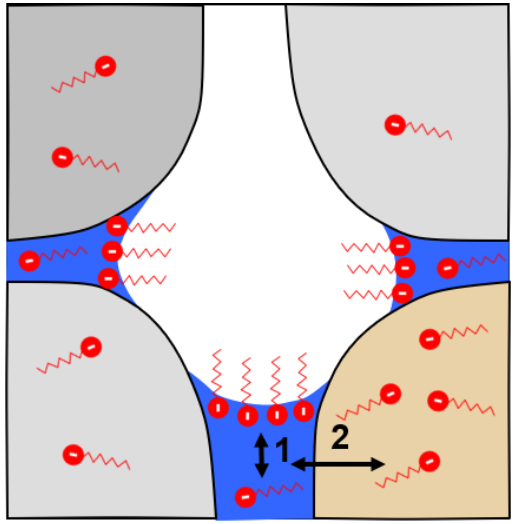
Hydrologie



Géologie



Comportement des contaminants



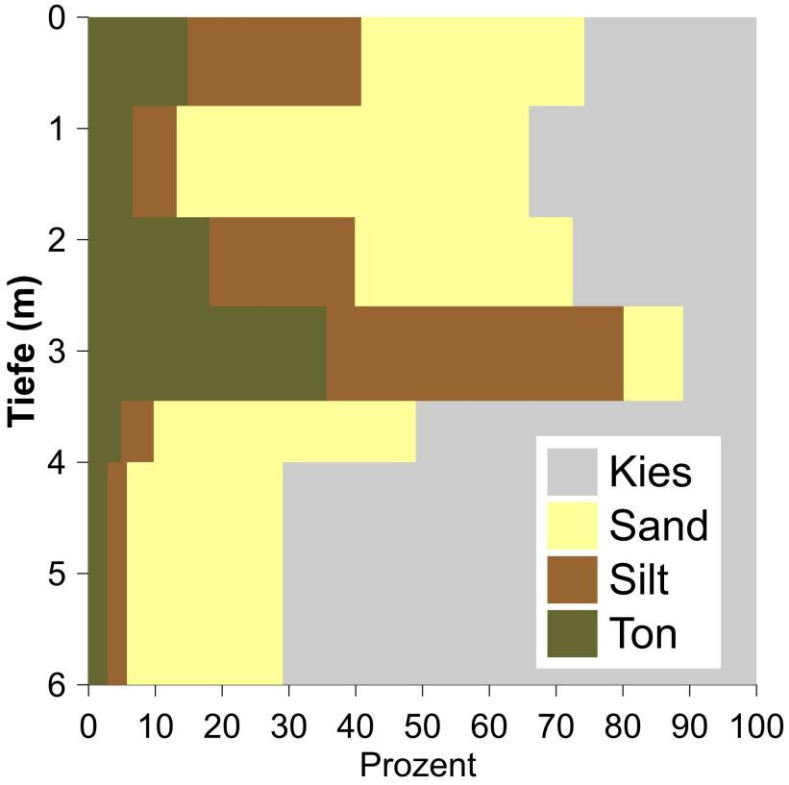
Complexe x Complexe x Complexe = Complexe^3

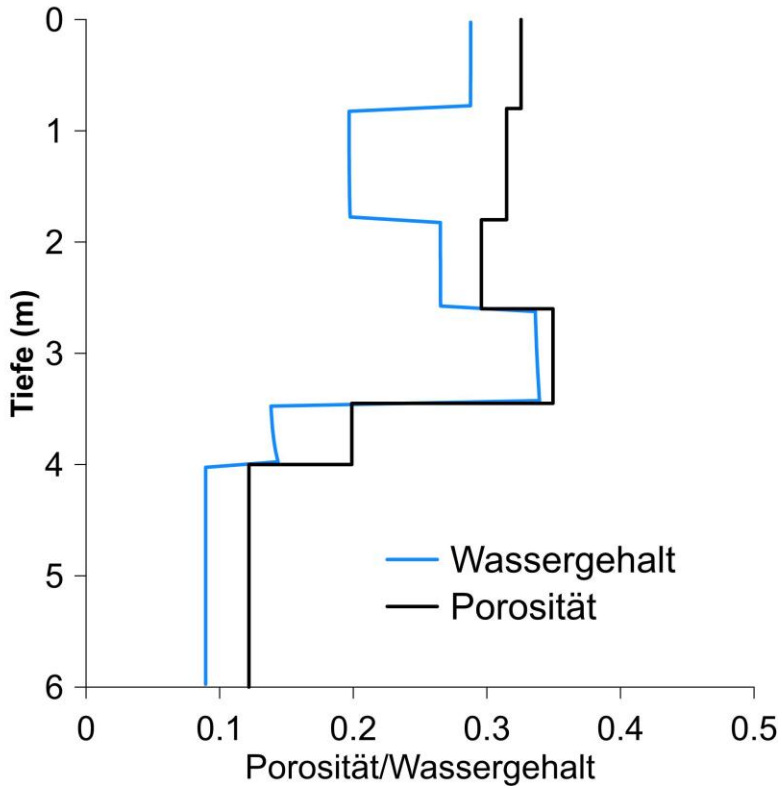
Modèles établis
LEACHE PFAS
HYDRUS PFAS

Comment simplifier?

unine
Université de Neuchâtel

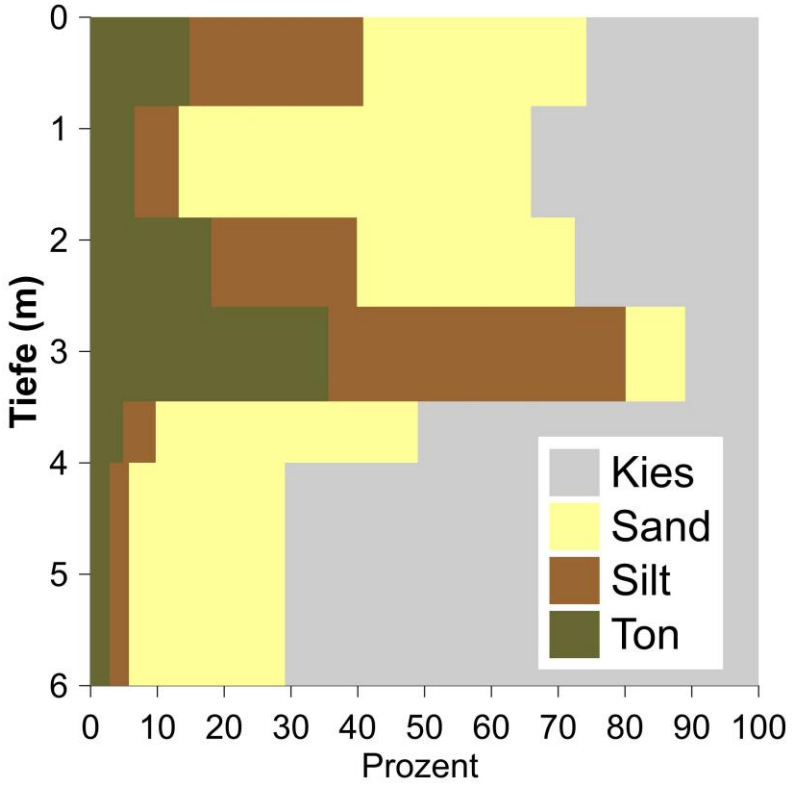
Modèle de référence – Complexe$^{2.5}$

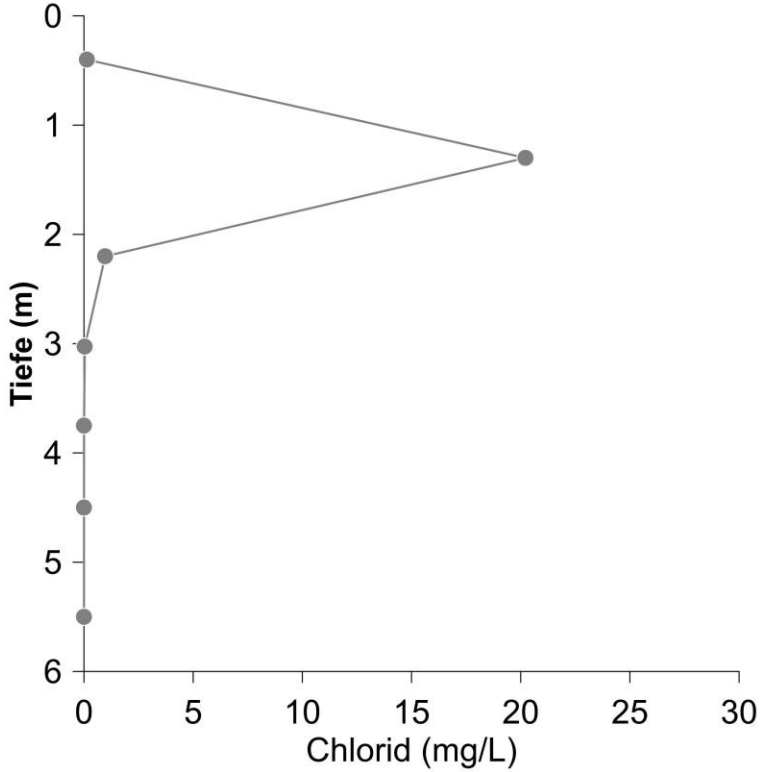


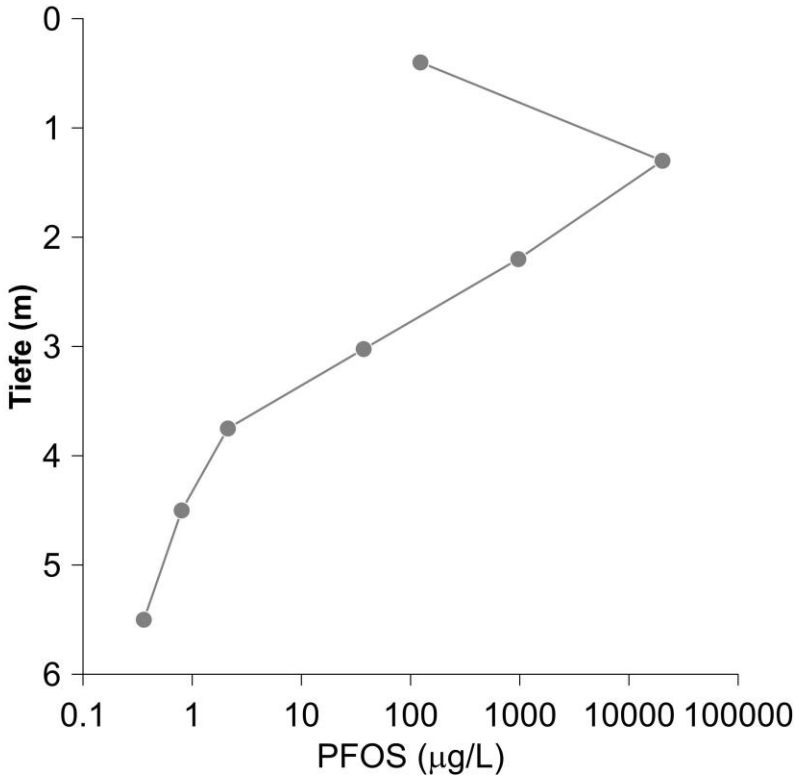


unine
Université de Neuchâtel

Modèle de référence – Complexe[2.5]

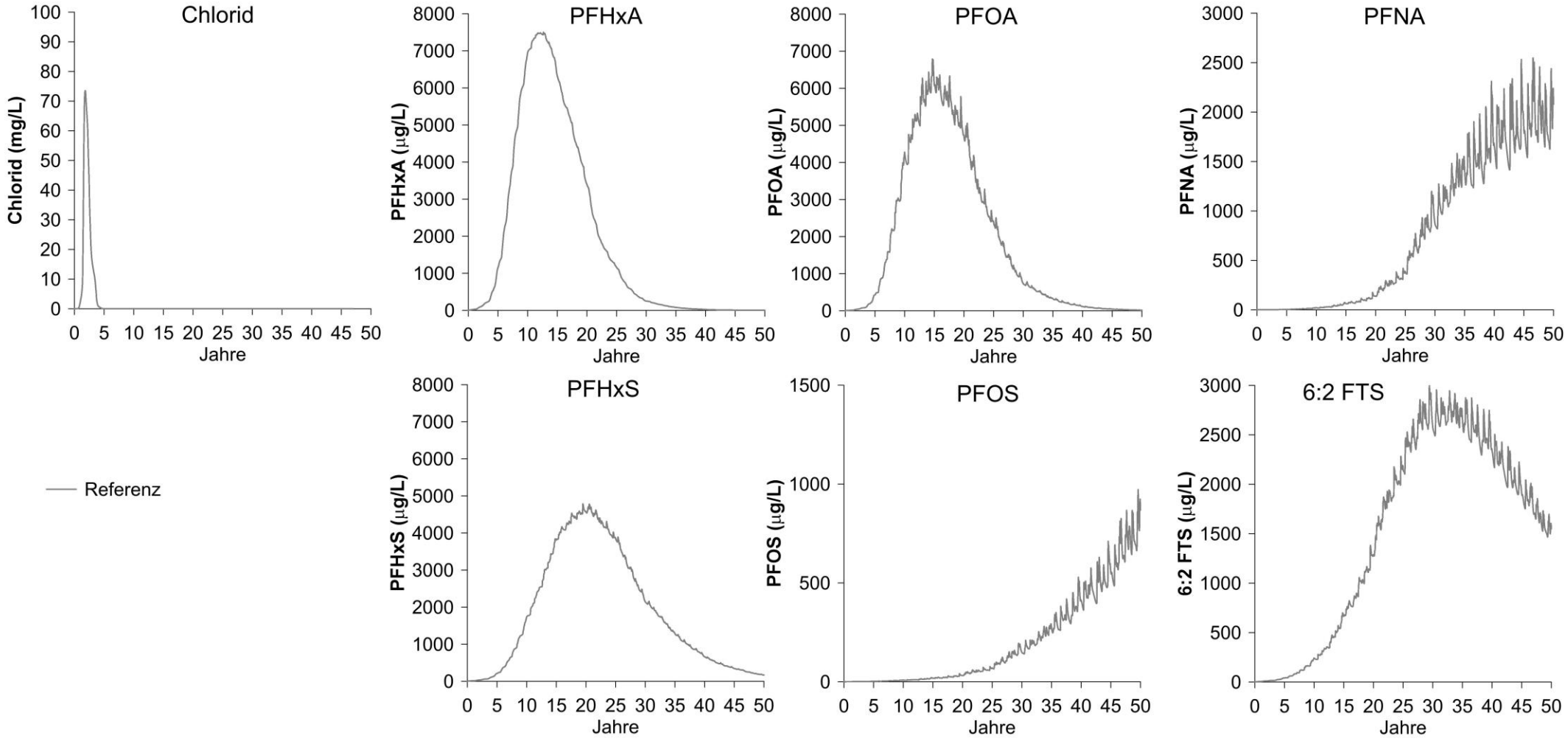






unine
Université de Neuchâtel

Modèle de référence – Complexe[2.5]

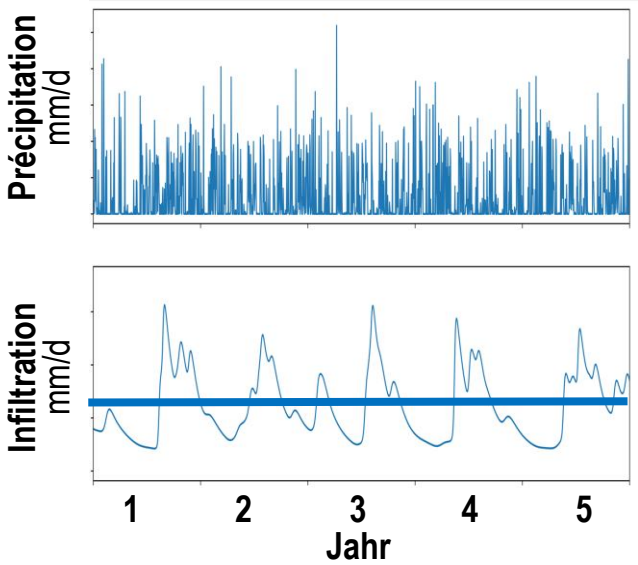


Concentration dans l'eau des pores avant son arrivée dans les eaux souterraines

unine
Université de Neuchâtel

Simplification: Approche Transsim

Hydrologie

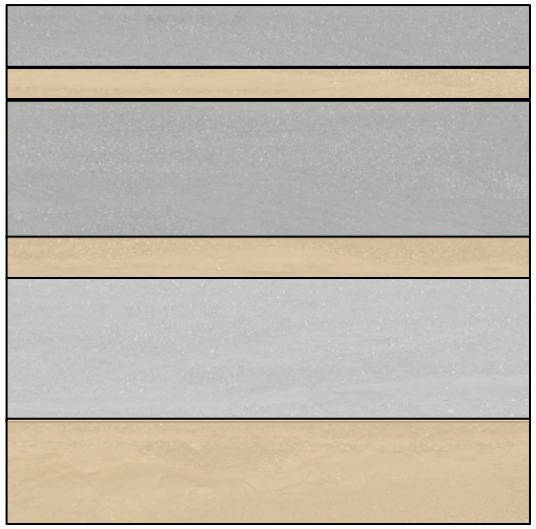


Simple

Taux d'infiltration annuel moyen

x

Géologie

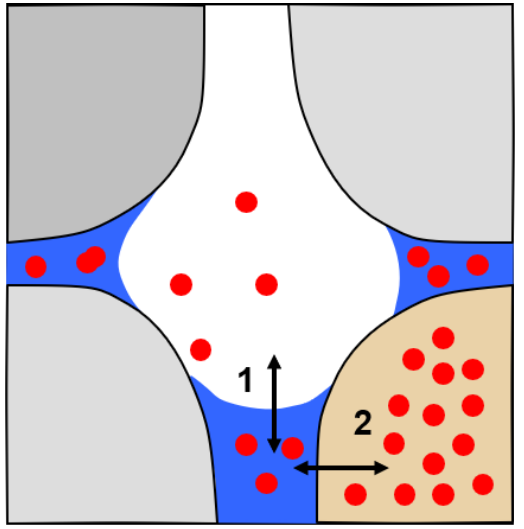


Simplifié

Absence de variation latérale de la géologie

x

Comportement des contaminants



Simple

Sorption linéaire selon

$K_d = K_{oc} \cdot f_{oc}$

=

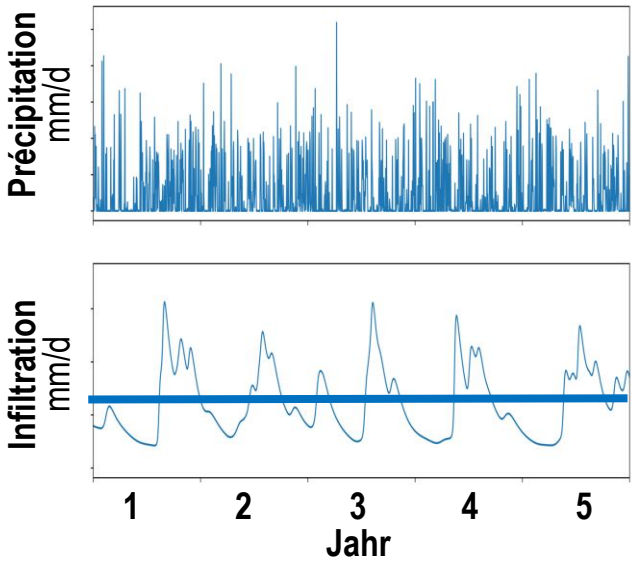
Faisable

Également pour PFAS?

unine
Université de Neuchâtel

Simplification: Hydrologie moyenne

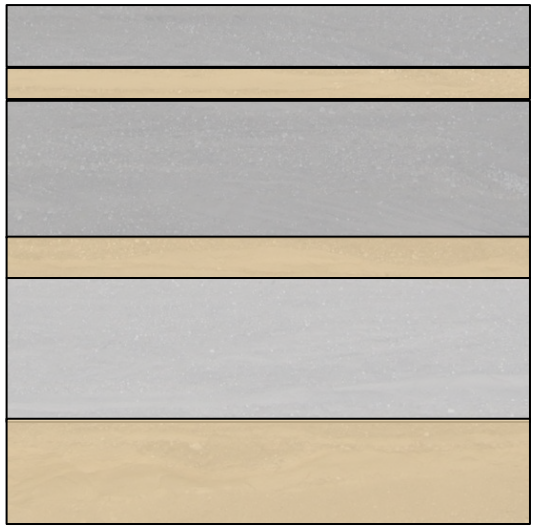
Hydrologie



Simple

x

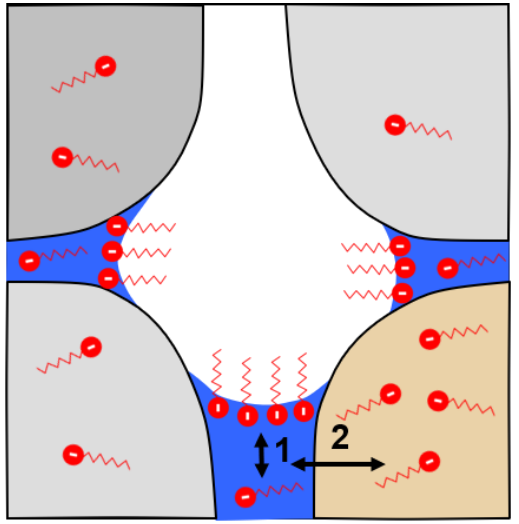
Géologie



Simplifié

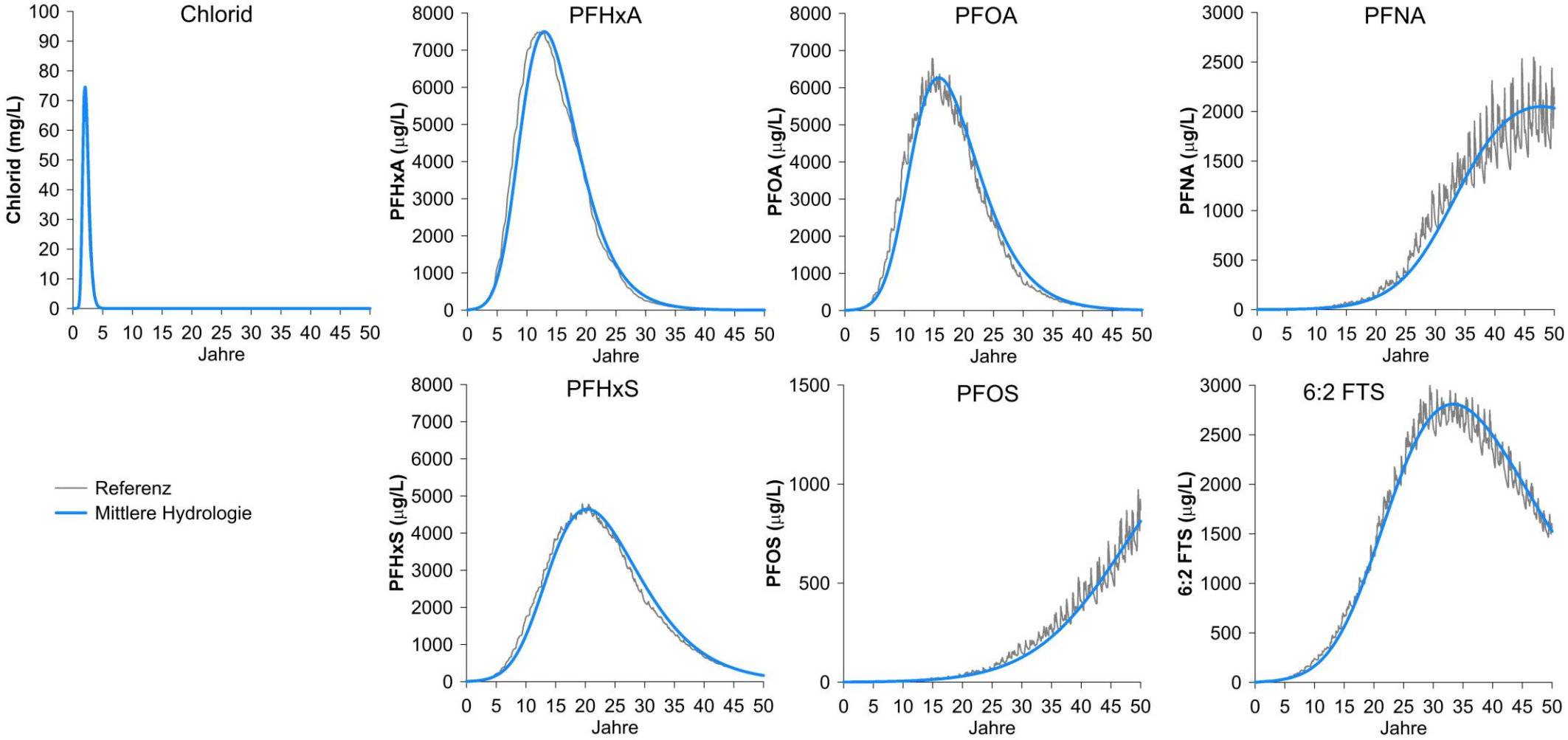
x

Comportement des contaminants



Complexe

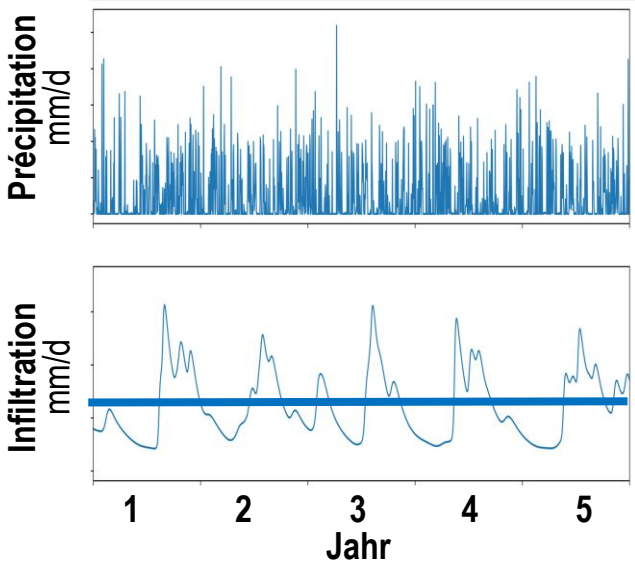
Simplification: Hydrologie moyenne



unine
Université de Neuchâtel

Simplification: Hydrologie moyenne + Géologie homogène

Hydrologie



Simple

Hydrologie moyenne

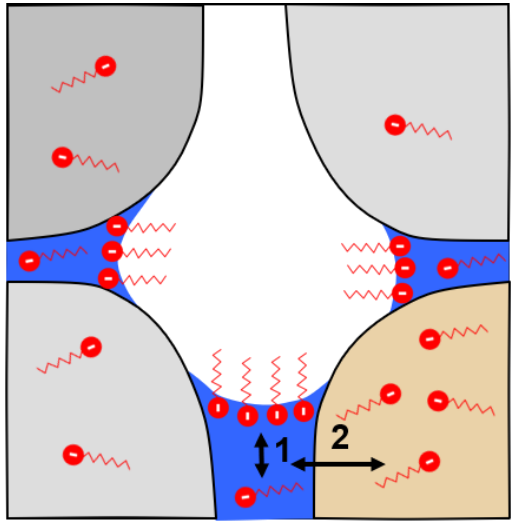
Géologie



x **Simple**

+Homogène, à l'exception de la répartition de la matière organique

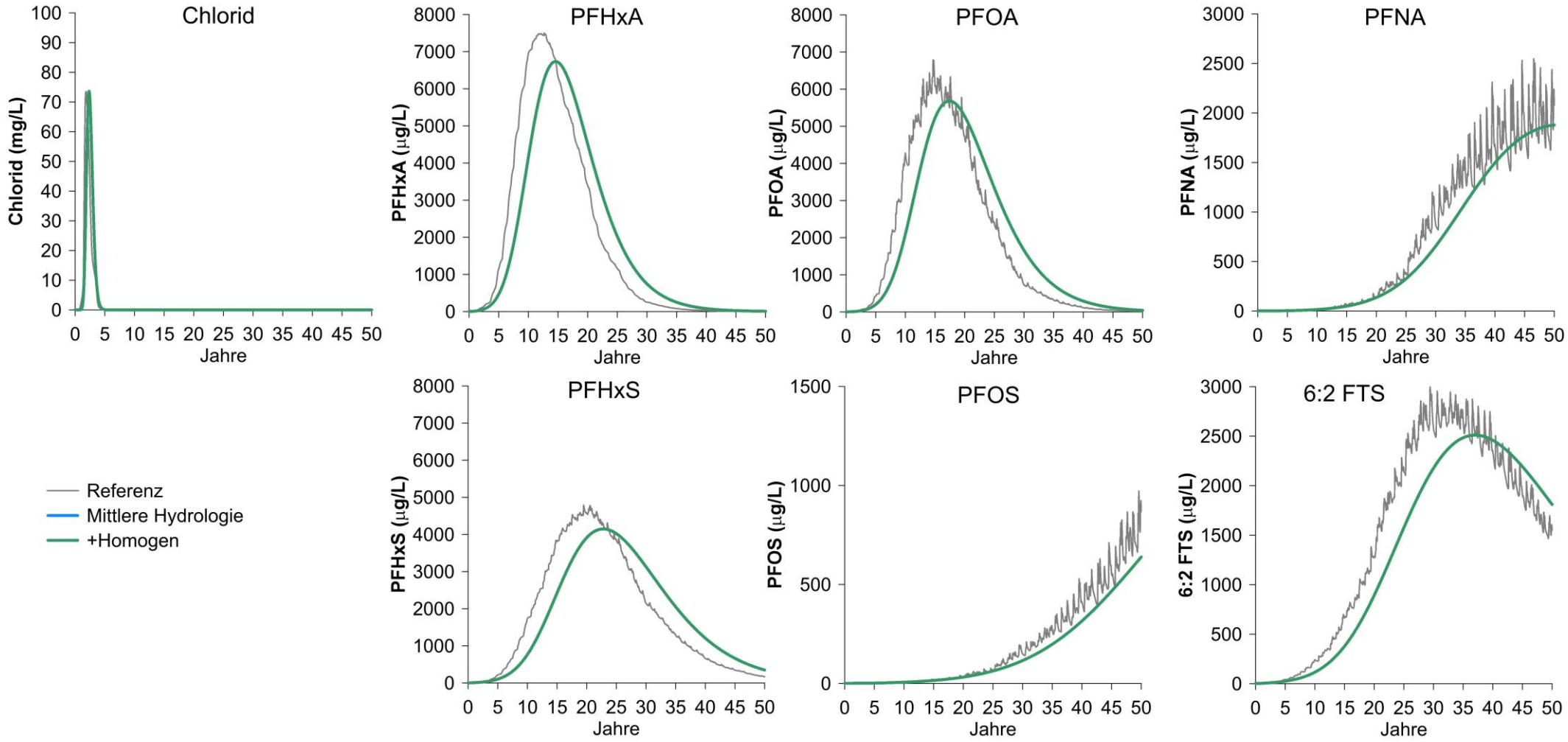
Comportement des contaminants



x **Complexe**

unine
Université de Neuchâtel

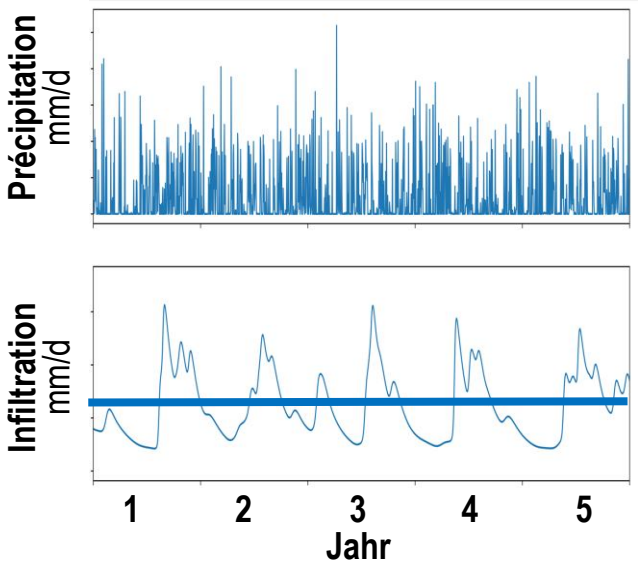
Simplification: Hydrologie moyenne + Géologie homogène



unine
Université de Neuchâtel

Simplification: Hydrologie moyenne sans adsorption aux interfaces air-eau

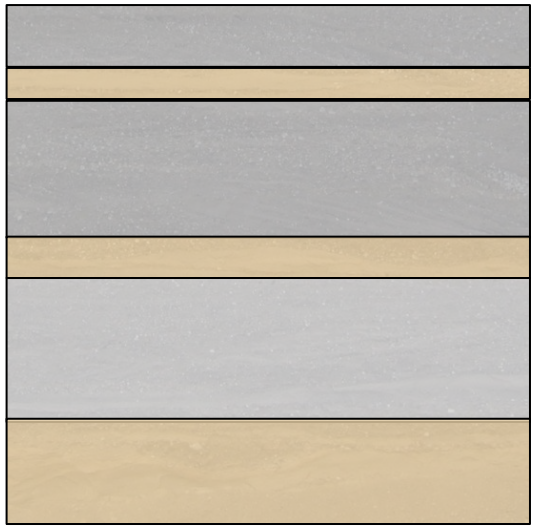
Hydrologie



Simple

x

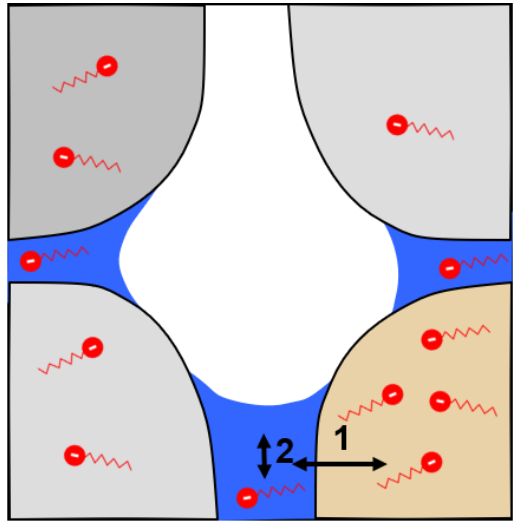
Géologie



Simplifié

x

Comportement des contaminants



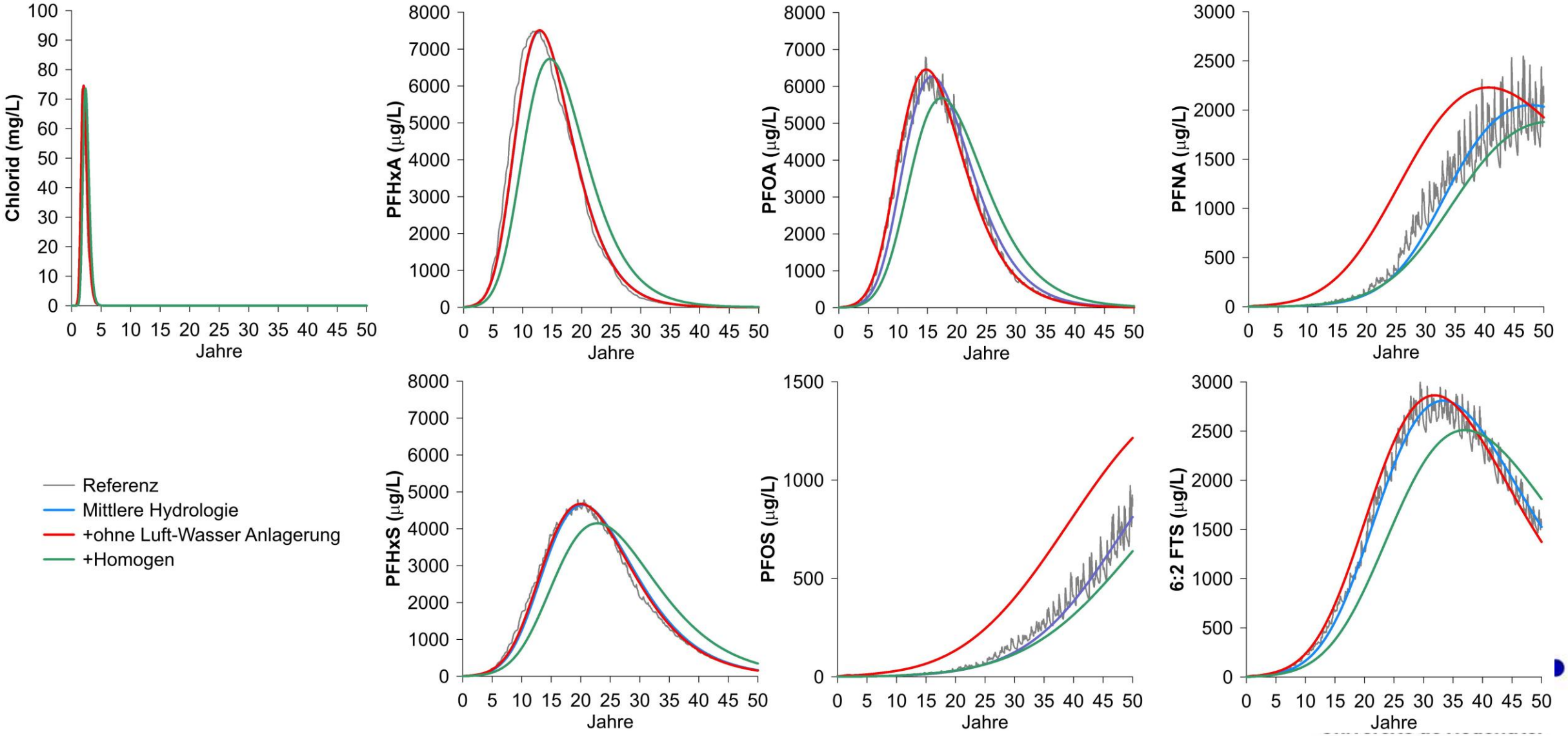
Simple

Hydrologie moyenne

sans adsorption aux interfaces air-eau

unine
Université de Neuchâtel

Simplification: Hydrologie moyenne sans adsorption aux interfaces air-eau



Conclusion

- **Hydrologie moyenne**
  - La tendance moyenne est bien reproduite, car dans la partie profonde de la zone non saturée, la variabilité hydrologique est faible.
- **+Géologie simplifié**
  - Dans le cas d'une structure modérément hétérogène, la tendance moyenne est bien reproduite, aussi longue que la variation de la teneur en matière organique est prise en compte.
- **+sans adsorption aux interfaces air-eau**
  - Faibles écarts pour les composés à chaîne courte (jusqu'à C6).
  - Écarts plus importants pour les composés à chaîne longue (à partir de C7).
    → **Effet non négligeable.**

Existe-t-il un modèle simple, mais pas trop simplifié ?

unine
Université de Neuchâtel

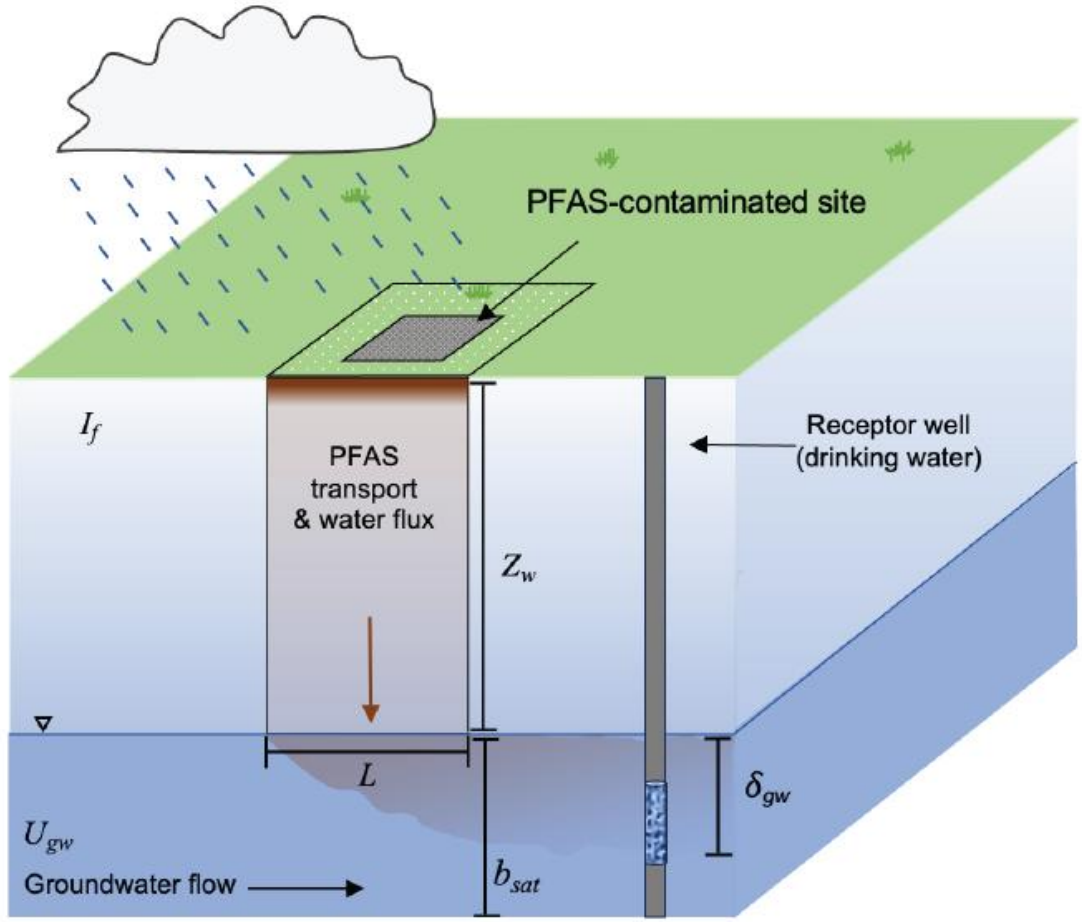
PFAS LEACH

THE UNIVERSITY OF ARIZONA ESTCP

User Guide: Excel tool for Tiers 3 and 4 models of PFAS-LEACH (PFAS-LEACH-Analytical and PFAS-LEACH-DAF)

Version 1.0

- Conditions hydrauliques moyennes
- Géologie homogène, à l'exception du f_{OC}
- Prise en compte de l'adsorption aux interfaces air-eau, avec un outil de calcul intégré



unine
Université de Neuchâtel

Merci de votre attention



et remerciements à l'OFEV pour le soutien

unine
Université de Neuchâtel