

A detailed geological map of the area around Monte Reghina. The map shows various geological units in different colors: red for the main mountain area, blue for the northern part, and green for the southern part. Topographic features include the town of Felco, the village of Pozzo, and the area of Casa Mattigna. The map also shows the course of the river Po and the location of the 'Monte Reghina' and 'di Felco' peaks. The map is labeled with various numbers and letters, including '0-1', '0-2', '0-3', '0-4', '0-5', '0-6', '0-7', '0-8', '0-9', '0-10', '0-11', '0-12', '0-13', '0-14', '0-15', '0-16', '0-17', '0-18', '0-19', '0-20', '0-21', '0-22', '0-23', '0-24', '0-25', '0-26', '0-27', '0-28', '0-29', '0-30', '0-31', '0-32', '0-33', '0-34', '0-35', '0-36', '0-37', '0-38', '0-39', '0-40', '0-41', '0-42', '0-43', '0-44', '0-45', '0-46', '0-47', '0-48', '0-49', '0-50', '0-51', '0-52', '0-53', '0-54', '0-55', '0-56', '0-57', '0-58', '0-59', '0-60', '0-61', '0-62', '0-63', '0-64', '0-65', '0-66', '0-67', '0-68', '0-69', '0-70', '0-71', '0-72', '0-73', '0-74', '0-75', '0-76', '0-77', '0-78', '0-79', '0-80', '0-81', '0-82', '0-83', '0-84', '0-85', '0-86', '0-87', '0-88', '0-89', '0-90', '0-91', '0-92', '0-93', '0-94', '0-95', '0-96', '0-97', '0-98', '0-99', '0-100', '0-101', '0-102', '0-103', '0-104', '0-105', '0-106', '0-107', '0-108', '0-109', '0-110', '0-111', '0-112', '0-113', '0-114', '0-115', '0-116', '0-117', '0-118', '0-119', '0-120', '0-121', '0-122', '0-123', '0-124', '0-125', '0-126', '0-127', '0-128', '0-129', '0-130', '0-131', '0-132', '0-133', '0-134', '0-135', '0-136', '0-137', '0-138', '0-139', '0-140', '0-141', '0-142', '0-143', '0-144', '0-145', '0-146', '0-147', '0-148', '0-149', '0-150', '0-151', '0-152', '0-153', '0-154', '0-155', '0-156', '0-157', '0-158', '0-159', '0-160', '0-161', '0-162', '0-163', '0-164', '0-165', '0-166', '0-167', '0-168', '0-169', '0-170', '0-171', '0-172', '0-173', '0-174', '0-175', '0-176', '0-177', '0-178', '0-179', '0-180', '0-181', '0-182', '0-183', '0-184', '0-185', '0-186', '0-187', '0-188', '0-189', '0-190', '0-191', '0-192', '0-193', '0-194', '0-195', '0-196', '0-197', '0-198', '0-199', '0-200', '0-201', '0-202', '0-203', '0-204', '0-205', '0-206', '0-207', '0-208', '0-209', '0-210', '0-211', '0-212', '0-213', '0-214', '0-215', '0-216', '0-217', '0-218', '0-219', '0-220', '0-221', '0-222', '0-223', '0-224', '0-225', '0-226', '0-227', '0-228', '0-229', '0-230', '0-231', '0-232', '0-233', '0-234', '0-235', '0-236', '0-237', '0-238', '0-239', '0-240', '0-241', '0-242', '0-243', '0-244', '0-245', '0-246', '0-247', '0-248', '0-249', '0-250', '0-251', '0-252', '0-253', '0-254', '0-255', '0-256', '0-257', '0-258', '0-259', '0-260', '0-261', '0-262', '0-263', '0-264', '0-265', '0-266', '0-267', '0-268', '0-269', '0-270', '0-271', '0-272', '0-273', '0-274', '0-275', '0-276', '0-277', '0-278', '0-279', '0-280', '0-281', '0-282', '0-283', '0-284', '0-285', '0-286', '0-287', '0-288', '0-289', '0-290', '0-291', '0-292', '0-293', '0-294', '0-295', '0-296', '0-297', '0-298', '0-299', '0-300', '0-301', '0-302', '0-303', '0-304', '0-305', '0-306', '0-307', '0-308', '0-309', '0-310', '0-311', '0-312', '0-313', '0-314', '0-315', '0-316', '0-317', '0-318', '0-319', '0-320', '0-321', '0-322', '0-323', '0-324', '0-325', '0-326', '0-327', '0-328', '0-329', '0-330', '0-331', '0-332', '0-333', '0-334', '0-335', '0-336', '0-337', '0-338', '0-339', '0-340', '0-341', '0-342', '0-343', '0-344', '0-345', '0-346', '0-347', '0-348', '0-349', '0-350', '0-351', '0-352', '0-353', '0-354', '0-355', '0-356', '0-357', '0-358', '0-359', '0-360', '0-361', '0-362', '0-363', '0-364', '0-365', '0-366', '0-367', '0-368', '0-369', '0-370', '0-371', '0-372', '0-373', '0-374', '0-375', '0-376', '0-377', '0-378', '0-379', '0-380', '0-381', '0-382', '0-383', '0-384', '0-385', '0-386', '0-387', '0-388', '0-389', '0-390', '0-391', '0-392', '0-393', '0-394', '0-395', '0-396', '0-397', '0-398', '0-399', '0-400', '0-401', '0-402', '0-403', '0-404', '0-405', '0-406', '0-407', '0-408', '0-409', '0-410', '0-411', '0-412', '0-413', '0-414', '0-415', '0-416', '0-417', '0-418', '0-419', '0-420', '0-421', '0-422', '0-423', '0-424', '0-425', '0-426', '0-427', '0-428', '0-429', '0-430', '0-431', '0-432', '0-433', '0-434', '0-435', '0-436', '0-437', '0-438', '0-439', '0-440', '0-441', '0-442', '0-443', '0-444', '0-445', '0-446', '0-447', '0-448', '0-449', '0-450', '0-451', '0-452', '0-453', '0-454', '0-455', '0-456', '0-457', '0-458', '0-459', '0-460', '0-461', '0-462', '0-463', '0-464', '0-465', '0-466', '0-467', '0-468', '0-469', '0-470', '0-471', '0-472', '0-473', '0-474', '0-475', '0-476', '0-477', '0-478', '0-479', '0-480', '0-481', '0-482', '0-483', '0-484', '0-485', '0-486', '0-487', '0-488', '0-489', '0-490', '0-491', '0-492', '0-493', '0-494', '0-495', '0-496', '0-497', '0-498', '0-499', '0-500', '0-501', '0-502', '0-503', '0-504', '0-505', '0-506', '0-507', '0-508', '0-509', '0-510', '0-511', '0-512', '0-513', '0-514', '0-515', '0-516', '0-517', '0-518', '0-519', '0-520', '0-521', '0-522', '0-523', '0-524', '0-525', '0-526', '0-527', '0-528', '0-529', '0-530', '0-531', '0-532', '0-533', '0-534', '0-535', '0-536', '0-537', '0-538', '0-539', '0-540', '0-541', '0-542', '0-543', '0-544', '0-545', '0-546', '0-547', '0-548', '0-549', '0-550', '0-551', '0-552', '0-553', '0-554', '0-555', '0-556', '0-557', '0-558', '0-559', '0-560', '0-561', '0-562', '0-563', '0-564', '0-565', '0-566', '0-567', '0-568', '0-569', '0-570', '0-571', '0-572', '0-573', '0-574', '0-575', '0-576', '0-577', '0-578', '0-579', '0-580', '0-581', '0

**quel objectif ?**

*P. Bataillard, B. Lemière, V. Laperche et  
L. Rouvreau*

*BRGM, Unité Sites Sols et Sédiments Pollués,  
[p.bataillard@brgm.fr](mailto:p.bataillard@brgm.fr)*

[p.bataillard@brgm.fr](mailto:p.bataillard@brgm.fr)

# Caractérisation des sédiments avant dragage

- De nombreux guides ou méthodologies sont disponibles pour la caractérisation des sédiments avant dragage:
  - norme NF ISO EN 5667,
  - guide de prélèvement de l'Agence de l'Eau Loire Bretagne,
  - guide du Comité Technique National sur la Gestion des Sédiments,
  - guide Environnement Canada,
  - guide dragage VNF (probablement le plus opérationnel pour les rivières)
  - ...
- Aucun anticipe l'évolution de ces matrices après mise à terre.

# Caractérisation des sédiments avant dragage

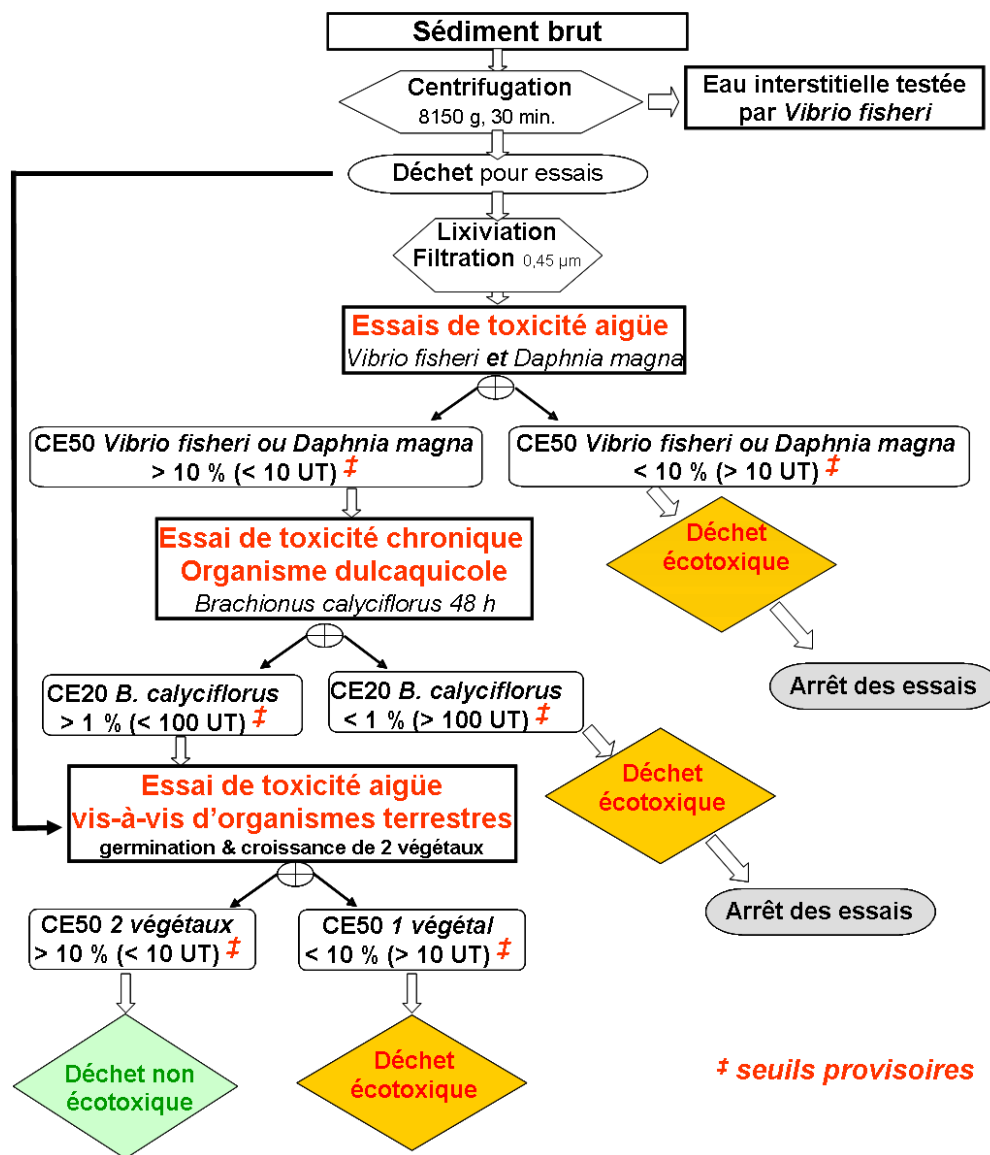
- > Compte tenu du développement des connaissances sur l'impact des contaminants sur le biote, il est probable que le dragage et la mise à terre se développent à l'avenir.
- > Les sédiments sortis de l'eau pour entretien ou remédiation environnementale sont des déchets.
- > Le maître d'ouvrage doit définir leur devenir en renseignant avant tout s'il s'agit de déchets dangereux ou non.

# Critères de dangerosité d'un déchet H14 et H15

Annexe I à l'article R541-8 du code de l'environnement

- > H14 " Ecotoxique " : substances et préparations qui présentent **ou peuvent présenter des risques immédiats ou différés** pour une ou plusieurs composantes de l'environnement.
- > H15 Substances et préparations susceptibles, **après élimination, de donner naissance, par quelque moyen que ce soit, à une autre substance, par exemple un produit de lixiviation, qui possède l'une des caractéristiques énumérées ci-avant.**

# Protocole « H14 » actuellement à l'étude

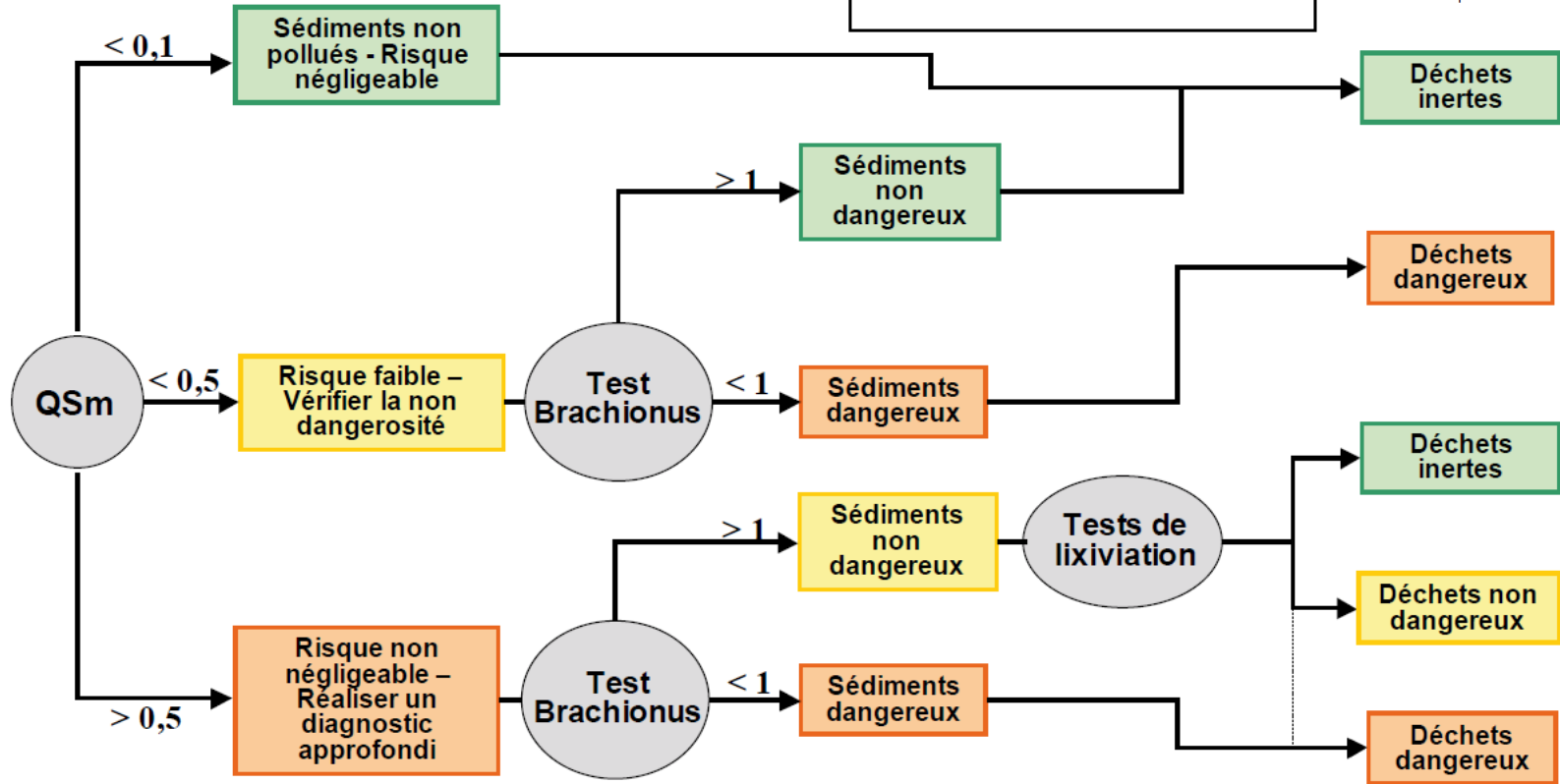


H15 pas  
exploré pour  
le moment

# Procédure actuelle de caractérisation de VNF

$$Q_{Sm} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Ci}{Si}}{n}$$

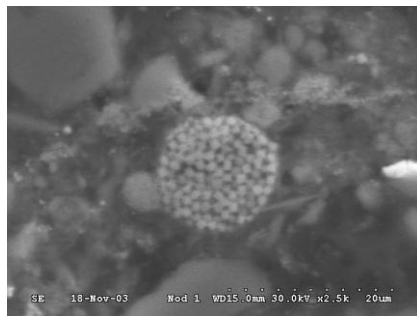
- $G_i$  : concentration du polluant  $i$  dans le sédiment
- $S_i$  : concentration seuil du polluant  $i$  figurant dans l'arrêté du 9 août 2006
- $n$  : nombre de polluants mesurés



## Schéma simplifié du protocole de caractérisation des sédiments de Voies Navigables de France (VNF, 2008)

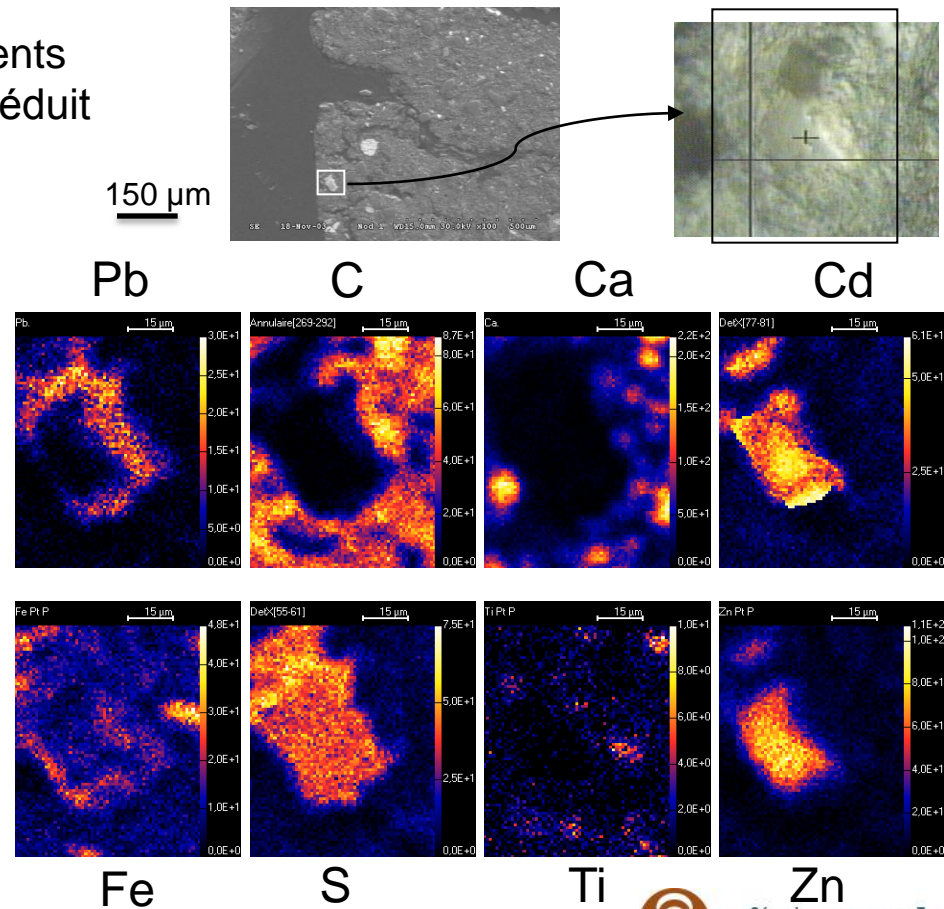
# Exemple de spéciation des métaux dans le sédiment avant dragage

Cartes de fluorescence X des éléments présents dans un sédiment à l'état réduit obtenues par  $\mu$ PIXE



20  $\mu$ m

Pyrite Framboïdale



L'association S/métaux est soulignée



Géosciences pour une Terre durable  
**brgm**

# Solubilité de quelques minéraux du Zn, du Cd et du Pb

(source: Base de données chess.tdb, Ecole des Mines de Paris, <http://chess.ensmp.fr>)

Minéral	Formule	$-\log(K_s)$	Solubilité (mg l <sup>-1</sup> )
Galène	PbS	-27,8	$3,0 \cdot 10^{-9}$
Anglésite	PbSO <sub>4</sub>	-7,9	35,9
Cerussite	PbCO <sub>3</sub>	-13,5	$4,5 \cdot 10^{-2}$
Pyromorphyte	Pb <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> Cl	-84,8	$5,1 \cdot 10^{-4}$
Sphalérite	ZnS	-24,4	$6,3 \cdot 10^{-8}$
	ZnSO <sub>4</sub>	3,6	2500
Smithsonite	ZnCO <sub>3</sub>	-9,9	1,45
Greenockyte	CdS	-28,9	$5,4 \cdot 10^{-10}$
	CdSO <sub>4</sub>	-0,11	$1,8 \cdot 10^5$
Otavite	CdCO <sub>3</sub>	-12,1	0,15

Les phases oxydées sont beaucoup plus solubles



En présence d'oxygène, les phases fixatrices de métaux du sédiment sont déstabilisées.

Les formes des métaux évoluent selon un schéma classique :

- *Oxydation des sulfures*
- *Libération de métaux, de sulfates et de protons*
- *Dissolution de la calcite et neutralisation des protons*
- *Précipitation de gypse et d'oxyde de fer (piégeage potentiel de Zn)*
- *Précipitation possible de carbonates, d'alumino-silicates, de phosphates*
- ...

**Quelles conséquences sur la mobilité potentielle des métaux et la toxicité des sédiments à court terme ?**

# Illustration sur un cas d'étude du nord de la France

Originalité du dispositif de Lallaing (mis en place en 1997)

*Teneurs totales : Pb 900 mg kg<sup>-1</sup>, Cd 200 mg kg<sup>-1</sup>, Zn 6000 mg kg<sup>-1</sup>*



Sédiment déposé sur membrane imperméable



Sédiment déposé sur sol drainant



# Conséquence de la mise à terre sur la mobilité des contaminants

Aperçu des parcelles 6 ans plus tard :



Sédiment déposé sur membrane imperméable

Spéciation des métaux proche de la **spéciation primaire**



Sédiment déposé sur sol drainant

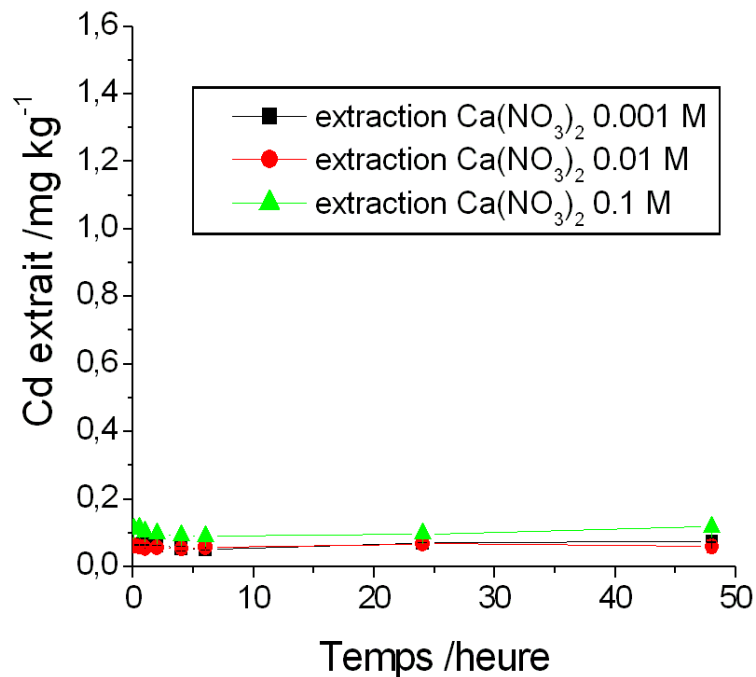
**Spéciation secondaire**



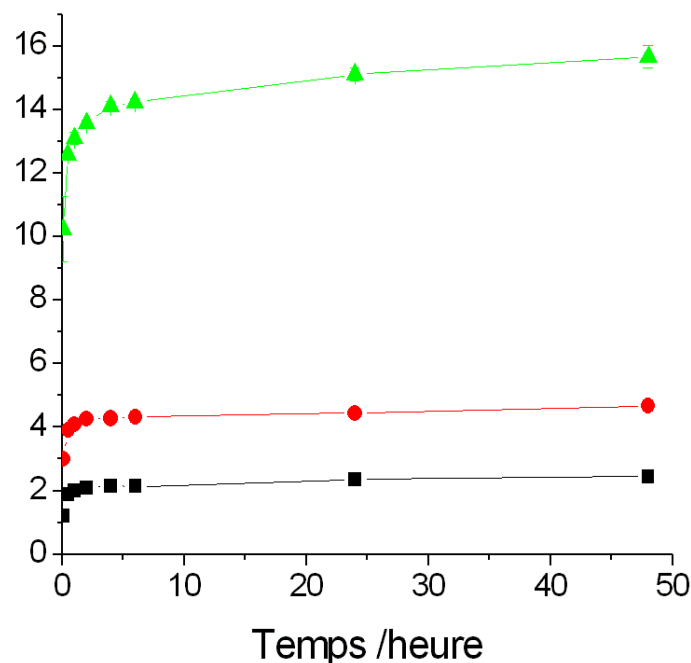
Comparaison possible du comportement des éléments

# Extraction de Cd par une solution de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$

Sédiment déposé pendant 6 ans  
sur une membrane imperméable

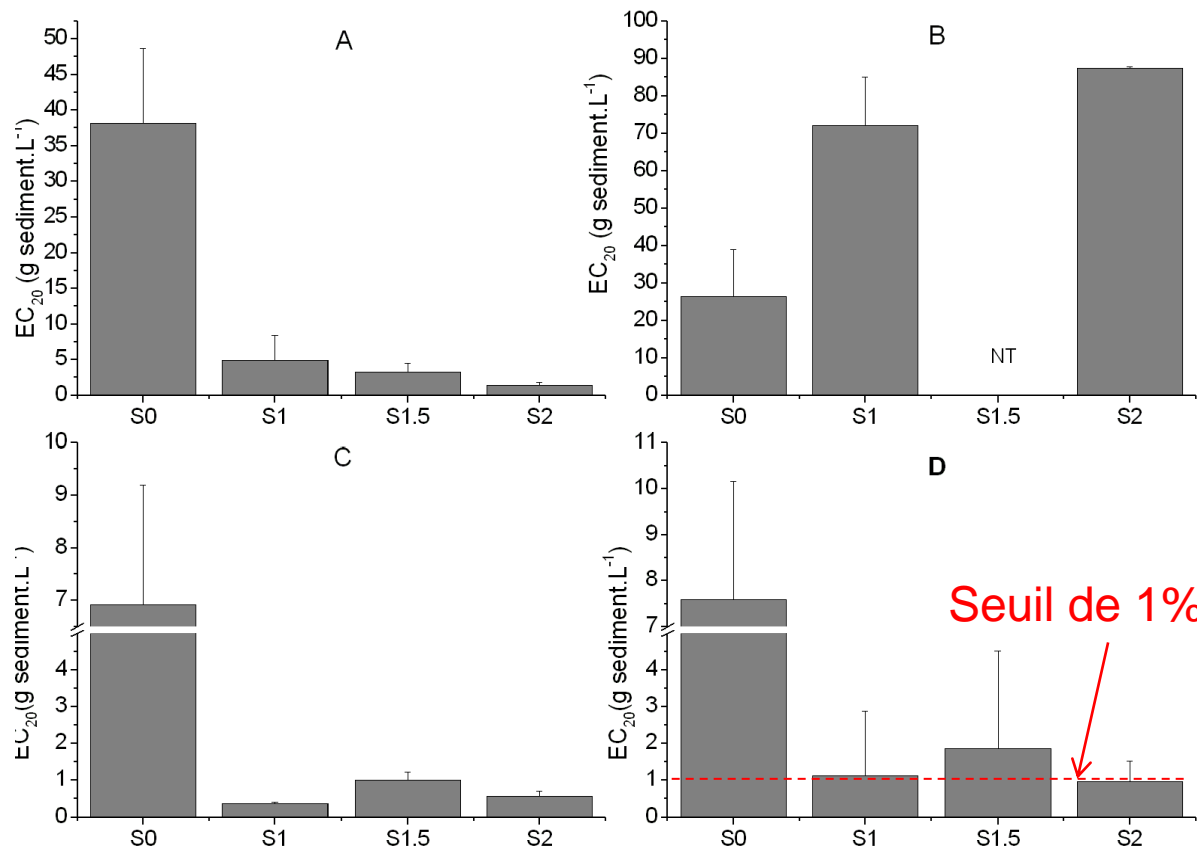


Sédiment déposé pendant 6 ans  
sur un sol perméable



**La mise à terre augmente la  
mobilité de Cd**

# Toxicité des sédiments avant (S0) et après mise à terre (S1, S1,5 et S2)



La mise à terre augmente la toxicité du sédiment pour 3 essais sur 4

Les résultats de l'essai *Brachionus* (D) amène à classer le sédiment oxydé comme dangereux

Evolution de la toxicité du sédiment initial (S0) puis après 12 (S1), 18 (S1.5) et 24 (S2) mois de dépôt en conditions oxydantes d'après les essais (A) **Microtox**, (B) **immobilisation de *D. magna***, (C) inhibition de croissance de ***P. subcapitata*** et (D) inhibition de reproduction de ***Brachionus calyciflorus*** - NT: non toxique (source : Piou et al., 2009).

# Paramètres proposés au catalogue des principaux laboratoires d'analyse

Actuellement, une fois le nombre et la répartition des échantillons choisie, les caractérisations portent sur:

- masse volumique sur échantillon brut,
  - perte au feu à 450°C,
  - matière sèche,
  - pH extrait à l'eau,
  - granulométrie,
  - azote Kjeldahl,
  - carbone organique total (COT).
- Al, As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg, P,
  - 16 HAPs,
  - PCBi,
  - Organo-étains (MBT, DBT, TBT),
  - Identification/quantification d'Escherichia coli

**Pas d'anticipation possible des transformations: mesurer au moins sur site Eh (sans aérer l'échantillon).**

**Au laboratoire, travailler sur la spéciation de S et Fe.**

# Conclusion

- > Le dépôt sur sol drainant d'un sédiment contaminé augmente la mobilité et la biodisponibilité du zinc et du cadmium qu'il contient.
- > L'analyse des risques en vue de la mise en dépôt (valorisation) doit prendre en compte cette évolution.
- > Pour anticiper les évolutions, les efforts de recherche portent sur **l'identification**, la **hiérarchisation** et la **modélisation** des mécanismes impliqués dans les transformations de la spéciation et les transferts des métaux vers les écosystèmes.