



AU CŒUR DE L'URANIUM

The logo for CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) consists of the lowercase letters 'cea' in a white, rounded font, with a horizontal green line underneath.

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

Etude de la spéciation aqueuse de l'uranium dissous dans les eaux de surface européennes

Benoit Charrasse (CEA), Jean-Eric Lartigue (CEA), Michaël Descotes (ORANO), Benoit Reilé (Cabinet Reilé)

IRESNE | DTN | SMTA | LMTE

1er Février 2023

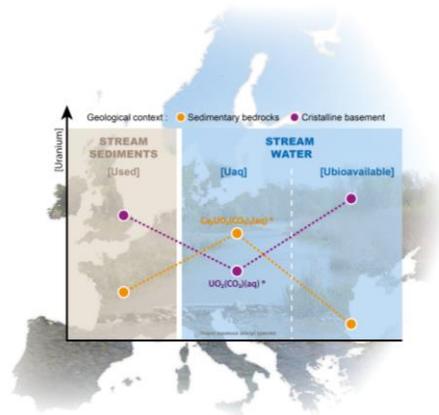
Institut de recherche sur les systèmes nucléaires pour la production d'énergie bas carbone

➤ Programme ORANO / CEA

↳ Action : L'étude de la spéciation aqueuse de l'uranium dissous dans les eaux de surface européennes.

Objectifs

- (1) Déterminer la spéciation inorganique complète de l'U en solution dans les eaux de surface et en extraire la fraction biodisponible (à l'échelle européenne)
- (2) Influence des bases de données thermodynamiques et de la définition de l'Ubio sur les calculs
- (3) Relier les teneurs en Uranium (U_{sediment} , U_{aqueux} , $U_{\text{biodisponible}}$) à la nature du substratum et au chimisme des eaux



Objectifs

- (1) Déterminer la spéciation inorganique complète de l'U en solution dans les eaux de surface et en extraire la fraction biodisponible (à l'échelle européenne)
- (2) Influence des bases de données thermodynamiques et de la définition de l'Ubio sur les calculs
- (3) Relier les teneurs en Uranium (U_{sediment} , U_{aqueux} , $U_{\text{biodisponible}}$) à la nature du substratum et au chimisme des eaux

Chemosphere 251 (2020) 126302



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Chemosphere

journal homepage: www.elsevier.com/locate/chemosphere

Aqueous inorganic uranium speciation in European stream waters from the FOREGS dataset using geochemical modelling and determination of a U bioavailability baseline

J.E. Lartigue^a, B. Charrasse^a, B. Reile^{b,c}, M. Descostes^{b,*}

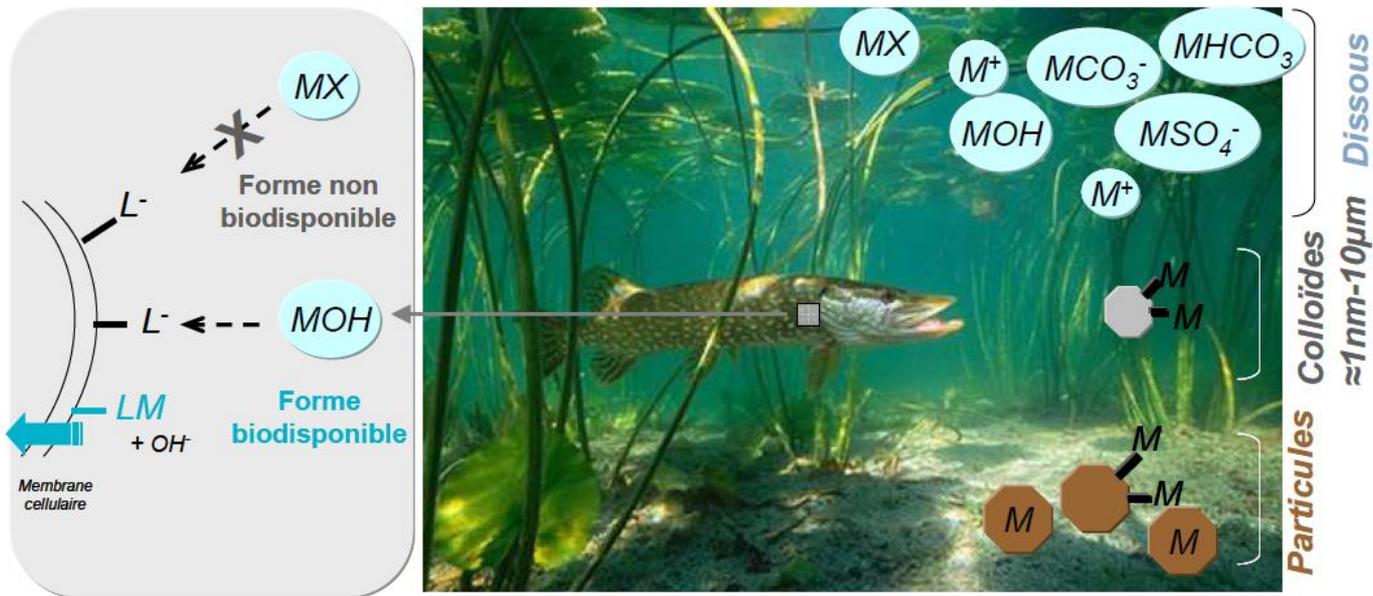
^a CEA, DEN, DTN, Cadarache, Saint-Paul-les-Durance Cedex, France

^b ORANO Mining, R&D Dpt, F-92330, Châtillon, France

^c Cabinet Reilé, F-25290, Omans, France

« **biodisponible** » : « toutes espèces susceptibles de s'absorber ou de traverser les parois cellulaires et pouvoir s'accumuler dans les organismes vivants et « devenir toxiques » » (Chapman, 2008; Vandenhove et al., 2010)

Spéciation d'une substance M en milieu aquatique et son interaction potentielle avec les sites réactifs biologiques



Extrait de AREVA, AMS-DEXP-DRD-RT-0008

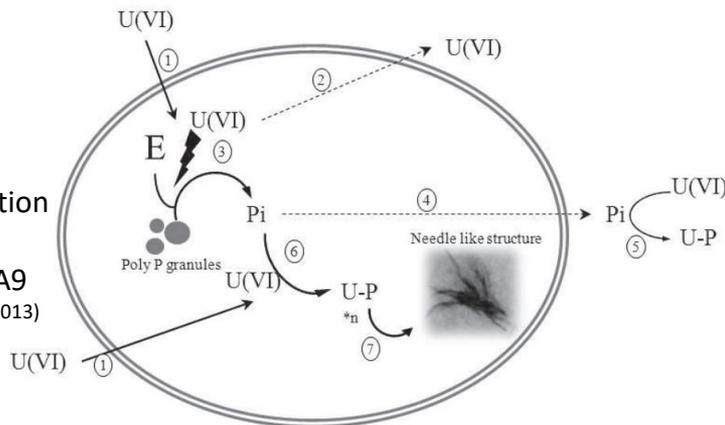
Compréhension des mécanismes de transfert

De l'extérieur vers l'intérieur

Interaction avec les ligands présent à la surface de la cellule biologique (transporteurs membranaires)
Internalisation par voie passive ou dynamique

Notion de cinétique (vitesse d'internalisation et vitesse de diffusion)

Mécanismes d'interaction entre l'U et
Microbacterium sp. A9
(extrait de Theodorakopoulos, 2013)



Toxicité

Toxicocinétique

Absorption
Distribution dans l'organisme
Métabolisation
Accumulation/élimination

Toxicodynamique

Différents modes d'actions:

- ❑ Par compétition avec des métabolites au niveau des sites intracellulaires → perturbations des fonctions cellulaires
- ❑ Par compétition avec des cations vitaux (Ca^{2+} , Na^+) → perturbation du processus d'iono-régulation

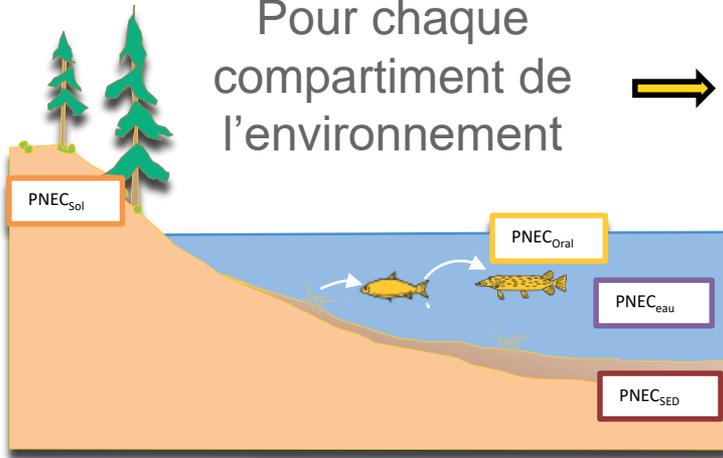
Pour chaque
compartiment de
l'environnement



une concentration
prédite sans effet
(PNEC)



$$\text{Ratio} = \frac{[\text{milieux aqueux}]}{\text{PNEC}}$$



Pour chaque compartiment de l'environnement



une concentration prédite sans effet (PNEC)

$$\text{Ratio} = \frac{[\text{milieux aqueux}]}{\text{PNEC}}$$

Considérer la fraction biodisponible plutôt que la valeur concentration totale

*“The need for **bioavailability-based methods in the ecological risk assessment (ERA) of metals** is noted in environmental regulation (Merrington et al., 2017, WCA Environment 2017). Environmental administrations evaluate the effects of metal discharges and set environmental quality standards (EQS) or guidelines (EQG)”*

Norme de qualité f(biodisponibilité) ou des conditions du milieu

Ecotoxicology and Environmental Safety 147 (2018) 430–446

Contents lists available at ScienceDirect

Ecotoxicology and Environmental Safety

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ecoenv



Review

Metal bioavailability in ecological risk assessment of freshwater ecosystems: From science to environmental management

Kristiina Väänänen^{a,*}, Matti T. Leppänen^b, XuePing Chen^c, Jarkko Akkanen^d

^a University of Eastern Finland, Department of Environmental and Biological Sciences, P.O. BOX 111, FI-80101 Joensuu, Finland

^b Finnish Environment Institute, Sarvenie 9 A, FI-40500 Jyväskylä, Finland

^c Shanghai University, School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai Road 99, CH-200444 Shanghai, China

Pour chaque compartiment de l'environnement



une concentration prédite sans effet (PNEC)

$$\text{Ratio} = \frac{[\text{milieux aqueux}]}{\text{PNEC}}$$

Considérer la fraction biodisponible plutôt que la valeur concentration totale

*“The need for **bioavailability-based methods in the ecological risk assessment (ERA)** of metals is noted in environmental regulation (Merrington et al., 2017, WCA Environment 2017). Environmental administrations evaluate the effects of metal discharges and set environmental quality standards (EQS) or guidelines (EQG)”*

Norme de qualité f(biodisponibilité) ou des conditions du milieu

Metal	CMC ^a , acute µg/l	CCC ^b , chronic µg/l	Conversion factors for hardness-dependent metal criteria, CMC	Conversion factors for hardness-dependent metal criteria, CCC
As	340.00	150.00	1	1
Cd	1.80	0.72	1.136672-[(ln hardness) (0.041838)]	1.101672-[(ln hardness) (0.041838)]

Méthodes analytiques et séparatives

- Time-resolved laser-induced fluorescence spectroscopy (TRLFS)
- Size exclusion chromatography by coupling it with inductively coupled plasma mass spectrometry (ICPMS)
- Cathodic stripping voltammetry (CSV)
- Ultrafiltration/Nanofiltration
- Dialyses

Méthodes analytiques et séparatives

- Time-resolved laser-induced fluorescence spectroscopy (TRLFS)
- Size exclusion chromatography by coupling it with inductively coupled plasma mass spectrometry (ICPMS)
- Cathodic stripping voltammetry (CSV)
- Ultrafiltration/Nanofiltration
- Dialyses

Méthodes par accumulation

- Membrane liquide de perméation (PLM)
- Diffuse Gradient in Thin film (DGT)
- Moule artificielle

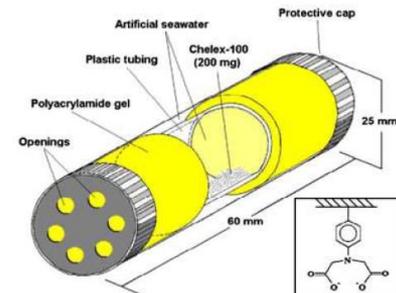
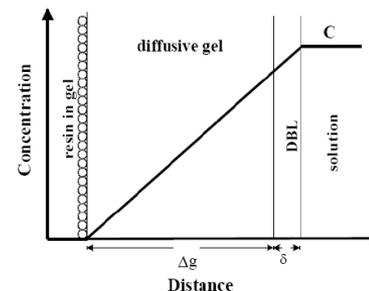
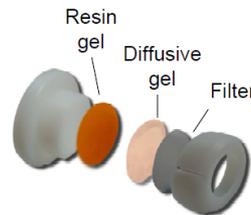


Figure 14 : Schéma des composants de « artificial mussel » avec une résine Chelex (Kibria *et al.*, 2012).

Méthodes analytiques et séparatives

- Time-resolved laser-induced fluorescence spectroscopy (TRLFS)
- Size exclusion chromatography by coupling it with inductively coupled plasma mass spectrometry (ICPMS)
- Cathodic stripping voltammetry (CSV)
- Ultrafiltration/Nanofiltration
- Dialyses

Méthodes par accumulation

- Membrane liquide de perméation (PLM)
- Diffuse Gradient in Thin film (DGT)
- Moule artificielle

Méthode par calcul

- Codes de géochimie – Bases thermodynamiques

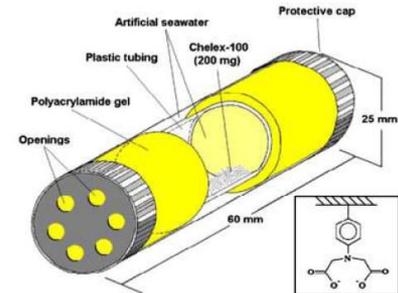
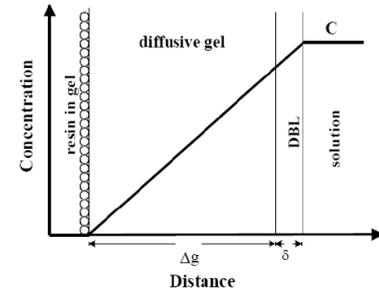
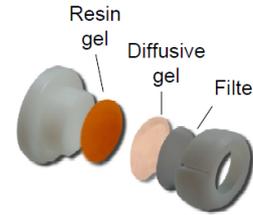


Figure 14 : Schéma des composants de « artificial mussel » avec une résine Chelex (Kibria *et al.*, 2012).

Pas de consensus

Espèces définies sur la base de model (conceptuel) – approche calculatoire

- Modèle FIAM (Free Ion Activity Model) (1983) (suppose que la toxicité des substances est liée seulement à la concentration en ion libre)
- Modèle GSIM (Gill Site Interaction Model) (1983)
- Modèle BLM (Biotic Ligand Model) (2001)

Pas de consensus

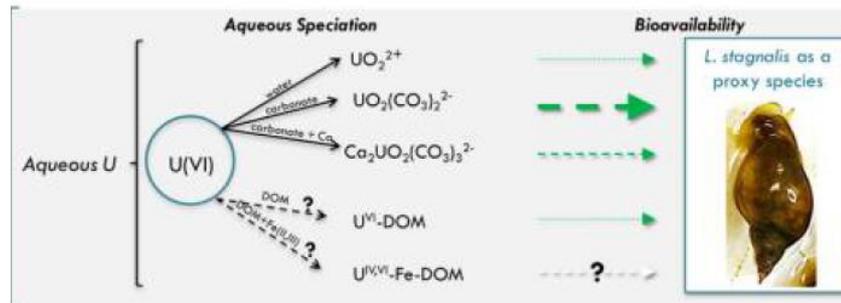
Espèces définies sur la base de model (conceptuel) – approche calculatoire

- Modèle FIAM (Free Ion Activity Model) (1983) (suppose que la toxicité des substances est liée seulement à la concentration en ion libre)
- Modèle GSIM (Gill Site Interaction Model) (1983)
- Modèle BLM (Biotic Ligand Model) (2001)

Mécanismes d'interaction et d'action

- peu connus (varie en fonction des organismes)
- spéciation des espèces estimée à partir de code de géochimie

How does speciation affect U bioavailability?



(Croteaux et al, 2016)

Pas de consensus

- ❖ Ne pas statuer / se prononcer sur un choix d'espèces
- ❖ Considérer les espèces aqueuses classiquement retenues → étude bibliographique

Pas de consensus

- ❖ Ne pas statuer / se prononcer sur un choix d'espèces
- ❖ Considérer les espèces aqueuses classiquement retenues → étude bibliographique



3 groupes d'espèces retenues (somme des concentrations)

- $\text{UO}_2^{2+} + \text{UO}_2\text{OH}^+$ (Markich, 2002; Markich et al., 2000; Theodorakopoulos et al., 2015; Trenfield et al., 2011)
- $\text{UO}_2^{2+} + \text{UO}_2\text{OH}^+ + \text{UO}_2(\text{OH})_2(\text{aq}) + \text{UO}_2\text{CO}_3(\text{aq})$ (Beaugelin-Seiller et al., 2009)
- $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-} + (\text{UO}_2)_3(\text{CO}_3)_6^{6-}$ (Croteaux et al., 2016)

$\text{U}_{\text{bio},2}$

$\text{U}_{\text{bio},4}$

$\text{U}_{\text{bio},\text{anion}}$

Pas de consensus

- ❖ Ne pas statuer / se prononcer sur un choix d'espèces
- ❖ Considérer les espèces aqueuses classiquement retenues → étude bibliographique



3 groupes d'espèces retenues (somme des concentrations)

- $\text{UO}_2^{2+} + \text{UO}_2\text{OH}^+$ (Markich, 2002; Markich et al., 2000; Theodorakopoulos et al., 2015; Trenfield et al., 2011)
- $\text{UO}_2^{2+} + \text{UO}_2\text{OH}^+ + \text{UO}_2(\text{OH})_2(\text{aq}) + \text{UO}_2\text{CO}_3(\text{aq})$ (Beaugelin-Seiller et al., 2009)
- $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-} + (\text{UO}_2)_3(\text{CO}_3)_6^{6-}$ (Croteaux et al., 2016)

$\text{U}_{\text{bio},2}$

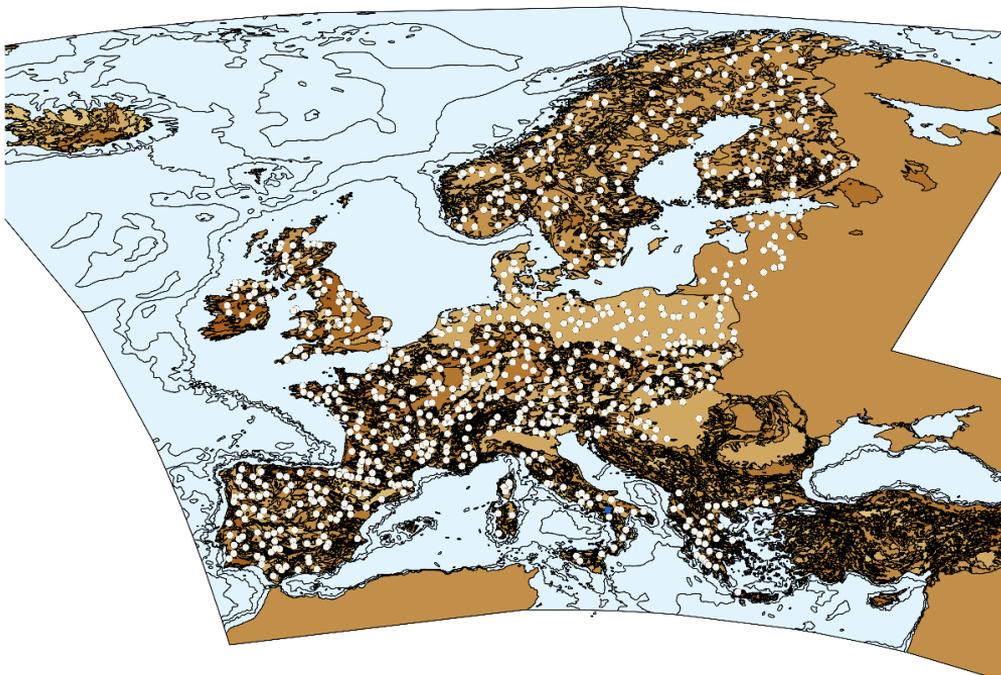
$\text{U}_{\text{bio},4}$

$\text{U}_{\text{bio},\text{anion}}$

- ❖ Fournir l'ensemble des données (calcul de spéciation) pour un (re)calcul futur

Jeux de données utilisées (808 échantillons, 26 pays)

Atlas géochimiques FOREGS « stream water » et « stream sediment »



- Eléments considérés dans les calculs

$[\text{CO}_2]_{\text{tot}}$, $[\text{Cl}]_{\text{tot}}$, $[\text{SO}_4]_{\text{tot}}$, $[\text{NO}_3]_{\text{tot}}$, $[\text{Br}]_{\text{tot}}$,
 $[\text{F}]_{\text{tot}}$, $[\text{K}]_{\text{tot}}$, $[\text{Na}]_{\text{tot}}$, $[\text{Ca}]_{\text{tot}}$, $[\text{Mg}]_{\text{tot}}$,
 $[\text{Sr}]_{\text{tot}}$, $[\text{SiO}_2]_{\text{tot}}$, $[\text{Al}]_{\text{tot}}$, $[\text{B}]_{\text{tot}}$, $[\text{Ba}]_{\text{tot}}$,
 $[\text{Fe}]_{\text{tot}}$, $[\text{Li}]_{\text{tot}}$, $[\text{U}]_{\text{tot}}$

- Fraction colloïdale non considérée (100 % sous forme aqueuse)

Spéciation - Code de calcul : CHESS

➤ Plusieurs bases de données thermodynamiques:

- NOPRA 1.4 développée par ORANO
- Thermochimie développée par l'Andra
- Chess défaut dérivée de celle du code EQ3/6

➤ Automatisation complète des calculs et d'une partie du post-traitement (développement d'une routine en interne)

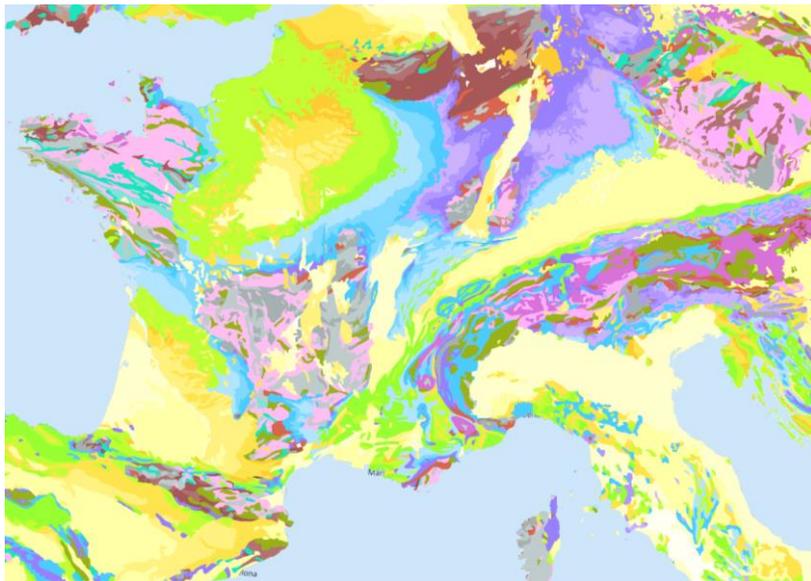


2373 calculs ont été ainsi réalisés

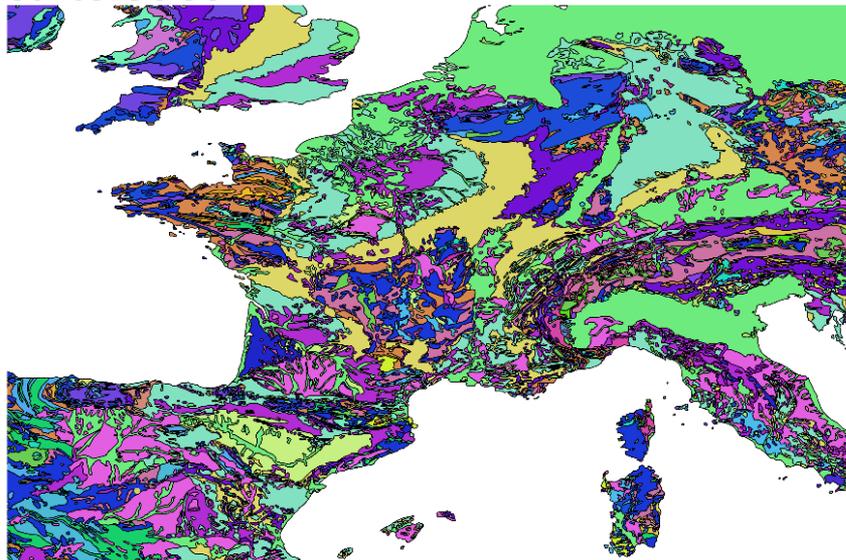
Méthode – Objectif n°3 : Relier les teneurs en Uranium vs Substratum et chimisme des eaux

Données croisées entre les **cartes géologiques européennes** à l'échelle 1:1 000 000 EGDI et USGS → pour déterminer les caractéristiques géologiques (lithologie et âges géologiques)

Carte EGDI



Carte USGS



EGDI = Description plus fine des stratotypes : ex « *Pure carbonate sedimentary rock with a ratio of magnesium carbonate to calcite (plus aragonite) greater than 1 to 1* »

USGS = géologie régionalisée à l'échelle Européenne avec un renseignement des stratotypes et des descriptions lithologiques sommaires (*Tertiary through Cretaceous rocks, Undivided Triassic rocks*) – hors pays Baltes (Lituanie, Lettonie, Estonie)

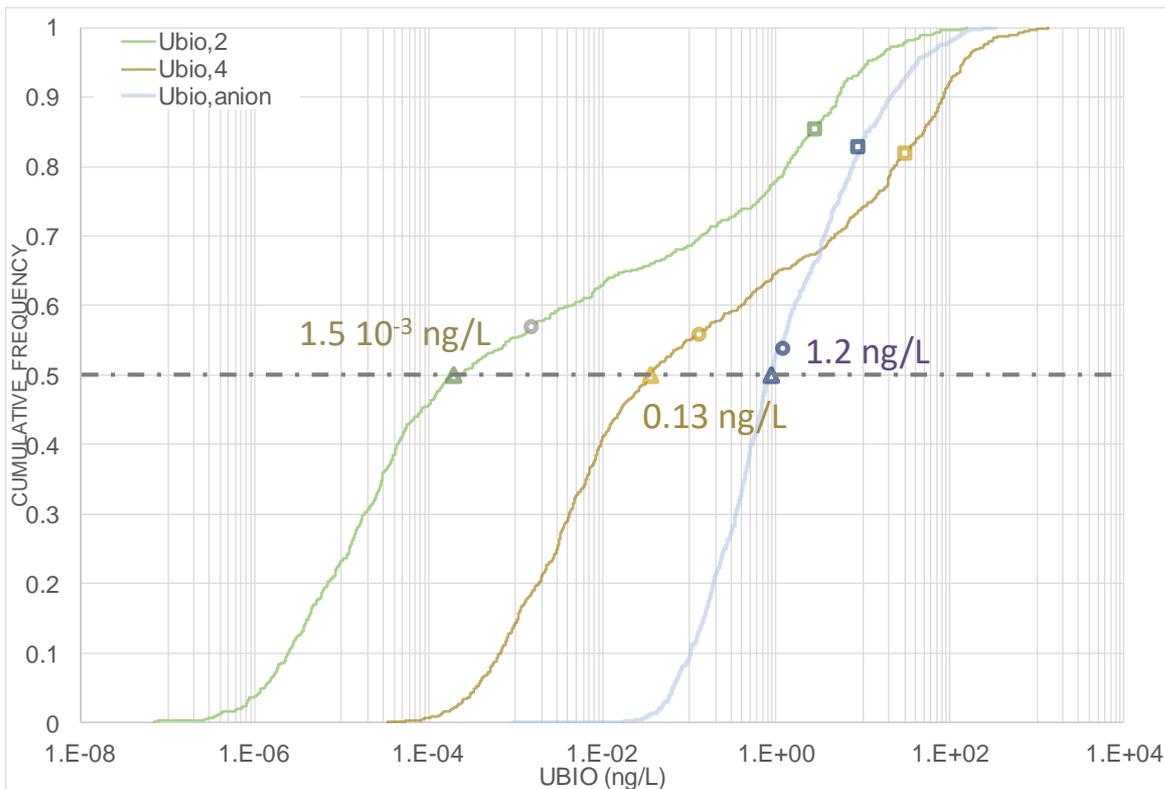
Regroupement de plusieurs faciès en 2 catégories:

Roche sédimentaire : roches détritiques des bassins versants (sables, grès, conglomérats, argiles, etc.), les roches composant les plateformes carbonatées (calcaires, dolomies, etc.), roches évaporitiques (gypse, anhydrite, etc.)

Roche cristalline : roches plutoniques (granites, gabbro, péridotite, etc.), métamorphiques (gneiss, schistes, skarns, etc.) et volcaniques (basalte, andésite, tufs volcaniques, etc.)

Simplified Lithotypes & Age types		Attributed FOREGS points (785 points)
Lithotypes	Sedimentary	467
	Cristallin	234
	<i>Others/Unknowns</i>	84

A l'échelle européenne – [U_{bio}] (moyenne géométrique (○)) (n=785, NOPRA)



U_{bio, 2} = UO₂²⁺ + UO₂OH

U_{bio,4} = UO₂²⁺ + UO₂OH⁺ +
UO₂(OH)₂(aq) + UO₂CO₃(aq)

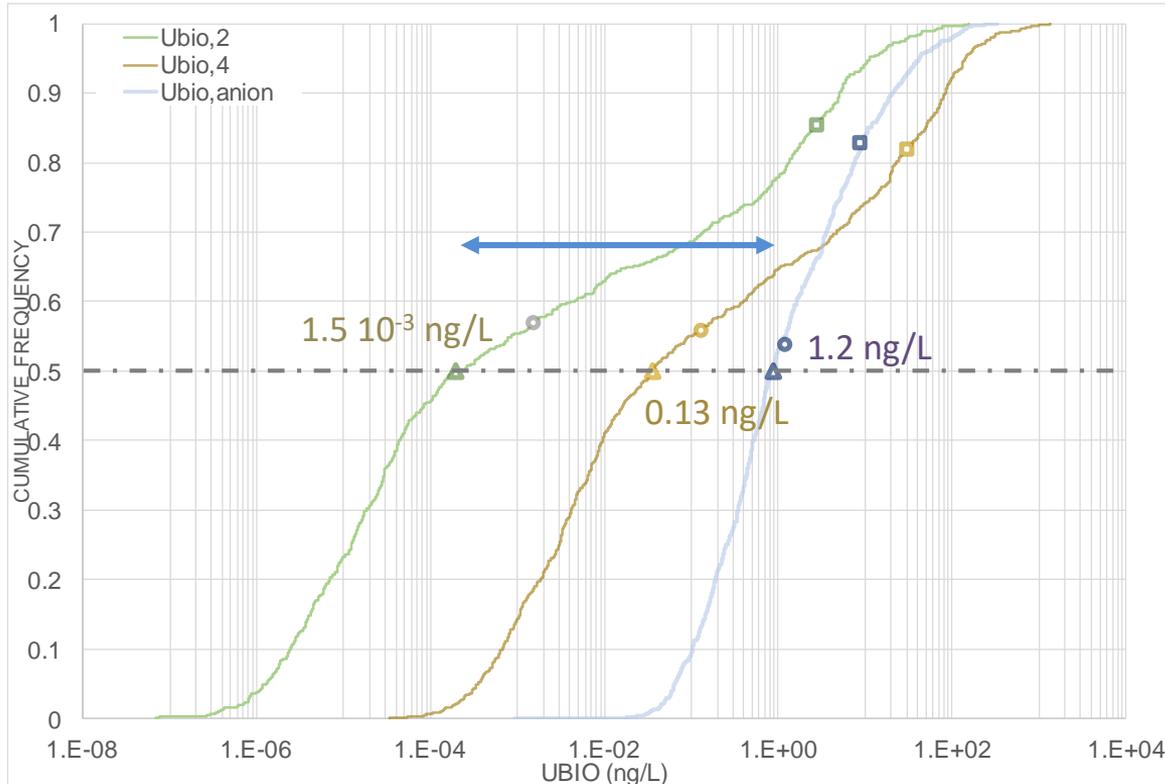
U_{bio, anion} =

UO₂(CO₃)₂²⁻ + (UO₂)₃(CO₃)₆⁶⁻

□ Moyenne arithmétique

△ Médiane

A l'échelle européenne – [U_{bio}] (moyenne géométrique (○)) (n=785, NOPRA)



→ de 1 à 3
ordre de
grandeur

U_{bio, 2} = UO₂²⁺ + UO₂OH

U_{bio,4} = UO₂²⁺ + UO₂OH⁺ +
UO₂(OH)₂(aq) + UO₂CO₃(aq)

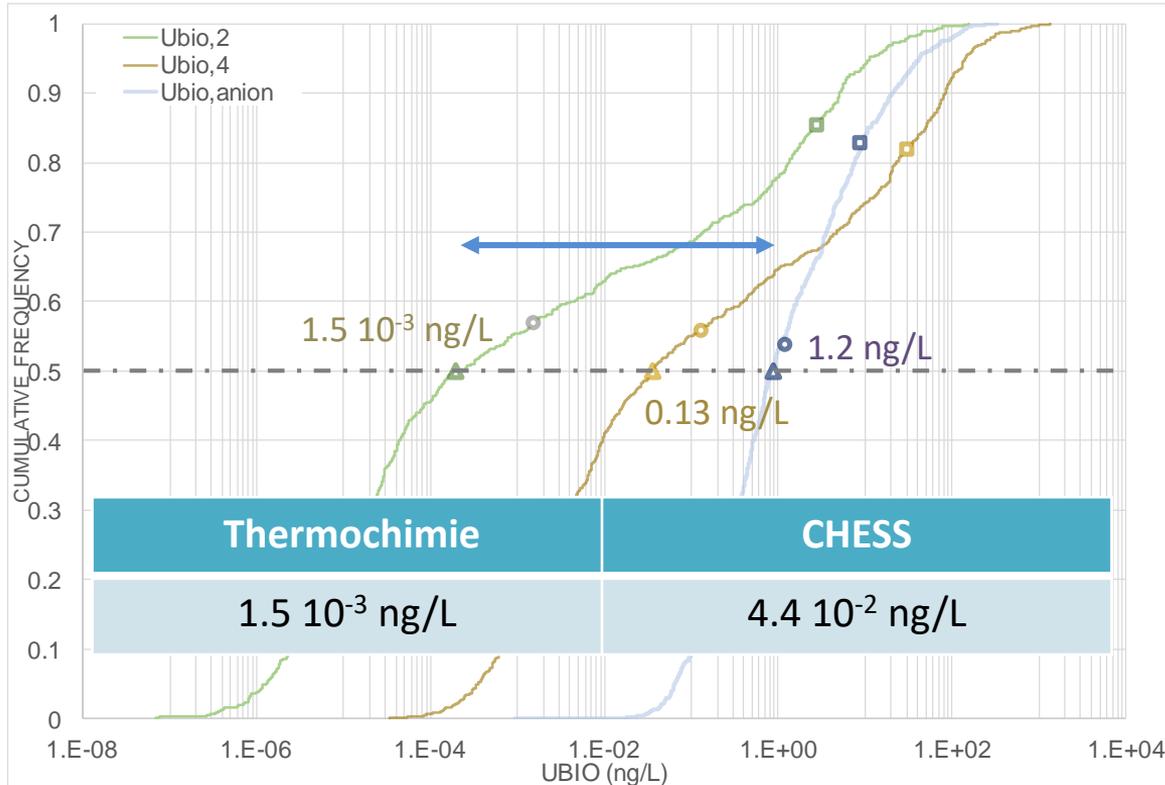
U_{bio, anion} =

UO₂(CO₃)₂²⁻ + (UO₂)₃(CO₃)₆⁶⁻

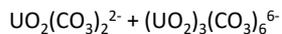
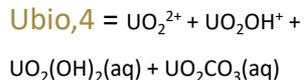
□ Moyenne arithmétique

△ Médiane

A l'échelle européenne – [U_{bio}] (moyenne géométrique (○)) (n=785, NOPRA)

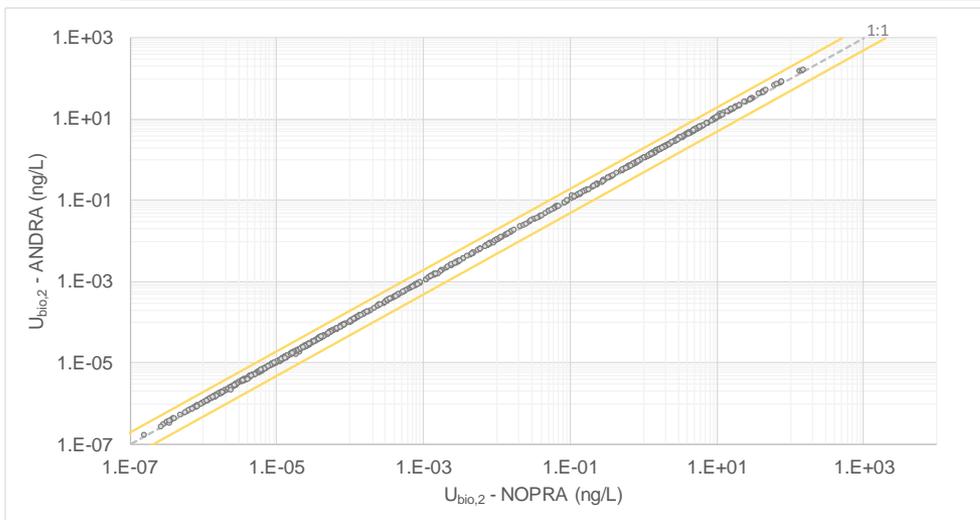


→ de 1 à ≈2
ordre de
grandeur
(U_{bio,4})



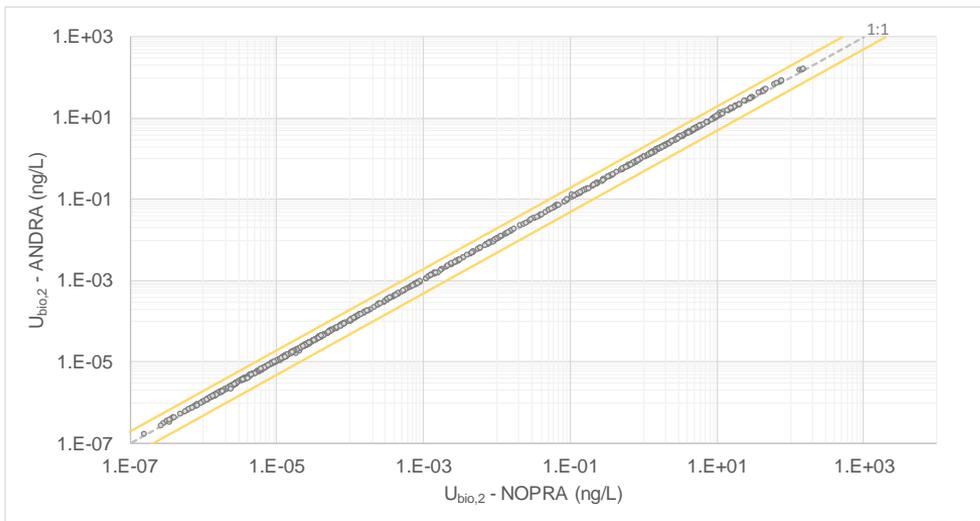
□ Moyenne arithmétique

△ Médiane



BDD NOPRA vs ANDRA
(Thermochimie)

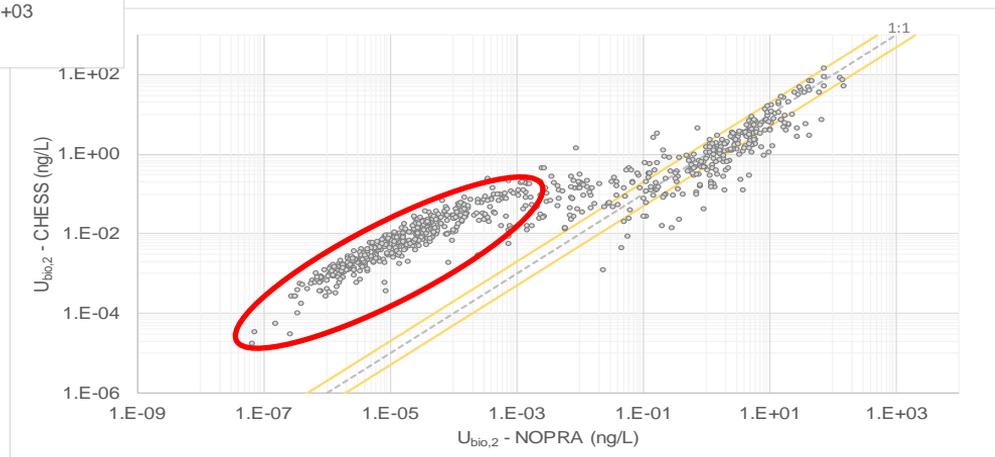
=
similaire



BDD NOPRA vs ANDRA
(Thermochimie)

=
similaire

BDD NOPRA vs CHESS
=
Ecart les plus importants (3
ordre de grandeurs) pour les
plus faibles concentrations



A l'échelle de l'Europe

Species of Uranium	NOPRA dtb.	Thermochimie dtb.	CHES dtb.
$\text{Ca}_2\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3(\text{aq})$	477	477	absent
$\text{UO}_2(\text{CO}_3)(\text{aq})$ 	188	188	29
$\text{CaUO}_2(\text{CO}_3)_3^{2-}$	100	100	absent
$\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ 	10	10	211
$\text{UO}_2(\text{OH})_2(\text{aq})$ 	4	4	197
$\text{UO}_2(\text{OH})_3^-$	4	4	4
$\text{UO}_2(\text{OH})^+$ 	1	1	0
UO_2^{2+} 	1	1	2
$\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$	0*	0*	342
$\text{MgUO}_2(\text{CO}_3)_3^{2-}$	0*	absent	absent
$\text{UO}_2\text{CO}_3\text{F}^-$	0*	absent	absent
$\text{UO}_2\text{SiO}(\text{OH})_3^+$	0*	0*	<1%
UO_2F^+	0*	0*	0*
$(\text{UO}_2)_2\text{CO}_3(\text{OH})_3^-$	0*	0*	<1%
$\text{UO}_2(\text{SO}_4)(\text{aq})$	0*	0*	0
Number of species	15	13	9

U_{bio,2}U_{bio,4}U_{bio,anion}

A l'échelle de l'Europe

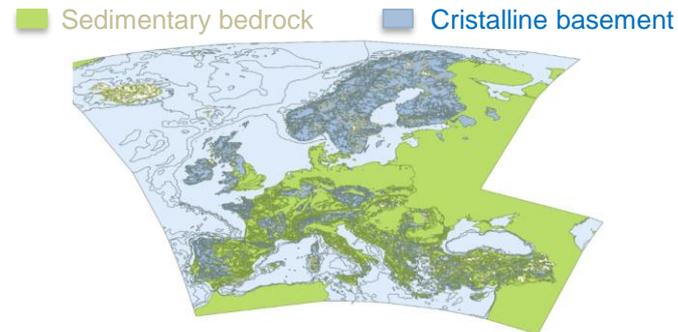
Species of Uranium	NOPRA dtb.	Thermochimie dtb.	CHES dtb.
$\text{Ca}_2\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3(\text{aq})$	477	477	absent
$\text{UO}_2(\text{CO}_3)(\text{aq})$ □	188	188	29
$\text{CaUO}_2(\text{CO}_3)_3^{2-}$	100	100	absent
$\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ □	10	10	211
$\text{UO}_2(\text{OH})_2(\text{aq})$ □	4	4	197
$\text{UO}_2(\text{OH})_3^-$	4	4	4
$\text{UO}_2(\text{OH})^+$ □ □	1	1	0
UO_2^{2+} □ □	1	1	2
$\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$	0*	0*	342
$\text{MgUO}_2(\text{CO}_3)_3^{2-}$	0*	absent	absent
$\text{UO}_2\text{CO}_3\text{F}^-$	0*	absent	absent
$\text{UO}_2\text{SiO}(\text{OH})_3^+$	0*	0*	<1%
UO_2F^+	0*	0*	0*
$(\text{UO}_2)_2\text{CO}_3(\text{OH})_3^-$	0*	0*	<1%
$\text{UO}_2(\text{SO}_4)(\text{aq})$	0*	0*	0
Number of species	15	13	9

U_{bio,2}U_{bio,4}U_{bio,anion}

- Pour 99 % des eaux de l'atlas FOREGS, l'U_{aq} se trouve sous forme de complexes carbonatés avec une dominance du complexe ternaire $\text{Ca}_2\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3(\text{aq})$ (60 % des eaux) (NOPRA/Thermochimie)
- Les complexes carbonatés sont aussi majoritaires (74 % des eaux) (pour CHES)
- Résultats NOPRA et Thermochimie - similaires
- Espèces dans la définition de l'U_{bio} → majoritaire dans certains cas

Signature du contexte lithologique - spéciation

	NOPRA	CHES
Dominant species		
Sedimentary bedrock	$\text{Ca}_2\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3(\text{aq})$	$\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$
Cristalline basement	$\text{UO}_2(\text{CO}_3)(\text{aq})$	$\text{UO}_2(\text{OH})_2(\text{aq})$

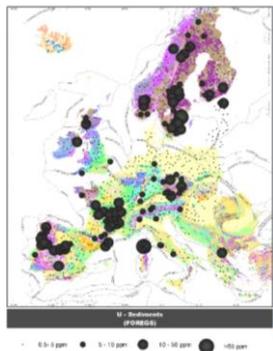


Signature du contexte lithologique - spéciation

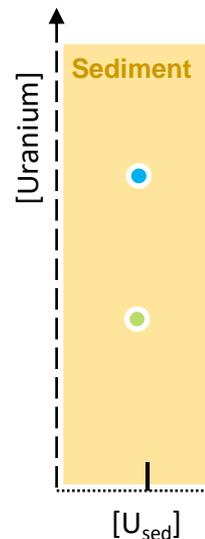
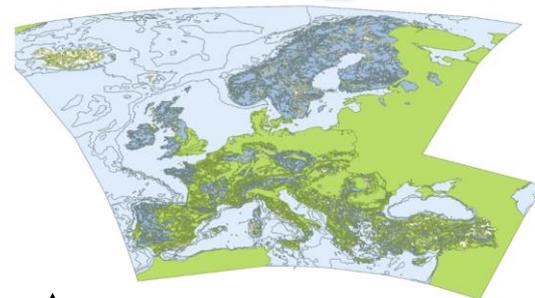
	NOPRA	CHES
Dominant species		
Sedimentary bedrock	$\text{Ca}_2\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3(\text{aq})$	$\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$
Cristalline basement	$\text{UO}_2(\text{CO}_3)(\text{aq})$	$\text{UO}_2(\text{OH})_2(\text{aq})$

Signature du contexte lithologique – [U]

		Sampling qty.	SEDIMENT
			Average U_{sed} (mg/kg)
Lithology	Sedimentary	467	1.64
	Cristallin	234	4.05



■ Sedimentary bedrock ■ Cristalline basement



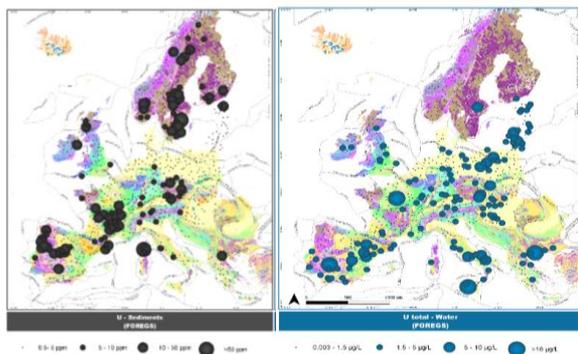
● Sedimentary bedrock ● Cristalline basement

Signature du contexte lithologique - spéciation

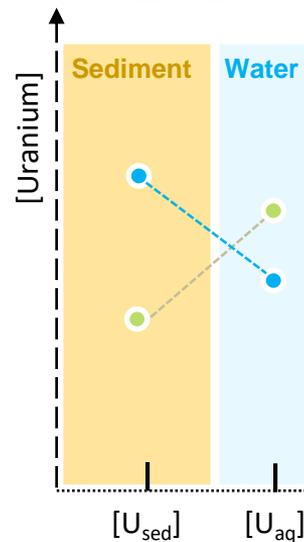
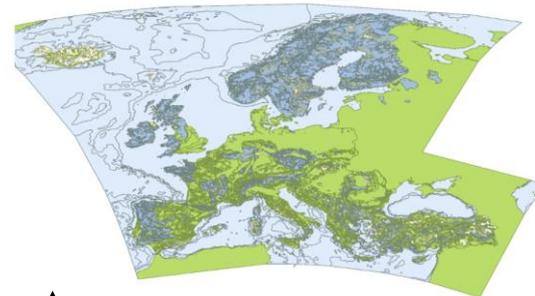
	NOPRA	CHES
Dominant species		
Sedimentary bedrock	$\text{Ca}_2\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3(\text{aq})$	$\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$
Cristalline basement	$\text{UO}_2(\text{CO}_3)(\text{aq})$	$\text{UO}_2(\text{OH})_2(\text{aq})$

Signature du contexte lithologique – [U]

		Sampling qty.	EAU	
			SEDIMENT	
			Average U_{sed} (mg/kg)	Average U_{aq} ($\mu\text{g/L}$)
Lithology	Sedimentary	467	1.64	0.34
	Cristallin	234	4.05	0.15



■ Sedimentary bedrock ■ Cristalline basement



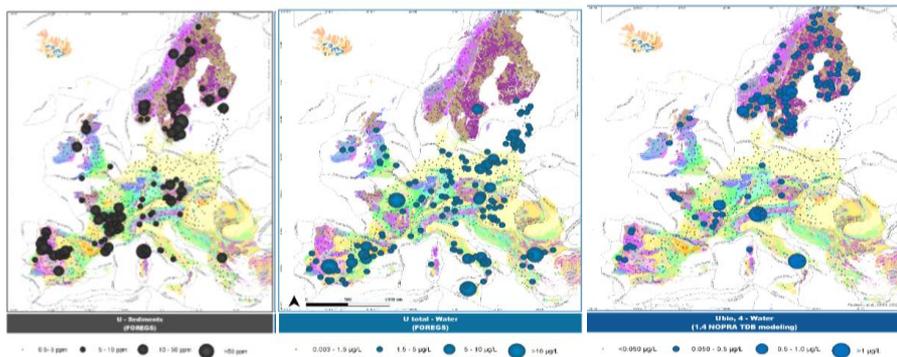
● Sedimentary bedrock ● Cristalline basement

Signature du contexte lithologique - spéciation

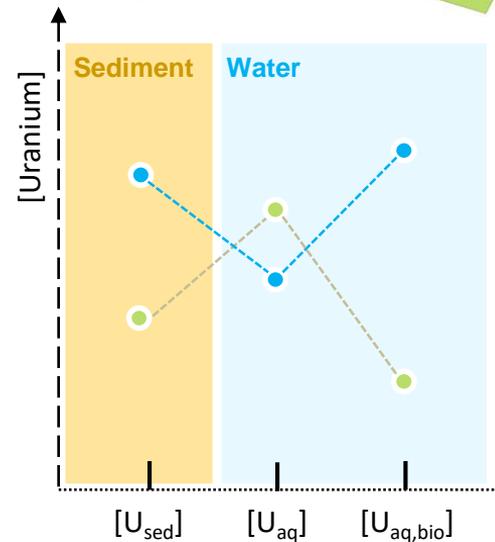
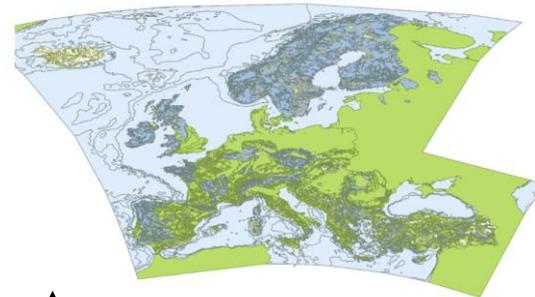
	NOPRA	CHES
Dominant species		
Sedimentary bedrock	$\text{Ca}_2\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3(\text{aq})$	$\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$
Cristalline basement	$\text{UO}_2(\text{CO}_3)(\text{aq})$	$\text{UO}_2(\text{OH})_2(\text{aq})$

Signature du contexte lithologique – [U]

		Sampling qty.	SEDIMENT	EAU			
			Average U_{sed} (mg/kg)	Average U_{aq} (µg/L)	Average bioavailable concentration (ng/L)		
Lithology	Sedimentary	467	1.64	0.34	0.0002	0.03	0.62
	Cristallin	234	4.05	0.15	0.14	4.65	5.14



■ Sedimentary bedrock ■ Cristalline basement



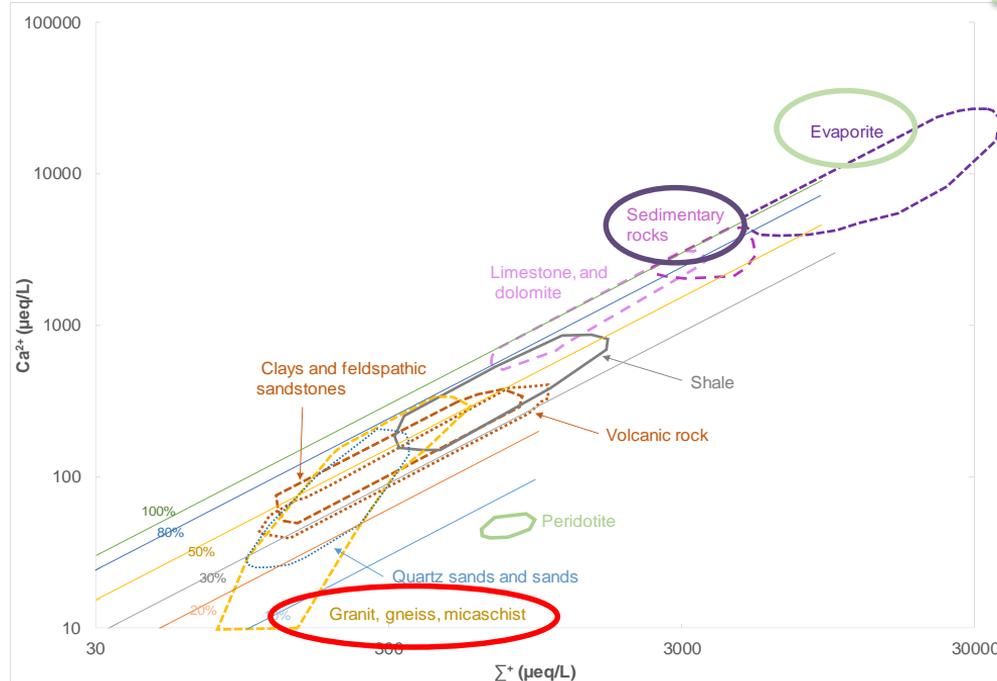
● Sedimentary bedrock ● Cristalline basement

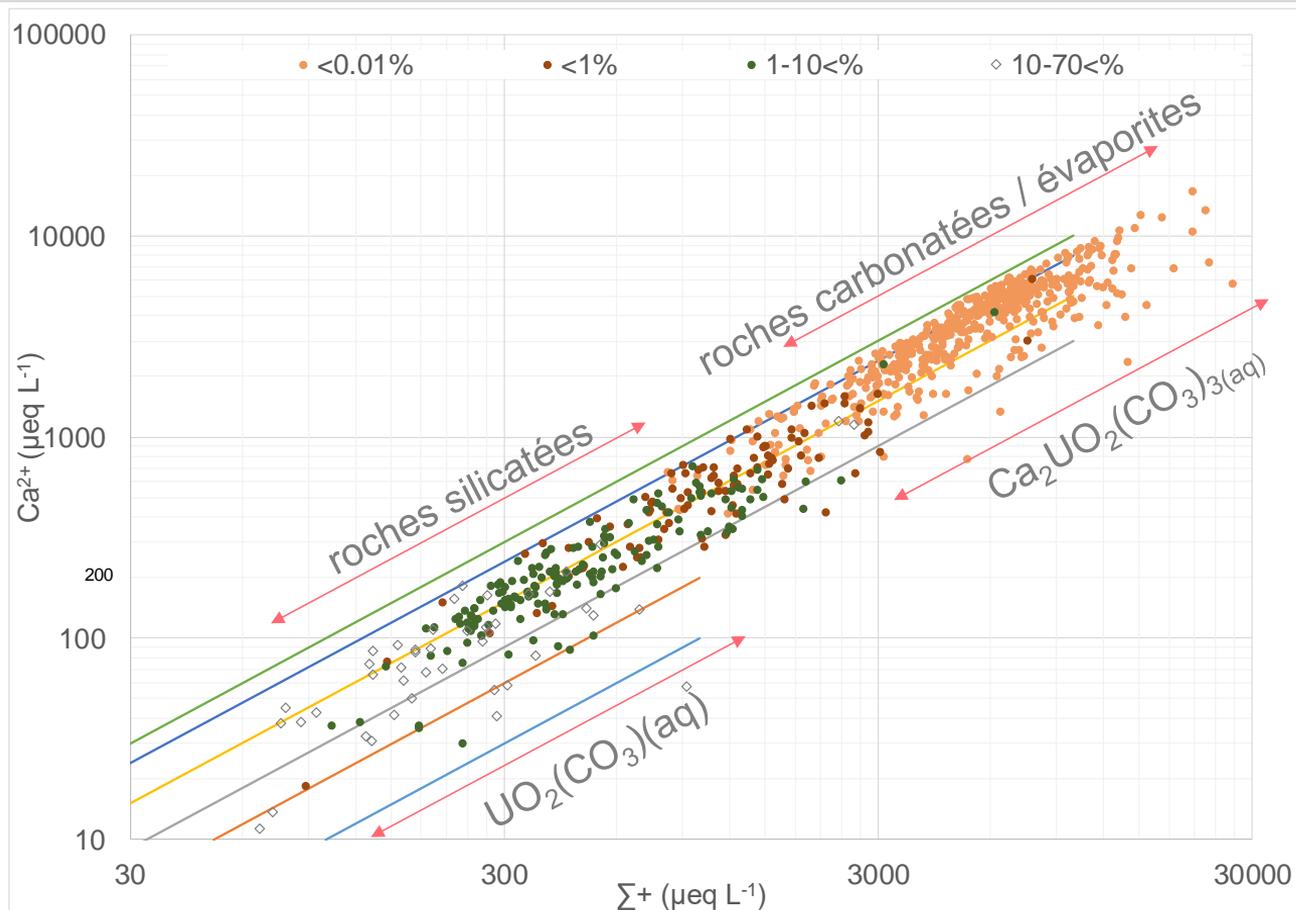
Résultats : relation entre le chimisme des eaux, les espèces dominantes et les concentrations en U

→ Meybeck (1986) : influence de l'altération des minéraux des roches qui composent les bassins versants drainés

- Différents domaines caractérisant trois grandes familles de roches à partir des cations majeurs (Ca, Na, Mg, K) et de la silice éléments

- les eaux issues de l'altération de roches silicatées
- les eaux issues de l'altération de roches carbonatées
- les eaux issues de l'altération de roches à évaporites caractérisées





Prérequis :

[éléments majeurs]

[U]



Seuils proposées =
f(Ca²⁺ et somme des
cations)

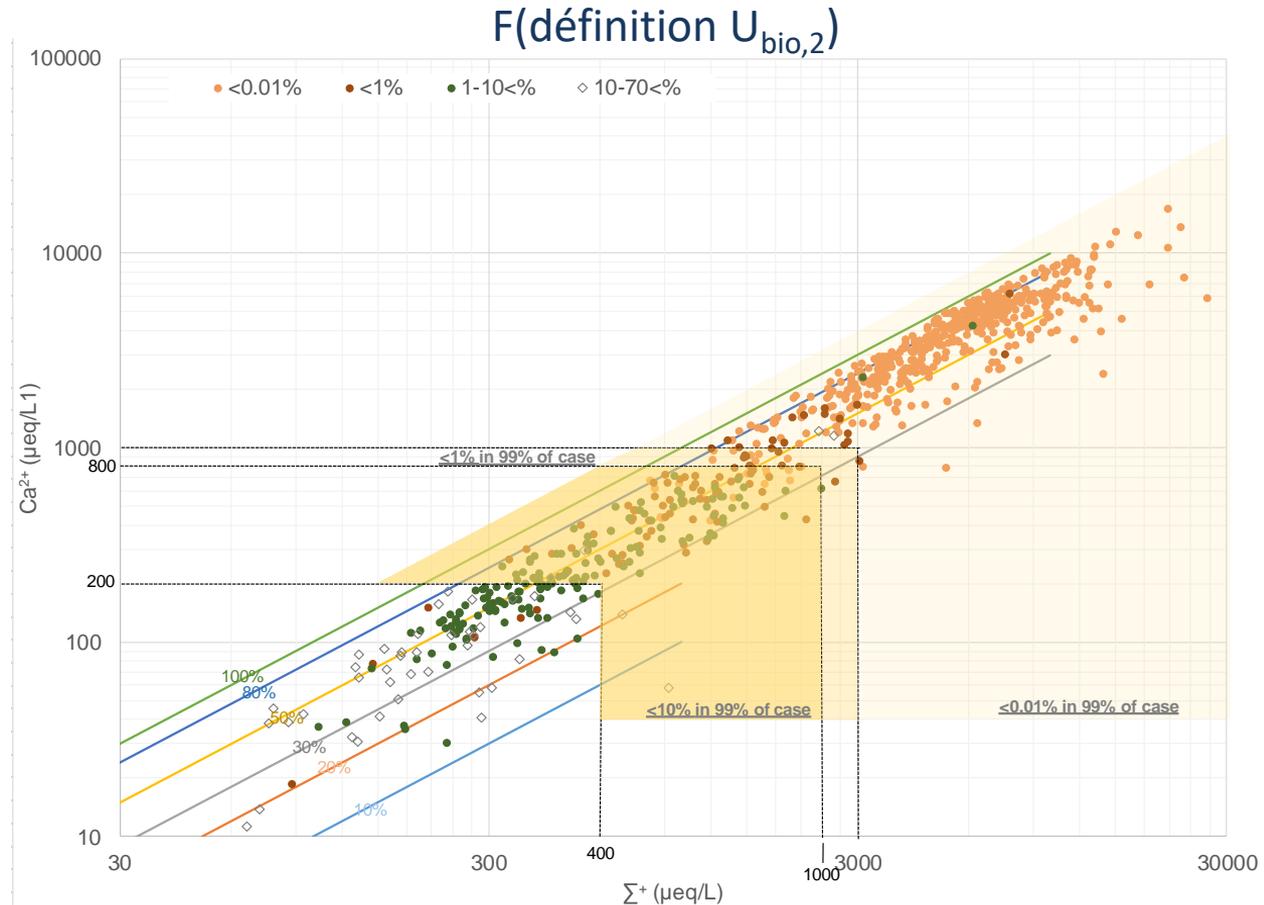
Résultats : Outils d'aide à la décision – Estimer la fraction en U biodisponible en fonction des majeurs

Prérequis :
[éléments majeurs]

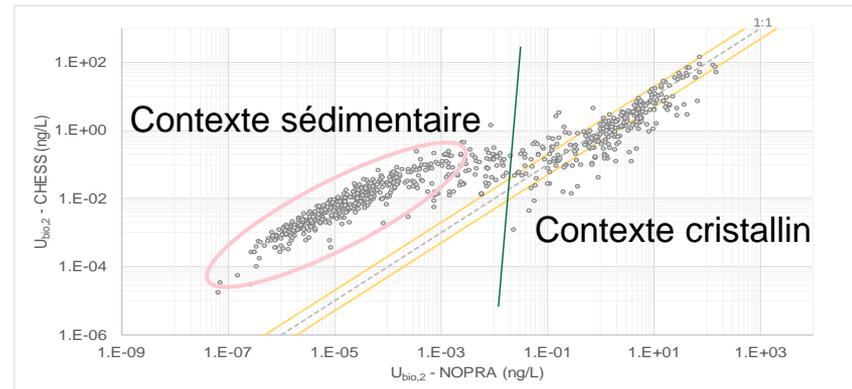
[U]



Seuils proposés =
f(Ca²⁺ et somme des
cations)



- ❑ Combinaison de différentes approches → liens établis entre les $[U_{\text{sed}}]$, $[U_{\text{aq}}]$ et contextes géologiques (cristallin vs sédimentaire) et certains types de roches constituant des bassins versants drainés (silicatées, carbonatées et évaporites)
- ❑ Formes aqueuses dominantes de l'U dans les eaux permettant de retrouver les liens précédents établis par rapport à la lithologie et l'altération des roches
- ❑ Importance de l'utilisation de la BDD qui comportent la description des complexes ternaires $\text{Ca}_n\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{(4-2n)-}$. ➔ Ne pas les considérer peut conduire à une **surestimation des valeurs de U_{bio} calculées**
- ❑ La plus grande variabilité dans les valeurs calculées $[U_{\text{bio}}]$ → Définition de l' U_{bio}
- ❑ Réduction de la variabilité si l'on considère le contexte lithologique (cas des roches de socle cristallin)





DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

Merci de votre attention

IRESNE | DTN | SMTA | LMTE

Institut de recherche sur les systèmes nucléaires pour la production d'énergie bas carbone

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives - www.cea.fr