

Centre Ecotox
EPFL ENAC IIE-GE
Station 2
CH-1015 Lausanne

T+41 (0) 21 693 62 58
F +41 (0) 21 693 80 35
info@oekotoxzentrum.ch
www.centreecotox.ch

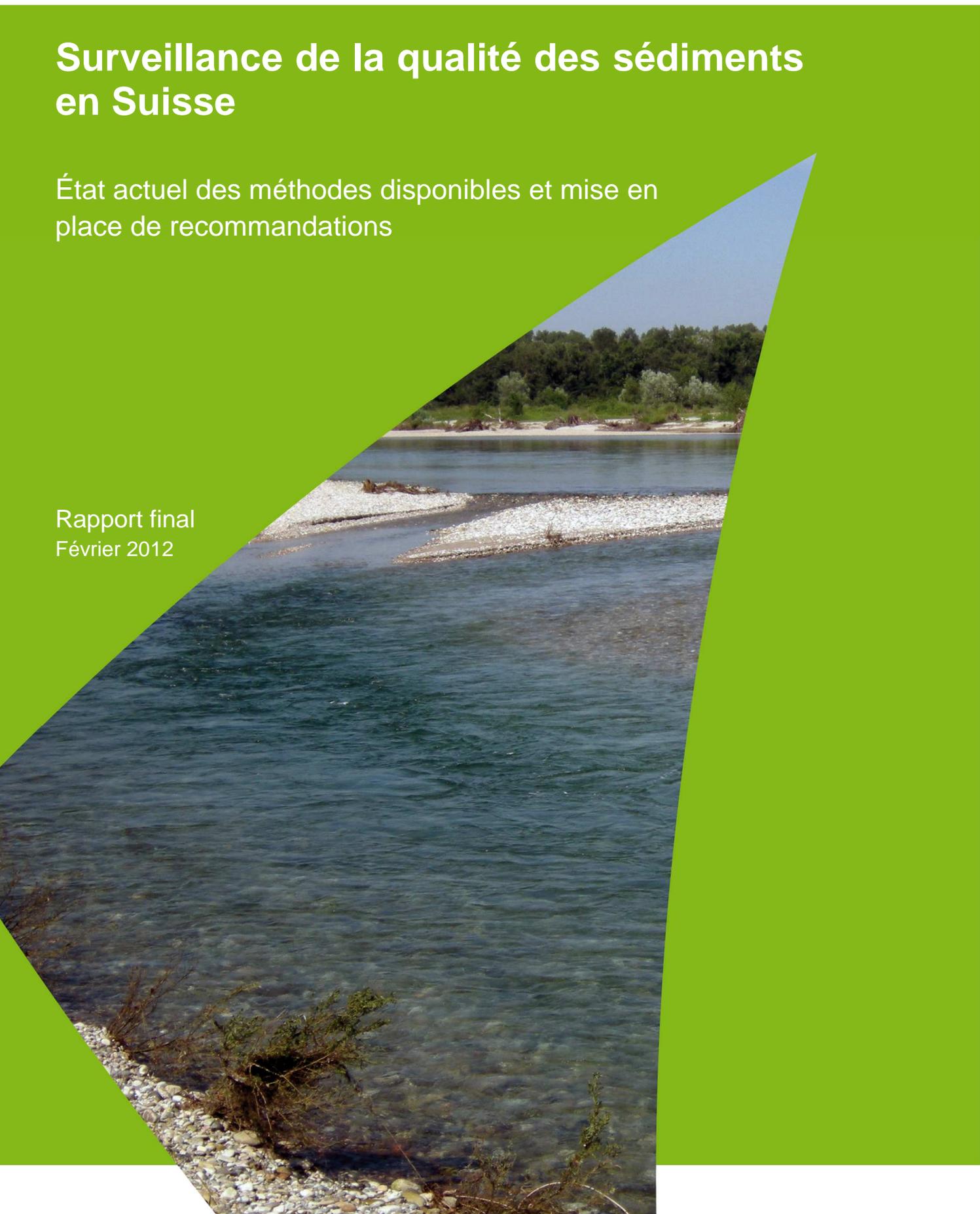


Centre Suisse d'écotoxicologie appliquée
Eawag-EPFL

Surveillance de la qualité des sédiments en Suisse

État actuel des méthodes disponibles et mise en
place de recommandations

Rapport final
Février 2012



Surveillance de la qualité des sédiments en Suisse :

État actuel des méthodes disponibles et mise en place de recommandations

Auteur :

Centre Suisse d'écotoxicologie appliquée (Centre Ecotox)
Eawag/EPFL
Station 2 ENAC-IIE
CH-1015 Lausanne

Rébecca Flück

+41 (0)21 693 37 85
rebecca.flueck@oekotoxzentrum.ch

L'auteur souhaite remercier les initiateurs du projet :

Institut de politiques territoriales et d'environnement humain (IPTEH)
Université de Lausanne
CH-1015 Lausanne

Nathalie Chèvre

Centre Ecotox Eawag/EPFL

Sophie Campiche

Les initiateurs du projet ainsi que l'auteur souhaitent remercier les personnes suivantes pour leurs commentaires et contributions :

Groupe de travail

Laboratoire central environnemental (CEL), EPFL
CH-1015 Lausanne

Felipe de Alencastro

Centre Ecotox Eawag/EPFL

Sophie Campiche

IPTEH Université de Lausanne

Nathalie Chèvre

Laboratoire d'Écotoxicologie, Cemagref
FR- 69336 Lyon Cedex 9

Benoit Ferrari

Soluval Santiago, Rue Edouard-Dubied 2
CH- 2108 Couvet

Sergio Santiago

Groupe de discussion

Laboratoire d'Écotoxicologie, Cemagref

Marc Babut

Interkantonales Labor, Canton de Schaffhouse
CH- 8201 Schaffhausen

Frank Lang

Institut F.-A. Forel, Université de Genève
CH- 1290 Versoix

Jean-Luc Loizeau

Laboratoire de technologie écologique (ECOL), EPFL
CH- 1015 Lausanne

Luca Rossi

Laboratoire de la protection des eaux et du sol (GBL), Canton de Berne
CH- 3014 Berne

Rico Ryser

Hydrobiologiste
CH- 1207 Genève

Régis Vivien

Centre Ecotox Eawag/EPFL

Inge Werner

Les initiateurs du projet ainsi que l'auteur souhaitent également remercier tous les offices cantonaux de l'environnement pour leur participation au questionnaire et le partage d'information.

Lausanne, Centre Suisse d'écotoxicologie appliquée Eawag/EPFL, 24.02.2012.

Avant-propos

Le Centre Suisse d'écotoxicologie appliquée s'intéresse à l'étude des sédiments, car ils forment un compartiment clé des écosystèmes aquatiques. D'une part, les sédiments jouent un rôle important pour de nombreuses espèces en tant qu'habitat ou site de ponte, représentant ainsi un milieu non négligeable de diversité biologique, mais d'autre part, les sédiments peuvent adsorber des polluants persistants, agissant alors comme une réserve de polluants mais surtout comme une source à long-terme de contamination pour les eaux de surface. Par des analyses chimiques, biologiques et écotoxicologiques, il est possible d'évaluer la qualité environnementale et un éventuel risque toxique des sédiments et ainsi d'identifier des sites contaminés. En Suisse, selon l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux, 1998), les sédiments ne devraient pas accumuler de polluants afin d'assurer la protection des organismes aquatiques. Toutefois, il manque un consensus au niveau national pour les méthodes de surveillance des sédiments et des critères de qualité font encore défaut en Suisse pour caractériser le risque toxique des sédiments dans nos rivières et lacs. Le but de ce projet est de pouvoir à long-terme établir des recommandations harmonisées pour la Suisse et de mettre à disposition un guide complet de recommandations allant des méthodes d'échantillonnage des sédiments à l'interprétation de tests écotoxicologiques. Dans un premier temps, il s'est avéré nécessaire d'établir l'état de l'art des méthodes disponibles pour l'évaluation de la qualité des sédiments, sous trois aspects, la chimie, l'écotoxicologie et la biologie, mais aussi de passer en revue les connaissances déjà disponibles dans les cantons suisses dans ce domaine. Ce présent rapport relate les premiers résultats de cet état de l'art, met en évidence les lacunes et propose des mesures à prendre.

Sommaire

Avant-propos	i
Sommaire	ii
Liste des figures	iii
Liste des tableaux	iv
Partie 1 : Introduction et problématique	1
1.1. La contamination des sédiments et les risques associés	1
1.2. Dispositions légales et recommandations existantes en Suisse et en Europe.....	2
1.3. Définition de la problématique et objectifs du projet.....	3
Partie 2 : État actuel de l'évaluation de la qualité et de la toxicité des sédiments	4
2.1. Définition et rôles du compartiment sédiment	4
2.2. Méthodes de surveillance de la qualité des sédiments	4
2.3. Valeurs de référence et critères de qualité sédiment : méthodes de calcul et utilisation...6	
2.3.1. Méthodes de calcul	6
2.3.1.1. Approche (géo-) chimique	6
2.3.1.2. Approche théorique	6
2.3.1.3. Approche écotoxicologique	6
2.3.1.4. Approche écologique.....	6
2.3.1.5. Approche de type triade	6
2.3.1.6. Approche consensuelle	6
2.3.2. Utilisation des critères de qualité : classification des sédiments.....	10
2.4. Connaissances actuelles des cantons suisses dans l'étude des sédiments.....	11
2.4.1. Approche chimique	11
2.4.2. Approche écologique	13
2.4.3. Approche écotoxicologique	13
Partie 3 : Identification des lacunes et des besoins	14
3.1. Mise en évidence des lacunes dans la surveillance de la qualité des sédiments	14
3.2. Besoins et intérêt des cantons suisses	14
Partie 4 : Recommandations et mesures à prendre	16
4.1. Critères de qualité sédiment pour la Suisse	16
4.2. Cartographie de la contamination des sédiments de rivières en Suisse et analyses des données environnementales.....	17
4.3. Harmonisation des méthodes et des stratégies d'échantillonnage	21
4.4. Conclusions et perspectives	22
Références	24
Annexe	27

Liste des figures

- Figure 1* : Étapes du processus vers l'élaboration de recommandations pour l'évaluation de la qualité des sédiments en Suisse3
- Figure 2* : Principe de l'équilibre de partition7
- Figure 3* : Application d'un coefficient de partition pour le calcul de la concentration prévisible de non effet dans le sédiment ($PNEC_{sed}$) (European Commission, 2003)7
- Figure 4* : Calcul des critères de qualité Concentration seuil produisant un effet (CSE) et Concentration produisant un effet probable (CEP) (Environnement Canada et ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, 2007)8
- Figure 5* : Exemple de distribution de sensibilité des espèces et de détermination de la HC5 pour les HAPs dans le milieu marin (Leung *et al.*, 2005)8
- Figure 6* : Substances analysées dans les sédiments en place par les cantons suisses. Les cercles rouges représentent les deux groupes de substances les plus souvent définis comme prioritaires 12
- Figure 7* : « Critères de qualité » utilisés par les treize cantons analysant/ayant déjà analysé des sédiments en place (une graduation signifie une occurrence du critère par canton) 13
- Figure 8* : Mise en évidence des lacunes dans l'évaluation des sédiments au vu des résultats de l'enquête auprès des cantons suisses 14
- Figure 9* : Priorisation de l'importance des besoins et de l'intérêt des cantons concernant la surveillance des sédiments résultant des réponses au questionnaire..... 15
- Figure 10* : Contamination des sédiments de quelques sites dans les rivières suisses pour le cuivre (a) et le nickel (b). Source pour les fonds graphiques : *Swisstopo*. Propriété des données : cantons 19
- Figure 11* : Distribution des données de concentrations mesurées en Suisse pour le cuivre (a) (N = 355) et le nickel (b) (N = 355) sous forme d'histogrammes.....20

Liste des tableaux

<i>Tableau 1</i> : Revue des approches d'évaluation de la qualité et de la toxicité des sédiments en Europe (principalement basée sur den Besten <i>et al.</i> , 2003)	5
<i>Tableau 2</i> : Valeur du facteur de sécurité selon le nombre de résultats de tests de toxicité à long-terme sur organismes benthiques disponibles (European Commission, 2003)	8
<i>Tableau 3</i> : Proposition de classification des sédiments selon les valeurs TEC et PEC (Macdonald <i>et al.</i> , 2000)	10
<i>Tableau 4</i> : Valeurs TEC (Threshold Effect Concentration) et PEC (Probable Effect Concentration) pour les sédiments d'eau douce, développés par Macdonald <i>et al.</i> , 2000 ...	17
<i>Tableau 5</i> : Résultat de la classification des sédiments suisses pour le cuivre et le nickel ..	18

Partie 1 : Introduction et problématique

1.1. La contamination des sédiments et les risques associés

La contamination des sédiments des rivières ou des lacs est un constat pour certains sites soumis à des pressions anthropiques fortes. La Suisse n'échappe pas à cette problématique qui peut engendrer des effets négatifs sur les écosystèmes aquatiques mais aussi sur l'Homme par la diffusion de la pollution dans les eaux souterraines ou encore la consommation de poissons contaminés. En Suisse, il a été montré que les poissons peuvent être contaminés par les polychlorobiphényles (PCBs) et les dioxines (PCDD), qui s'accumulent dans leurs graisses (Schmid *et al.*, 2010). Les poissons se nourrissant entre autres d'invertébrés benthiques, exposés aux contaminants par contact avec le sédiment, un transfert de la pollution est possible du sédiment au biote avec un risque d'accumulation non négligeable des contaminants le long de la chaîne trophique, touchant les consommateurs secondaires (Babut, 2011). La qualité des sédiments peut également être affectée par les eaux de ruissellement dans les milieux urbains ou à trafic routier important, déposant des polluants métalliques (Cu, Zn, etc.) et organiques (hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAPs), par exemple) en grande quantité au fond des cours d'eau. Dans le cadre du projet Storm (Rossi *et al.*, 2004), des analyses de toxicité et de contamination des sédiments ont été réalisées à l'amont et à l'aval de déversoirs d'orage de trois cours d'eau suisses (l'Allaine dans le Jura, le canal Sion-Riddes dans le Valais, et l'Urtenen dans le canton de Berne) (Margot, 2008 ; Curdy, 2010). Les résultats de ces études ont démontré que les déversoirs et les rejets pluviaux de l'autoroute avaient un impact significatif sur la qualité des sédiments, tant du point de vue de la toxicité sur les organismes aquatiques (tests écotoxicologiques), que de l'accumulation de substances toxiques (dépassement de valeurs seuils), telles que le cuivre ou le zinc. Des contaminations conséquentes ont aussi été relevées dans les sédiments accumulés au pied de barrages hydroélectriques. L'analyse des sédiments de la retenue de Verbois, principal ouvrage hydroélectrique du Rhône genevois, par exemple, démontre une accumulation significative de contaminants (métaux lourds, HAPs et PCBs) (Institut Forel, 2007 ; 2010). De même, les sédiments de barrages en aval de zones urbaines suisses montrent une grande contamination, notamment métallique (Wildi *et al.*, 2004). Dans le bassin lémanique, même si les concentrations en métaux lourds semblent avoir diminué depuis les premières études, certains sites montrent encore une pollution importante des sédiments dans le lac et dans ses affluents (Vernet, 1977 ; Arbouille *et al.*, 1989 ; CIPEL, 1993 ; 2008). Les analyses de sédiments de lac, comme le lac de Zürich par exemple (Zürich AWEL, 2006), de même que les sédiments des grandes rivières, comme le Rhin (BMG, 2007), sont aujourd'hui intégrées dans des programmes de surveillance de la qualité des eaux superficielles.

Comme dénoté ci-dessus, une contamination des sédiments existe en Suisse. Les sédiments sont analysés plus ou moins régulièrement pour leur qualité chimique. Cependant, l'évaluation de ce compartiment n'est pas clairement définie dans la législation de la protection des eaux de surface.

1.2. Dispositions légales et recommandations existantes en Suisse et en Europe

En Suisse, l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux) (OFEV, 1998a) a pour but de protéger les eaux superficielles et précise que la qualité de l'eau doit être telle que « [...] les sédiments ne contiennent pas de substances de synthèse persistantes » (OEaux, Annexe 1.3.b) et que « les substances pouvant entraver les processus biologiques qui permettent aux végétaux et aux animaux de couvrir leurs besoins physiologiques fondamentaux ne s'accumulent pas dans les sédiments » (OEaux, Annexe 1.3.c). Cet aspect qualitatif n'est cependant pas complété par des valeurs quantitatives définies (valeurs seuils) à ne pas dépasser dans les sédiments pour les substances contaminantes, comme c'est le cas pour l'eau avec des exigences numériques fixées. En outre, il n'existe pas de recommandations harmonisées pour les méthodes d'analyse des sédiments et l'évaluation du risque des sédiments contaminés pour l'environnement et pour l'Homme. Les sédiments devraient être soumis à un programme de suivi de leur contamination, comme cela est le cas pour les sédiments dragués ou le compartiment aquatique. En effet, pour les sédiments dragués, les cantons peuvent appliquer leurs propres directives (SESA, 2005) ou des recommandations fédérales telles que l'ordonnance sur la protection des sols (OSol) (OFEV, 1998b), la directive sur la gestion des déchets (OTD) (OFEV, 1990), la directive sur les matériaux d'excavation (OFEV, 1999) et les informations sur le dragage de sédiments lacustres dans les ports et voies navigables (OFEV, 1995). Des valeurs indicatives facilitent alors la prise de décision sur le sort des matériaux dragués.

Concernant la qualité des eaux de surface, celle-ci est évaluée de manière globale grâce au système modulaire gradué (SMG) (OFEV, 1998c ; Binderheim & Göggel, 2007). Le SMG intègre des investigations portant non seulement sur la chimie de l'eau, mais aussi sur la structure des cours d'eau, leur régime d'écoulement et les biocénoses animales, végétales et microbiologiques qu'ils abritent. Des méthodes permettant d'analyser et d'apprécier l'état des cours d'eau suisses selon des critères uniformes, sur les aspects physico-chimiques, hydromorphologiques, biologiques et écotoxicologiques, sont en cours d'élaboration par l'OFEV, en collaboration avec les services cantonaux et l'Eawag. Cependant, dans ce système d'évaluation complet, le compartiment sédiment n'a pas été inclus.

A l'échelle européenne, en revanche, depuis le début des années 2000, le sédiment a pris une place importante dans l'évaluation de l'état écologique des cours d'eau. En effet, après avoir longtemps ignoré les sédiments, la Directive cadre sur l'eau (European Parliament and Council, 2000a), qui a pour objectif le bon état écologique d'ici 2015 des cours d'eau, préconise, dans son approche par bassin versant, le développement de critères de qualité pour les sédiments pour certaines des substances prioritaires définies (European Parliament and Council, 2000b ; Förstner, 2007). Cependant, le sédimentaire ne bénéficie encore d'aucune législation européenne, la commission européenne recommandant les méthodes pour les pays impliqués en les encourageant à établir leur propre législation. Des méthodes européennes ont également été publiées pour le monitoring des sédiments (European Commission, 2010).

Malgré la progression en Europe, le compartiment sédimentaire n'a donc pas encore été pris en compte en Suisse dans la législation, alors que c'est le cas pour l'eau et les sédiments dragués.

1.3. Définition de la problématique et objectifs du projet

La contamination des sédiments suisses par des substances métalliques ou organiques persistantes existe et présente des risques pour les écosystèmes aquatiques. Le manque de recommandations harmonisées pour la surveillance de la qualité des sédiments en place apparaît comme une problématique significative.

Ainsi, notre projet a pour objectif à long-terme de mettre en place des recommandations de méthodes afin de qualifier et quantifier la pollution des sédiments en Suisse de manière harmonisée. Le but est de mettre à disposition un guide national pour la surveillance de la qualité des sédiments basé sur une approche de type triade chimie-biologie-écotoxicologie (Chapman, 1990). Le guide devrait proposer des valeurs seuils de qualité, discuter la pertinence de différents tests écotoxicologiques et l'utilisation d'outils de bioindication, sans oublier la recommandation des méthodes de prélèvement et d'analyse.

Le présent rapport a pour objet de présenter les premières étapes du projet. Un état de l'art des connaissances dans le domaine de l'évaluation de la qualité et la toxicité des sédiments a ainsi été réalisé (Partie 2). Cette étude a montré que l'approche chimique prédomine et que le recours à des critères de qualité pour une évaluation du risque est très fréquent. Ainsi les méthodes de dérivation des critères de qualité ont été étudiées en détail (Partie 2, C). Associé à une enquête auprès des offices cantonaux de protection de l'environnement (Partie 2, D), cet état de l'art nous a permis, dans un deuxième temps, d'identifier les lacunes et les besoins des gestionnaires (Partie 3), afin de déterminer et proposer les mesures nécessaires (Partie 4) (Figure 1).

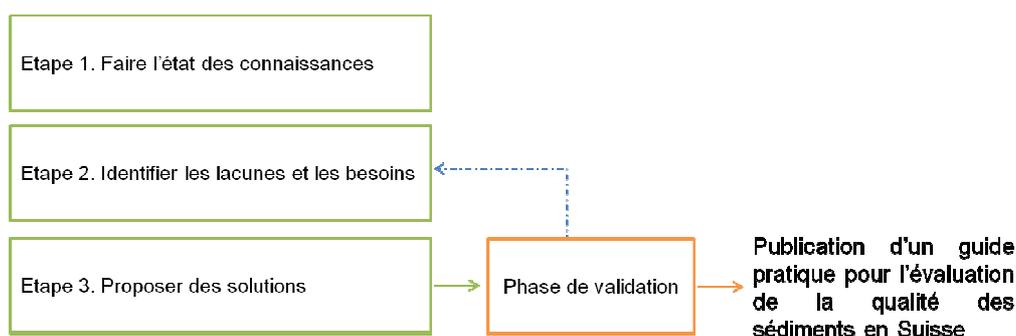


Figure 1 : Étapes du processus vers l'élaboration de recommandations pour l'évaluation de la qualité des sédiments en Suisse.

Partie 2 : État actuel de l'évaluation de la qualité et de la toxicité des sédiments

2.1. Définition et rôles du compartiment sédiment

Le sédiment a un rôle important dans les écosystèmes aquatiques et représente un compartiment dynamique d'une complexité importante liée aux processus biogéochimiques qui s'y déroulent. Longtemps considéré comme un déchet, le sédiment est de plus en plus perçu par les gestionnaires des eaux comme un milieu de vie pour une diversité biologique à protéger. Le sédiment est constitué de matières particulaires de différente taille, forme et composition minéralogique ou organique. Leur origine est diverse : particules du sol transportées par les courants, les eaux de ruissellement ou le vent (sédiment terrigène), ou particules provenant de la décomposition de débris d'organismes (sédiment organogène ou biogène). Ces particules sédimentaires ont la propriété de lier et/ou de piéger des substances polluantes. Les organismes aquatiques peuvent alors être exposés à ces polluants par différentes voies : par contact de l'eau de surface ou interstitielle, par contact direct au sédiment ou par voie trophique (ingestion d'eau et/ou de particules). La couche superficielle des sédiments nous intéresse plus particulièrement car elle constitue la pollution récente et les particules nouvellement déposées seront les premières à entrer en contact avec les organismes épibenthiques et benthiques. Cependant, il ne faut pas négliger les couches plus profondes, souvent anoxiques, plus difficilement remobilisables mais qui peuvent contenir des substances « anciennes » potentiellement dangereuses pour l'environnement.

Les sédiments présentent une variabilité dans le temps et dans l'espace et représentent une partie essentielle et dynamique des bassins versants (SedNet, 2006) du fait de leur double rôle d'abri pour de nombreux organismes et de source de polluants à long-terme. Le compartiment sédiment fait partie intégrante du continuum de l'eau et ne devrait pas être négligé car sa contamination peut engendrer des effets délétères qui doivent être considérés dans la surveillance des écosystèmes aquatiques.

2.2. Méthodes de surveillance de la qualité des sédiments

L'évaluation de la qualité des sédiments se fait déjà en Amérique du Nord et de plus en plus en Europe. Alors qu'aux Pays-Bas et en Flandres, l'évaluation de la qualité des sédiments consiste en une triade, les autres pays européens n'utilisent qu'une approche chimique se servant de critères de qualité nationaux ou des critères développés en Amérique du Nord dans les années 1990, comme les valeurs Threshold Effect Concentration (TEC) et Probable Effect Concentration (PEC), par exemple (MacDonald *et al.*, 2000) (Tableau 1).

Tableau 1 : Revue des approches d'évaluation de la qualité et de la toxicité des sédiments en Europe (principalement basée sur den Besten *et al.*, 2003).

Approche	Détail		Pays
Triade graduée par l'utilisation de valeurs déclencheuses	1 ^{er} niveau : Qualité chimique	Si la concentration mesurée excède la norme nationale, il faut passer au 2 ^{ème} niveau.	Pays-Bas
	2 ^{ème} niveau : Évaluation des risques	Trois volets sont à considérer : - l'exposition de l'Homme par les activités récréatives, la pêche, l'alimentation, etc. ; - le risque pour l'écosystème par une triade et la possibilité de bioaccumulation ; - le risque de transport et remise en suspension du sédiment. Si au moins un de ces trois volets présente un risque significatif, il faut passer au 3 ^{ème} niveau.	
	3 ^{ème} niveau : Priorisation	Il faut envisager des mesures de remédiation.	
Triade simultanée	Chimie	Comparaison des concentrations mesurées aux critères de qualité nationaux (De Deckere <i>et al.</i> , 2011).	Flandres, Belgique (De Cooman <i>et al.</i> , 1999)
	Tests écotoxicologiques	<i>R. subcapitata</i> (algue verte, inhibition de la croissance), <i>T. platyurus</i> (crustacé branchipode, mortalité) et <i>H. azteca</i> (crustacé épibenthique, mortalité).	
	Indices biologiques (De Paw & Heylen, 2001)	- « Biotic Sediment Index » dont le but est de déterminer la présence relative d'espèces sensibles à la pollution. - Étude morphologique (présence d'anomalies) de la capsule céphalique de <i>C. riparius</i> .	
Approche chimique par l'utilisation de critères de qualité nationaux	Exemple 1	Dans le cadre du Système global d'évaluation de la qualité des eaux (SEQ-Eau), des valeurs seuils ont été déterminées pour les métaux, PCBs et HAPs dans les sédiments et servent à établir 3 classes de qualité des sédiments. Ces valeurs sont basées sur celles de MacDonald <i>et al.</i> , 2000.	France
	Exemple 2	LAWA – valeurs de références dérivées par une approche écotoxicologique (ATV- DVWK, 2000).	Allemagne
Approche chimique sans valeurs de référence nationales	Analyses chimiques des sédiments, plus ou moins en routine, sans critères cantonaux/fédéraux pour la qualité des sédiments. Utilisation des indications de valeurs de concentration de fond ou mesurées « habituellement ».		Suisse, par exemple

À consulter : Guidance on chemical monitoring of sediment and biota under the Water Framework Directive. Guidance Document No. 25. European Commission, 2010. Ce guide pratique regroupe les méthodes proposées à l'échelle européenne pour l'échantillonnage, l'analyse des sédiments (et du biote) concernant les polluants métalliques et organiques.

2.3. Valeurs de référence et critères de qualité sédiment : méthodes de calcul et utilisation

Le recours aux critères de qualité est très fréquent dans l'évaluation du risque des sédiments en place. On retrouve, en effet, cette approche dans tous les exemples cités précédemment (Tableau 1). Un critère de qualité sédiment est une valeur de référence servant de comparaison pour des valeurs de concentrations mesurées de substances individuelles dans les sédiments. Lorsque ces critères sont dérivés à partir d'études écotoxicologiques, le calcul d'un quotient entre la valeur mesurée et la valeur du critère de qualité permet de définir un risque pour la substance étudiée. Ces critères de qualité se veulent alors soit protecteurs des ressources biologiques, soit prédicteurs d'effets délétères à ces ressources, soit les deux (Wenning *et al.*, 2005). En d'autres termes, ils procurent des valeurs limites, ou points de référence pour évaluer la probabilité d'observer des effets biologiques délétères dans les écosystèmes aquatiques (CCME, 1999).

Les critères de qualité peuvent par exemple être utilisés pour classer des échantillons de sédiments selon leur potentiel toxique, identifier des contaminants problématiques, mettre des priorités sur des sites, basé sur la fréquence et le degré avec lequel les critères sont dépassés. Le recours à des critères de qualité permet une évaluation rapide du risque potentiel du sédiment étudié, d'autant plus que l'efficacité de prédiction du risque par les critères de qualité a fréquemment été démontrée en associant les analyses chimiques à des tests écotoxicologiques (MacDonald *et al.*, 2000 ; Burton, 2002 ; Desrosiers *et al.*, 2010). Cependant, différents critères de qualité ont été définis pour une même substance du fait de l'existence de différentes approches pour leur détermination. La compréhension de la méthode de calcul est essentielle afin de tirer les bonnes conclusions sur la qualité du sédiment investigué.

2.3.1. Méthodes de calcul

Au fil des années, différentes méthodes de calcul de valeurs de référence ou de critères de qualité ont été proposées. Le choix de l'approche dépend principalement des connaissances disponibles, notamment en termes de données de toxicité sur les organismes benthiques. On dénombre quatre principales approches :

2.3.1.1. Approche (géo-) chimique



C'est historiquement la première approche utilisée. On peut distinguer deux méthodes. Concernant la première, les valeurs de fond géochimique peuvent être utilisées en tant que valeurs de références, en donnant des « concentrations de fond » régionales pour les métaux. En Europe, de telles données sont accessibles grâce à l'atlas du « Forum of the European Geological Surveys (FOREGS, <http://www.gsf.fi/publ/foregsatlas/>, 2010). Dans cet atlas, les concentrations à différents sites d'échantillonnage à travers toute l'Europe peuvent être obtenues. Les sites d'échantillonnage ont été sélectionnés de manière aléatoire à l'intérieur des cellules d'une grille d'échantillonnage qui a été appliquée à l'Europe. Pour la Suisse, le calcul de la moyenne des concentrations mesurées dans les

10 sites existants permet de définir une concentration de fond de $22,9 \pm 7.8$ pour le nickel et $17,9 \pm 7,4$ pour le cuivre (mg.kg^{-1} , poids sec ; moyenne \pm écart-type, particules <0.150 mm), par exemple. De tels critères ne permettent en aucun cas de définir un risque pour les organismes benthiques.

Une deuxième méthode consiste à calculer des critères de qualité à partir de concentrations mesurées dans des sites de référence, présentant « un bon état écologique » et inclus dans des programmes de surveillance des eaux. Une telle approche avait été choisie en Belgique, dans la région des Flandres, où les critères de qualité ont été dérivés à partir de mesures chimiques de campagnes annuelles dans 12 sites de référence.

2.3.1.2. Approche théorique



Les critères de qualité sédiment peuvent être dérivés à partir de critères de qualité eau, avec l'application de l'hypothèse de l'équilibre de partition. Selon cette théorie, les contaminants sont distribués entre l'eau interstitielle, le sédiment (ou particules en suspension) et le biote (DiToro *et al.*, 1991 ; Figure 2). Les critères de qualité développés pour l'eau sont appliqués au compartiment sédiment via un coefficient de partition (European Commission, 2003 ; Figure 3). La méthode de l'équilibre de partition est souvent utilisée pour calculer l'exposition aux substances chimiques ainsi que l'effet de produits chimiques sur les organismes à partir de concentrations de la phase aqueuse, lorsque les données de toxicité sur les organismes benthiques font défaut ou sont très limitées (OCDE, 1992). Les critères ainsi développés intègrent la notion de biodisponibilité des contaminants.

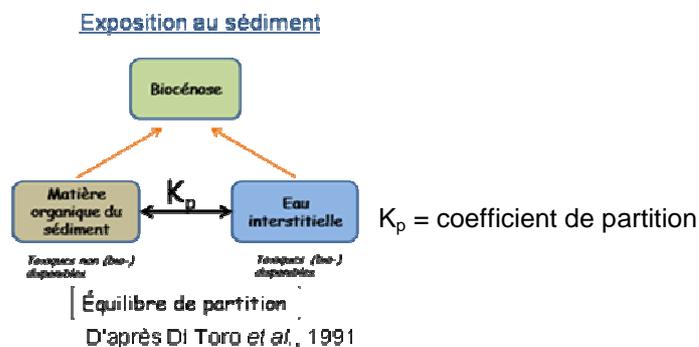


Figure 2 : Principe de l'équilibre de partition.

$$PNEC_{sed} = \frac{K_{susp-water}}{RHO_{susp}} \cdot PNEC_{water} \cdot 1000$$

$PNEC_{water}$	Predicted No Effect Concentration in water	Concentration prévisible sans effet dans l'eau
RHO_{susp}	Bulk density of wet suspended matter	Masse volumique apparente des particules humides en suspension
$K_{susp-water}$	Partition coefficient suspended matter water	Coefficient de partition entre les matières en suspension et l'eau
$PNEC_{sed}$	Predicted No Effect Concentration in sediment	Concentration prévisible sans effet dans le sédiment

Figure 3 : Application d'un coefficient de partition pour le calcul de la concentration prévisible de non effet dans le sédiment ($PNEC_{sed}$) (European Commission, 2003).

2.3.1.3. Approche écotoxicologique



Cette approche empirique demande de disposer de données de relations entre des concentrations de substances et des effets observés sur les organismes benthiques. Des tests réalisés sur sédiment naturel ou sur sédiment chargé permettent de disposer de telles valeurs. À ce jour, le risque toxique des substances est évalué de manière indépendante pour chaque molécule, le risque de toxicité de mélanges de substances pour le compartiment sédimentaire n'est pas encore évalué. Plusieurs méthodes existent :

- La méthode statistique : calcul empirique entre les valeurs de centiles de distributions de données d'effets toxiques et de données de non effet (Figure 4).

$\text{CSE} = \sqrt{(E_{15} \times SE_{50})}$ $\text{CEP} = \sqrt{(E_{50} \times SE_{85})}$	<p>E_{15} : 15^e centile des données classées dans la catégorie « avec effet » E_{50} : 50^e centile des données classées dans la catégorie « avec effet » SE_{50} : 50^e centile des données classées dans la catégorie « sans effet » SE_{85} : 85^e centile des données classées dans la catégorie « sans effet »</p>
---	---

Figure 4 : Calcul des critères de qualité Concentration seuil produisant un effet (CSE) et Concentration produisant un effet probable (CEP) (Environnement Canada et ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, 2007).

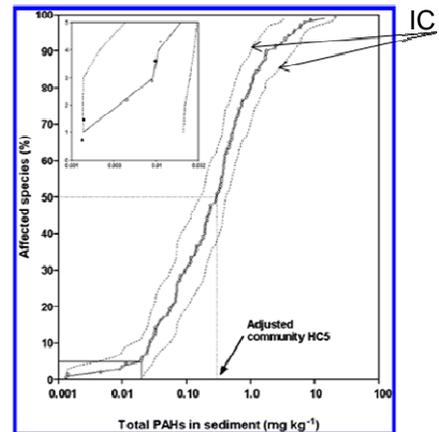
- La méthode déterministe des facteurs de sécurité : la plus faible No Observed Effect Concentration (NOEC) ou la plus faible Concentration d'effet 10 % (CE10) est divisée par un facteur de sécurité selon le nombre de données disponibles et les conditions de l'expérience, afin de dériver une valeur PNEC_{sed} .

Tableau 2 : Valeur du facteur de sécurité selon le nombre de résultats de tests de toxicité à long-terme sur organismes benthiques disponibles (European Commission, 2003).

Résultat(s) de test disponible(s)	Facteur de sécurité
1 test de toxicité à long terme (NOEC ou CE10)	100
2 tests de toxicité à long terme (NOEC ou CE10) avec des espèces à différents mode de vie et régime alimentaire.	50
3 tests de toxicité à long terme (NOEC ou CE10) avec des espèces à différents mode de vie et régime alimentaire.	10

- La méthode probabiliste avec la distribution de sensibilité des espèces : méthode supposée la plus complète et privilégiée lorsque un nombre suffisant de données est disponible. La méthode « SSD » (Species sensibility Distrubution) permet de dériver une « Hazardous Concentration » HC5 dont le but est de protéger 95 % des espèces (Figure 5). Un facteur de sécurité peut ensuite être appliqué à cette valeur.

Figure 5 : Exemple de distribution de sensibilité des espèces et de détermination de la HC5 pour les HAPs dans le milieu marin (Leung *et al.*, 2005). IC : Intervalle de confiance.



2.3.1.4. Approche écologique

L'étude des communautés de macroinvertébrés benthiques peut permettre de déterminer des seuils de toxicité *in situ* en corrélant les analyses chimiques avec le résultat d'indices biologiques. Des seuils de toxicité ont notamment pu être proposés par l'étude des communautés de vers oligochètes dans quelques cours d'eau suisses (Vivien *et al.*, 2011).

2.3.1.5. Approche de type triade

En associant plusieurs lignes de preuve, comme par exemple la chimie, l'écotoxicologie et des études écologiques sur le terrain, des critères de qualité pertinents peuvent être obtenus. Très récemment, l'agence flamande de protection de l'environnement a proposé des critères de qualité pour les sédiments des eaux douces dont la méthode de dérivation repose sur les résultats d'une approche de type triade effectuée en routine depuis l'année 2000 (De Deckere *et al.*, 2011). Deux critères de qualité ont été proposés, une valeur seuil de non effet, et une valeur seuil d'effets. Pour chacune des valeurs seuils, la moyenne a été faite entre une valeur dérivée par des tests écotoxicologiques et une valeur obtenue en corrélant les analyses chimiques avec le résultat d'indices biologiques (étude des macroinvertébrés sur le terrain).

Comme autre faisceau de preuve pour le calcul de critères de qualité pertinent permettant d'évaluer le risque toxique d'une substance en présence dans un sédiment, il a été suggéré de prendre en compte la bioaccumulation. La bioaccumulation désignant la capacité des organismes à absorber et concentrer dans tout ou une partie de leur organisme certaines substances chimiques.

2.3.1.6. Approche consensuelle



Les critères de qualité dérivés par une approche de type consensus sont obtenus en moyennant différentes valeurs seuils d'effet ou de valeurs probables d'effets déjà déterminées par différentes méthodes. Les valeurs consensus les plus souvent utilisées sont les concentrations seuils produisant un effet (TEC ou CSE) et les concentrations produisant un effet probable (PEC ou CEP). La TEC correspond à une valeur seuil

déclencheuse d'effets alors que la valeur PEC prédit des effets probables (MacDonald *et al.*, 2000). En effet, en dessous du seuil TEC, les organismes ne sont pas considérés comme affectés par les différentes substances, car les concentrations sont très faibles. Au-dessus du seuil TEC, les organismes les plus sensibles sont possiblement affectés par les substances toxiques, alors qu'au-dessus du seuil PEC, les concentrations sont suffisamment élevées pour produire des effets néfastes sur les organismes.

À consulter :

- Centre Ecotox: First report within the project « Assessment of Swiss sediment quality ». Use of sediment quality criteria for the assessment of sediment toxicity: Applicability to Switzerland. Centre Ecotox August 2010. Disponible sur www.centreecotox.ch.
- Technical Guidance for deriving Environmental Quality Standards. Guidance Document No. 27. Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC). European Commission, 2011. Ce guide décrit les méthodes permettant de dériver des critères de qualité environnementale pour les compartiments sédiment, sol et biote. Dans la méthode européenne, l'utilité d'un critère de qualité sédiment est soulignée uniquement lorsque le but est la protection des organismes benthiques. L'approche à employer dépend du nombre de données disponibles. Dans tous les cas, l'approche est une approche par bassin versant et dans le cas des métaux, la concentration géochimique de fond peut être additionnée à la concentration limite calculée.

2.3.2. Classification des sédiments

Le calcul d'un quotient entre la concentration environnementale mesurée (CEM) pour une substance et le critère de qualité associé basé sur des données écotoxicologiques, permet de caractériser un risque. Effectivement, si le quotient donne un résultat inférieur à 1, on peut écarter un risque de toxicité pour le sédiment concernant la substance, alors que si le résultat est supérieur à 1, il y a une possibilité de toxicité pour la vie aquatique. Cependant, dans l'environnement, les contaminants sont, la plupart du temps, sous forme de mélanges. Donc, même si le calcul d'un quotient pour une substance puis d'un quotient moyen pour l'ensemble des substances peut donner une information intéressante quand les substances présentes ont un même mécanisme d'action (additivité), le danger toxique pourrait être sous-estimé si des substances présentaient des interactions synergiques. Néanmoins cette méthode est appliquée dans la gestion des sédiments, par exemple, en France (Voies Navigables de France, 2005).

Par le calcul du quotient et/ou d'un quotient moyen, le sédiment peut être classé dans deux catégories « toxique » ou non « toxique ». En revanche, si on utilise les valeurs TEC et PEC de MacDonald *et al.*, 2000, trois classes peuvent être formées (Tableau 3).

Tableau 3 : Proposition de classification des sédiments selon les valeurs TEC et PEC (Macdonald et al., 2000).

CEM < TEC	TEC < CEM < PEC	CEM > PEC
« Bonne qualité » <i>Risque de toxicité peu probable</i>	« Qualité moyenne » <i>Seuil de toxicité franchi</i>	« Mauvaise qualité » <i>Risque de toxicité probable</i>

En dessous du seuil TEC, les organismes ne sont pas considérés comme affectés par les différentes substances, car les concentrations sont telles qu'elles n'induisent pas d'effet observé. Au-dessus du seuil TEC, les organismes les plus sensibles sont possiblement affectés par les substances toxiques, tandis qu'au-dessus du seuil PEC, les concentrations chimiques sont suffisamment élevées pour produire des effets néfastes sur les organismes. Entre la valeur TEC et PEC, la qualité peut être dite moyenne, mais aucune conclusion claire ne peut être tirée sur le risque réel.

En France, ces classes, bornées par les seuils TEC et PEC, sont utilisées dans le cadre du Système global d'évaluation de la Qualité des eaux (SEQ-eau), pour les métaux, la somme des PCBs et la somme des HAPs (MEDD & Agences françaises de l'eau, 2003).

Des développements ont cependant permis de proposer jusqu'à cinq classes de qualité, parfois avec des valeurs arbitraires (x fois le critère de qualité), d'autres fois en ajoutant comme borne de classe des concentrations de fonds ou rencontrées dans des sites de référence. En Suisse, concernant les eaux de surface, dans le cadre du SMG, la qualité de l'eau peut être rangée dans 5 classes (mauvais, médiocre, moyen, bon, très bon) (Baumann & Langhans, 2010). Pour les sédiments en place, des systèmes arbitraires de classification des sédiments (3 à 5 classes) sont utilisés actuellement dans quelques cantons suisses, en utilisant notamment les valeurs de références de la Commission International de Protection du Rhin (CIPR) et des multiples de ces valeurs, ou les valeurs du 80^{ème} centile de données de concentrations mesurées dans des campagnes précédentes (Zürich AWEL, 2006 ; AUE BL, 2007). Dans le canton de Genève, l'étude de communautés d'invertébrés benthiques sur le terrain a permis de proposer des seuils et classes de qualité des sédiments. En effet, les résultats de l'Indice Oligochètes de Bioindication des sédiments (IOBS - NF T90-390, 2002) ont pu être corrélés avec le quotient moyen utilisant les valeurs seuils PEC (PEC-Q) ou TEC (TEC-Q) (Vivien, 2009). Des seuils de toxicité PEC-Q = 0.17 et TEC-Q = 0.6 ont notamment pu être proposés (Vivien et al., 2011).

Il faut toutefois remarquer que les critères de qualité et les quotients qui peuvent être calculés pourraient se montrer insuffisants pour effectuer une analyse globale du risque et prédire une toxicité du sédiment échantillonné. Dans le cas de programmes de surveillance des sédiments, l'approche chimique par utilisation de critère de qualité devrait donc être additionnée d'une approche écotoxicologique et/ou écologique.

2.4. Connaissances actuelles des cantons suisses dans l'étude des sédiments

Pour mener à bien notre projet, il nous a semblé important de s'intéresser aux expertises disponibles dans les cantons suisses. Par le biais d'un questionnaire, les vingt-six cantons suisses ont été contactés et leurs réponses ont fourni des informations clés pour la priorisation des opérations à mener et le listage des recommandations à fournir. Les objectifs de ce questionnaire ont été de :

- prendre en compte les différentes méthodes d'étude des sédiments en place, actuellement utilisées et/ou disponibles dans les cantons (approche chimique, approche écologique et approche écotoxicologique) ;
- orienter l'établissement de recommandations en interrogeant les gestionnaires sur leurs intérêts et attentes dans le domaine ;
- compiler des valeurs environnementales de concentrations déjà mesurées dans les sédiments afin de compléter la réflexion sur l'utilisation de critères de qualité des sédiments en Suisse (Centre Ecotox, 2010).

2.4.1. Approche chimique

Dans un premier temps, les questions ont porté sur les méthodes d'analyses chimiques des sédiments, à savoir sur les milieux étudiés (rivières ou lacs), la fraction physique analysée (sédiment total ou fractions) et les substances analysées (méthodes d'analyse, priorisation des substances, utilisation de critères de qualité).

Treize cantons (50 %) ont déjà effectué ou effectuent, plus ou moins régulièrement, des analyses chimiques de sédiments en place, dans les rivières (13 cantons sur 13) mais aussi dans les lacs (4 cantons sur 13). Les métaux lourds (surtout Cd, Cu, Ni, Zn, Hg), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAPs) et les polychlorobiphényles (PCBs) sont les substances les plus souvent analysées (Figure 6). Sur les 13 cantons, 6 cantons ont clairement défini des substances prioritaires (Figure 6), correspondantes à des problématiques assez connues, telles que par exemple la contamination en PCBs de la Sarine dans le canton de Fribourg ou encore la contamination en cuivre dans les zones viticoles en Thurgovie. Pour les 7 autres cantons, les priorités sont définies « au cas par cas »

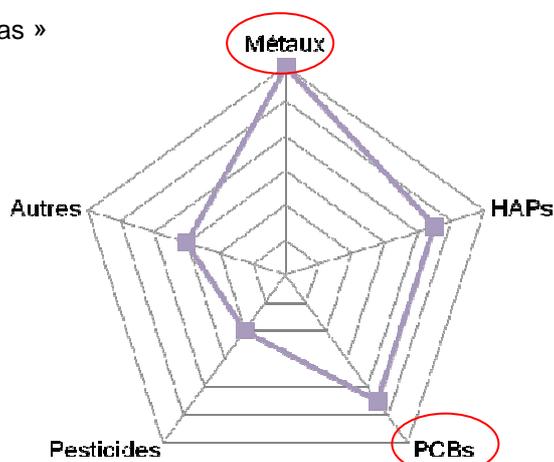


Figure 6 : Substances analysées dans les sédiments en place par les cantons suisses. Les cercles rouges représentent les deux groupes de substances les plus souvent définis comme prioritaires.

La majorité des cantons (9 sur 13) analysent uniquement la fraction fine des sédiments (< 63 µm) mais des différences apparaissent dans les méthodes de prélèvement et de préparation des sédiments, comme le ramassage du sédiment (profondeur, outil), le tamisage (sur le terrain ou en laboratoire), ou encore le mode de séchage.

La réalisation de ce questionnaire a permis également, dans le volet chimie, de visualiser l'utilisation de 'critères de qualité' pour les sédiments étudiés en place, dans les rivières ou les lacs (Figure 7).

Dix cantons, sur les 13 qui étudient les sédiments en place, comparent leurs résultats d'analyses chimiques aux valeurs indicatives données par l'Ordonnance sur la protection des sols (OSol) (OFEV, 1998b). Parmi ces dix cantons, six cantons ajoutent une comparaison avec les objectifs de la CIPR (CIPR, 2007 ; 2009), objectifs qui sont finalement consultés dans 9 cantons sur 13. Dans une moindre mesure, 3 cantons sur 13 se réfèrent aux recommandations pour le dragage des sédiments en Suisse (Valeurs limites et indicatives pour le dragage des sédiments lacustres dans les ports et voies navigables et valeurs indicatives U et T concernant les matériaux d'excavation). Sporadiquement, les valeurs environnementales sont comparées aux valeurs de l'IGKB (Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee, comparables aux valeurs CIPR), aux valeurs seuils du SEQ-Eau (Système global d'évaluation des cours d'eau, France) ou aux valeurs médianes mesurées dans les sédiments des grands cours d'eau suisses (Pardos *et al.*, 2003). Enfin, les recommandations provisoires pour la qualité des sédiments au Canada (CCME, 1999) ainsi que les concentrations de référence LAWA (Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, Allemagne (ATV-DVWK, 2000)) ne sont utilisées que dans un seul canton respectivement (Figure 7). Le tableau en annexe (page 26) illustre les disparités qu'il peut exister entre différents critères de qualité.

Deux cantons ont fait remarquer qu'ils attendaient les recommandations de la confédération pour l'utilisation de valeurs de référence « satisfaisantes » dans le cadre des sédiments de rivières. En attendant de telles recommandations, les cantons se réfèrent majoritairement aux valeurs indicatives de l'OSol, tout en étant conscients que le sédiment n'est pas un sol, et malgré l'existence de valeurs suisses pour les sédiments dragués. Les valeurs OSol sont également souvent utilisées conjointement aux valeurs de la CIPR, la majorité des cantons suisses se trouvant dans le bassin versant du Rhin.

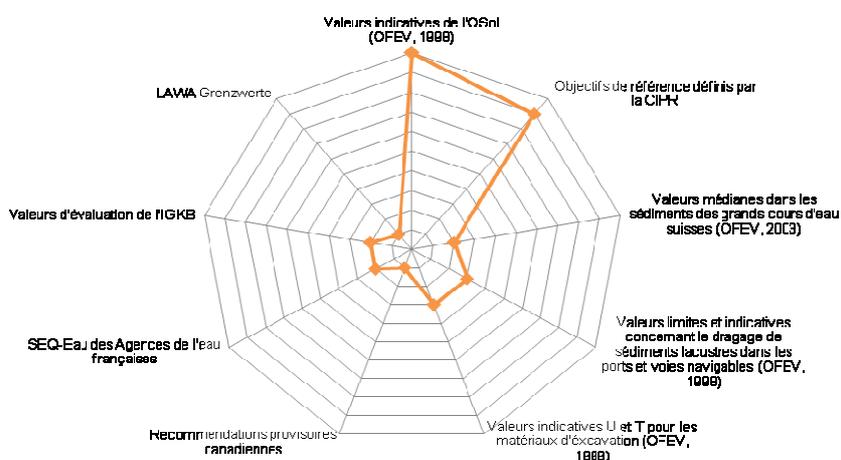


Figure 7: « Critères de qualité » utilisés par les treize cantons analysant/ayant déjà analysé des sédiments en place (une graduation signifie une occurrence du critère par canton).

2.4.2. Approche écologique

Dans cette partie, les cantons ont été interrogés sur l'évaluation de la qualité écologique des sédiments par le biais d'outils de bioindication.

Seuls 4 cantons utilisent ou ont déjà utilisé des outils de bioindication pour étudier directement l'influence de sédiments contaminés sur la biocénose. Ces outils concernent les oligochètes et les chironomes, deux taxons de macroinvertébrés benthiques (les chironomes étant benthiques pendant leur stade larvaire uniquement). En effet, deux cantons utilisent l'indice IOBS. Un canton utilise l'indice oligochètes appliqué au milieu lacustre (IOBL, NF T90-391, 2005) en plus de l'indice IOBS. Et finalement, un canton s'intéresse au repeuplement de communautés oligochètes et chironomes dans les sédiments après « aération » de lacs.

2.4.3. Approche écotoxicologique

Nous nous sommes ici interrogés si les cantons avaient déjà réalisé des biotests sur sédiments, si oui sur quelle fraction, et avec quel(s) organisme(s).

Seuls 2 cantons ont utilisé au moins une fois des tests écotoxicologiques pour évaluer la toxicité des sédiments. Les bioessais utilisés sont les tests avec des daphnies (en milieu sédiment et colonne d'eau), le test Microtox® (contact direct avec le sédiment) ou des expériences sur les poissons. Pour les poissons, les tests ont été effectués en laboratoire (stades précoces de poissons zèbres) mais aussi *in situ* (embryons de truite) et ont eu pour but de tester les différences entre l'amont et l'aval d'une station d'épuration. Pour ces deux cantons, les tests ont été commandés à des bureaux d'études privés ou à des universités.

À consulter :

- Centre Ecotox, 2011. Surveillance de la qualité des sédiments en Suisse : Synthèse d'un questionnaire. Deuxième rapport dans le cadre du projet "Evaluation de la qualité des sédiments en Suisse". Disponible sur www.centreecotox.ch. Le questionnaire ainsi que les réponses détaillées au questionnaire sont disponibles dans ce document.

Partie 3 : Identification des lacunes et des besoins

3.1. Mise en évidence des lacunes dans la surveillance de la qualité des sédiments.

Le retour des questionnaires a permis de lister les méthodes, notamment les méthodes d'analyse chimique et les critères de qualité utilisés, disponibles dans les cantons (Partie 2). Il manque clairement un consensus sur l'utilisation d'un critère de qualité pour les sédiments et une hétérogénéité importante est apparue dans les méthodes d'échantillonnage. De plus, peu de cantons ont recours à des outils de bioindication pour l'étude des sédiments et l'utilisation de tests écotoxicologiques est encore épisodique (Figure 8).

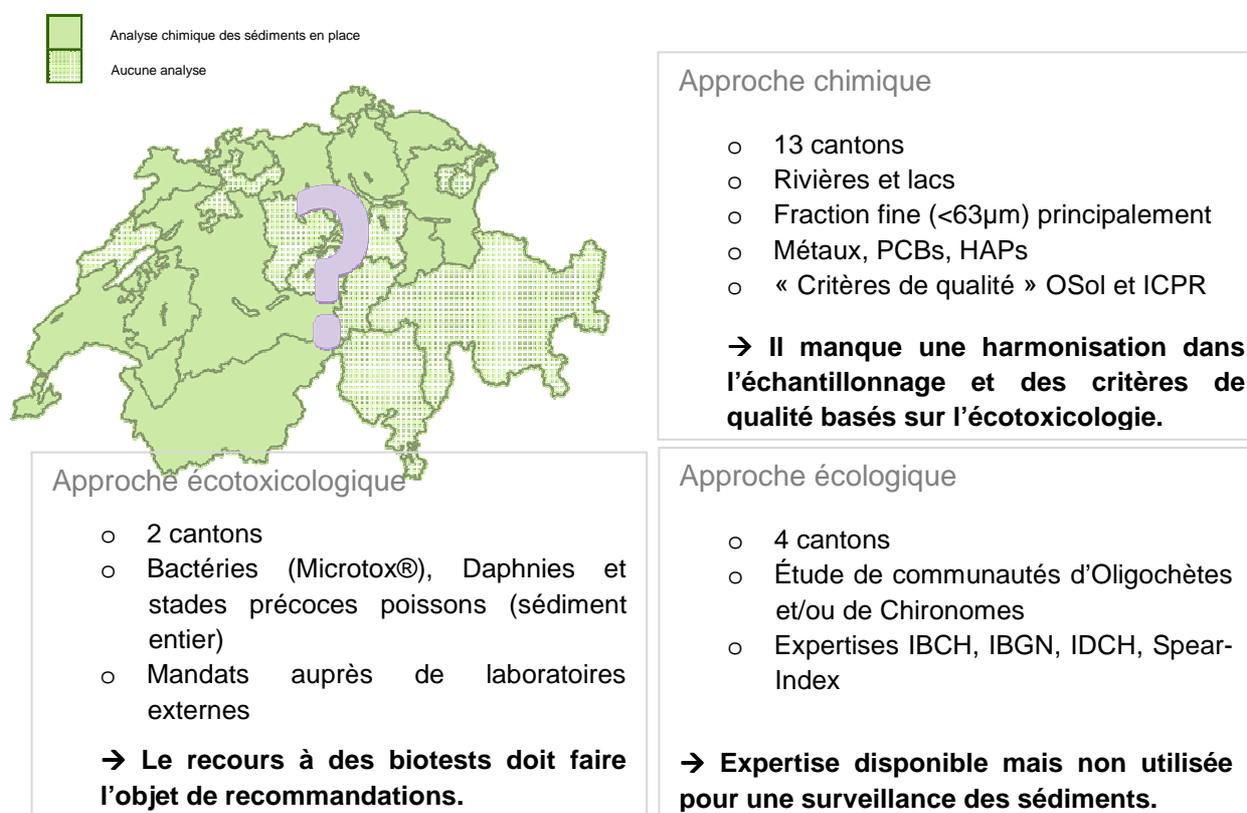


Figure 8 : Mise en évidence des lacunes dans l'évaluation des sédiments au vu des résultats de l'enquête auprès des cantons suisses.

3.2. Besoins et intérêt des cantons suisses

De par leurs réponses au questionnaire, les cantons ont clairement démontré leur intérêt pour la surveillance des sédiments en place dans l'évaluation de la qualité globale des eaux de surface.

Le fait de disposer de critères de qualité s'est avéré être un besoin et intérêt prioritaires des cantons pour pouvoir classer les sédiments selon leur potentiel risque écotoxique (Figure 9). Les cantons

souhaitent des valeurs « adéquates » auxquelles comparer les valeurs obtenues par analyse chimique. En effet, même si une idée peut être faite du degré de *contamination* (dépassement de seuils « habituellement » rencontrés), il manque un repère en terme d'impact sur la faune et flore du milieu étudié (notamment benthique) et donc d'un seuil de *pollution*¹.

En deuxième priorité, la nécessité d'harmonisation des stratégies d'échantillonnage (méthodes de prélèvement et de préparation des échantillons, limites de détections incluses) est ici à nouveau soulignée.

Concernant les indices biologiques, la définition de substances prioritaires et la publication d'un guide complet de recommandations, les réponses sont mitigées et les priorités seront précisées avec l'avancement du projet.

Enfin, même si la proposition d'appliquer des tests écotoxicologiques montre actuellement peu d'intérêt, l'approche écotoxicologique sera indissociable du vœu de définir des critères de qualité des sédiments et/ou d'évaluer de manière globale le risque écotoxicologique des sédiments.

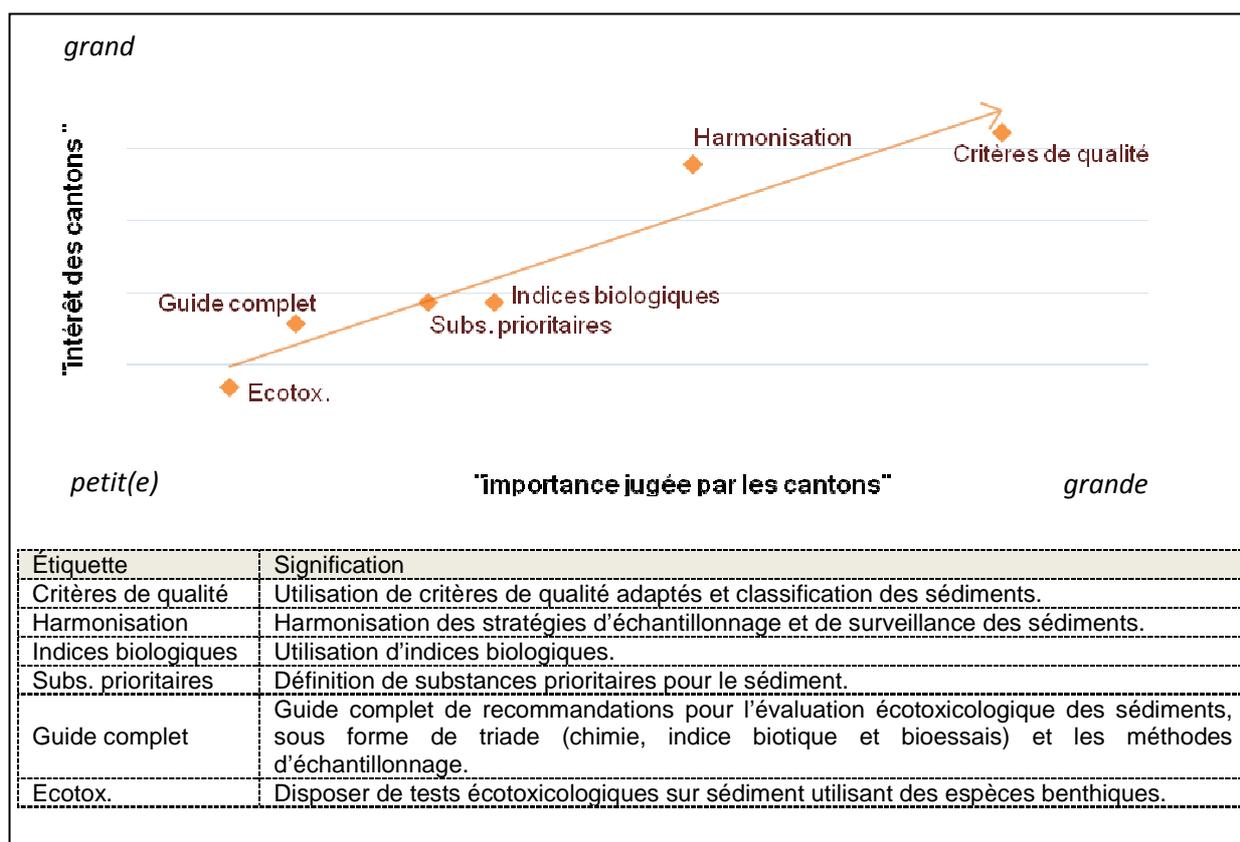


Figure 9: Priorisation de l'importance des besoins et de l'intérêt des cantons concernant la surveillance des sédiments résultant des réponses au questionnaire.

¹ Selon Chapman, 2007, on parle de contamination lorsque les substances chimiques trouvées dans les sédiments ne sont pas habituelles ou lorsque les concentrations ne sont pas habituellement si élevées alors qu'on parle de pollution lorsque la contamination provoque des effets biologiques délétères.

Partie 4 : Recommandations et mesures à prendre

Même si la qualité des eaux de surface s'est bien améliorée ces dernières années, par exemple grâce aux nouvelles technologies mises en place aux stations d'épuration ou par la construction de bassins de récupération des eaux pluviales, des études montrent que la contamination des sédiments en place, actuelle ou passée, dans certains sites en Suisse, existe et peut poser problème (Partie 1, A). Alors qu'une législation pour la qualité de l'eau ainsi que des informations pour les sédiments dragués existent en Suisse, il manque pour les sédiments en place des recommandations sur les méthodes de surveillance, d'évaluation de la toxicité et du risque environnemental. La directive européenne cadre sur l'eau recommande cependant de ne pas négliger ni ignorer la contamination des sédiments en place, même si elle est complexe, car le statut écologique des eaux de surface en dépend.

Par la mise en évidence de l'intérêt et des besoins des cantons (Partie 3), plusieurs mesures à prendre sont proposées. Dans un premier temps, des critères de qualité pour les sédiments en Suisse, pour certaines substances doivent être définis afin d'aider les gestionnaires dans l'interprétation des concentrations mesurées. Ensuite, un état des lieux de la contamination des sédiments en Suisse, notamment par la cartographie des données issues d'analyses chimiques, doit être réalisé afin de visualiser des sites problématiques et comprendre les origines de la contamination des sédiments. Enfin, l'harmonisation des méthodes et stratégies d'échantillonnage devra être également une étape primordiale dans l'établissement des recommandations.

4.1. Critères de qualité sédiment pour la Suisse

L'utilisation de critères de qualité pour l'évaluation de la qualité des sédiments en Suisse doit être faite de manière harmonisée. Seuls des critères de qualité basés sur des données écotoxicologiques permettent l'estimation d'un risque de toxicité sur les organismes benthiques. Les valeurs TEC (ou $CSE_{MacDonald}$) et PEC (ou $CEP_{MacDonald}$) (MacDonald *et al.*, 2000) semblent correspondre le mieux à notre objectif de protection. Des valeurs TEC et PEC existent pour 28 substances, dont 8 métaux, 10 HAPs (et leur somme), la somme des PCBs et quelques pesticides organochlorés (Tableau 2). Ces critères ont été développés pour le sédiment total et un contenu en matière organique normalisé de 1 %. Il est proposé d'adapter ces valeurs en incluant des données de concentrations mesurées en Suisse ($x^{\text{ème}}$ centile de la distributions des valeurs déjà mesurées en Suisse, par exemple) et en les mettant éventuellement à jour avec des nouvelles données de toxicité sur les organismes benthiques (recherche bibliographique et éventuellement nouveaux biotests de spiking en laboratoire) ou des données d'évaluations écologiques *in situ*. Avec ces deux valeurs seuils, il sera alors possible de former au moins trois classes de qualité des sédiments en place.

Malgré l'importance et l'émergence constante de polluants organiques, ces critères seront proposés dans un premier temps pour les métaux. En effet, pour ces substances, une importante quantité

d'information et un assez grand nombre de données sont disponibles, notamment pour le Cd, Cu, Ni, Hg, Pb et Zn. Les substances organiques seront à considérer par la suite, comme par exemple la pollution aux HAPs, la persistance de certains pesticides dans les sédiments (pyréthroïdes, par exemple) ou les PCBs qui font l'objet de contamination de nombreux sites.

Tableau 4 : Valeurs TEC (Threshold Effect Concentration) et PEC (Probable Effect Concentration) pour les sédiments d'eau douce, développées par Macdonald et al., 2000.

Substance	Valeur TEC	Valeur PEC
Metals (in mg/kg DW)		
Arsenic	9.79	33.0
Cadmium	0.99	4.98
Chromium	43.4	111
Copper	31.6	149
Lead	35.8	128
Mercury	0.18	1.06
Nickel	22.7	48.6
Zinc	121	459
Polycyclic aromatic hydrocarbons (in µg/kg L)		
Anthracene	57.2	845
Fluorene	77.4	536
Naphthalene	176	561
Phenanthrene	204	1,170
Benz[a]anthracene	108	1,050
Benzo(a)pyrene	150	1,450
Chrysene	166	1,290
Dibenz[a,h]anthracene	33.0	
Fluoranthene	423	2,230
Pyrene	195	1,520
Total PAHs	1,610	22,800
Polychlorinated biphenyls (in µg/kg DW)		
Total PCBs	59.8	676
Organochlorine pesticides (in µg/kg DW)		
Chlordane	3.24	17.6
Dieldrin	1.90	61.8
Sum DDD	4.88	28.0
Sum DDE	3.16	31.3
Sum DDT	4.16	62.9
Total DDTs	5.28	572
Endrin	2.22	207
Heptachlor epoxide	2.47	16.0
Lindane (gamma-BHC)	2.37	4.99

4.2. Cartographie de la contamination des sédiments de rivières en Suisse et analyse des données environnementales

Avec la recommandation d'utiliser les valeurs TEC et PEC et de former une classification d'au minimum 3 classes de qualité présentée précédemment, il est proposé d'illustrer sous forme de cartes la contamination des sédiments en place en Suisse, notamment dans les rivières. La cartographie permet d'avoir une vue d'ensemble des concentrations qui ont déjà été mesurées dans les sédiments en Suisse et de faire une analyse de la situation. Grâce à cet outil, les sites d'échantillonnage sont

placés, avec les coordonnées géographiques. En appliquant les classes de qualité bornées par les valeurs TEC et PEC, des points de contamination importante, présentant un risque pour les organismes benthiques, peuvent être repérés. Cette présentation des données permet également de discuter la pertinence des critères de qualité TEC et PEC pour la Suisse.

Un exemple de cartographie a été réalisé pour deux substances métalliques choisies, le cuivre et le nickel (Figure 10). Cette représentation de la contamination des sédiments suisses ne se veut pas exhaustive, du fait qu'elle ne repose que sur deux substances, évaluées séparément, que des données supplémentaires pourraient encore être obtenues de certains cantons, et que l'évaluation de la qualité est réalisée uniquement avec les critères TEC et PEC. De plus, il est important de préciser que la majorité des données sont issues d'analyses de la fraction fine du sédiment (tamisage 63 µm) mais que quelques données font référence au sédiment total (tamisage 2 mm).

Selon la règle de classification appliquée dans la cartographie ci-dessous, 43.5 % des sites échantillonnés présentent une concentration en cuivre sans risque contre 24.8 % pour le nickel, alors que 4.8 % des stations pour le cuivre et 8.5 % des stations pour le nickel présentent des concentrations mesurées supérieures à la limite d'effets probables sur les organismes aquatiques. Une grande majorité des données, 51.7 % des sites pour le cuivre et 69.6 % pour le nickel, se situent entre les seuils TEC et PEC, dans quel cas aucune conclusion ne peut être faite (Tableau 5).

Tableau 5 : Résultat de la classification des sédiments suisses pour le cuivre et le nickel.

Substance	% données inférieures TEC	% données entre TEC et PEC	% données supérieures PEC	Nombre de données
Cuivre	43.5	51.7	4.8	355
Nickel	24.8	69.6	8.5	355

Les valeurs géochimiques pour la Suisse, selon le Forum of the European Geological Surveys (FOREGS), sont de $22,9 \pm 7,8$ pour le nickel et $17,9 \pm 7,4$ pour le cuivre (mg.kg^{-1} , poids sec ; moyenne \pm écart-type, N=10). La Suisse présente donc un fond géochimique moyen relativement élevé pour le nickel, la valeur seuil d'effet étant très proche, et présenterait donc déjà un risque pour des espèces sensibles. Néanmoins, il faut prendre ces valeurs de « concentration de fond » avec précaution, les sites d'échantillonnage n'étant peut-être pas représentatifs de la complexité de la géologie en Suisse. De plus, il n'est pas exclu qu'il y ait un risque pour que les sites échantillonnés aléatoirement soit des sites contaminés. Malgré cela, les valeurs TEC et PEC pour le nickel pourraient se présenter trop restrictives. De plus, on peut faire le même constat avec les données de l'étude des sédiments des grands cours d'eau suisses (OFEV, 2003). En effet, les sédiments présentent des concentrations médianes en nickel de $30,8 \text{ mg.kg}^{-1}$ ($27,4 \text{ mg.kg}^{-1}$ pour le cuivre). En revanche, pour le cuivre, la concentration de fonds est bien inférieure à la valeur TEC. Les critères de qualité pour le cuivre pourraient être encore plus restrictifs.

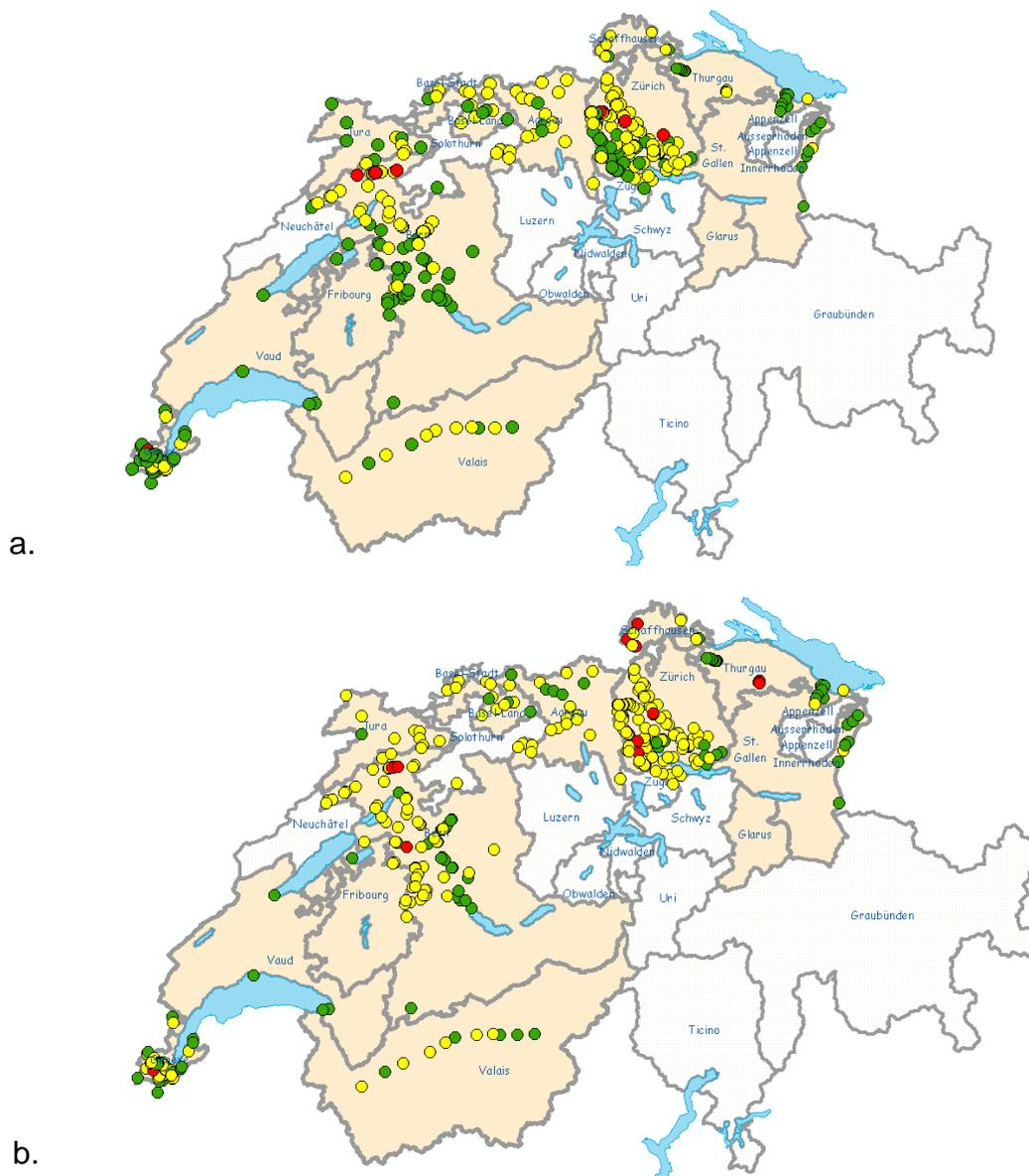


Figure 10 : Contamination des sédiments de quelques sites dans les rivières suisses pour le cuivre (a) et le nickel (b). Source pour les fonds graphiques : *Swisstopo*. Propriété des données : cantons.

Légende

- Analyse chimique des sédiments en place dans le canton

Oui
 Non

- Classification du risque écotoxicologique

CEM < TEC <i>TEC_{Cu} = 31.6 mg/kg (poids sec)</i> <i>TEC_{Ni} = 22.7 mg/kg (poids sec)</i>	TEC < CEM < PEC	CEM > PEC <i>PEC_{Cu} = 149.0 mg/kg (poids sec)</i> <i>PEC_{Ni} = 48.6 mg/kg (poids sec)</i>
« Bonne qualité » <i>Risque de toxicité peu probable</i>	« Qualité moyenne » <i>Seuil de toxicité franchi</i>	« Mauvaise qualité » <i>Risque de toxicité probable</i>
On considère que la substance mesurée à cette concentration ne présente pas de risque toxique pour les organismes benthiques.	Le seuil d'effet pour la substance est dépassé mais les effets restent peu probables. Des études écotoxicologiques et / ou écologiques devraient être envisagées pour conclure sur le risque du site.	Les effets sur les organismes benthiques sont probables et le site doit être classé comme pollué pour la substance.

Si ce système de classification est approuvé, il faudra l'affiner en ajoutant au moins deux valeurs seuils pouvant être des multiples des TEC/PEC ou des concentrations mesurées dans 80 % des cas par exemple, afin de proposer 5 classes de qualité au minimum. Une classification plus précise permettrait de prioriser avec plus de détail des régions, des spots de pollution et par la suite de trouver des sites de référence. De plus, il faudrait proposer une règle de décision pour l'intégration des classifications de plusieurs substances. Dans le cadre du système modulaire gradué, par exemple, il a été choisi d'appliquer le « scénario du pire ».

La visualisation graphique de la distribution des données environnementales peut amener des informations complémentaires (Figure 11). Pour le cuivre, il semble que la distribution des données soit unimodale alors qu'elle est multimodale pour le nickel. Les distributions ne suivent pas une courbe de type gaussienne (Shapiro Test de normalité, $p < 0.001$, $n = 355$). Il serait intéressant de voir quelles indications pourraient nous apporter une analyse plus poussée des paramètres des distributions sur la cause ou source de pollution (contamination au cuivre pour les régions viticoles par exemple).

L'interprétation des données environnementales mesurées pour les métaux montre une difficulté car il faut arriver à faire la distinction entre variabilité géographique des concentrations de fond et les impacts anthropiques (Hou *et al.*, 2009). Il faudrait améliorer les méthodes statistiques servant à l'interprétation des données environnementales et harmoniser les méthodes d'analyses pour l'aide à la prise de décision.

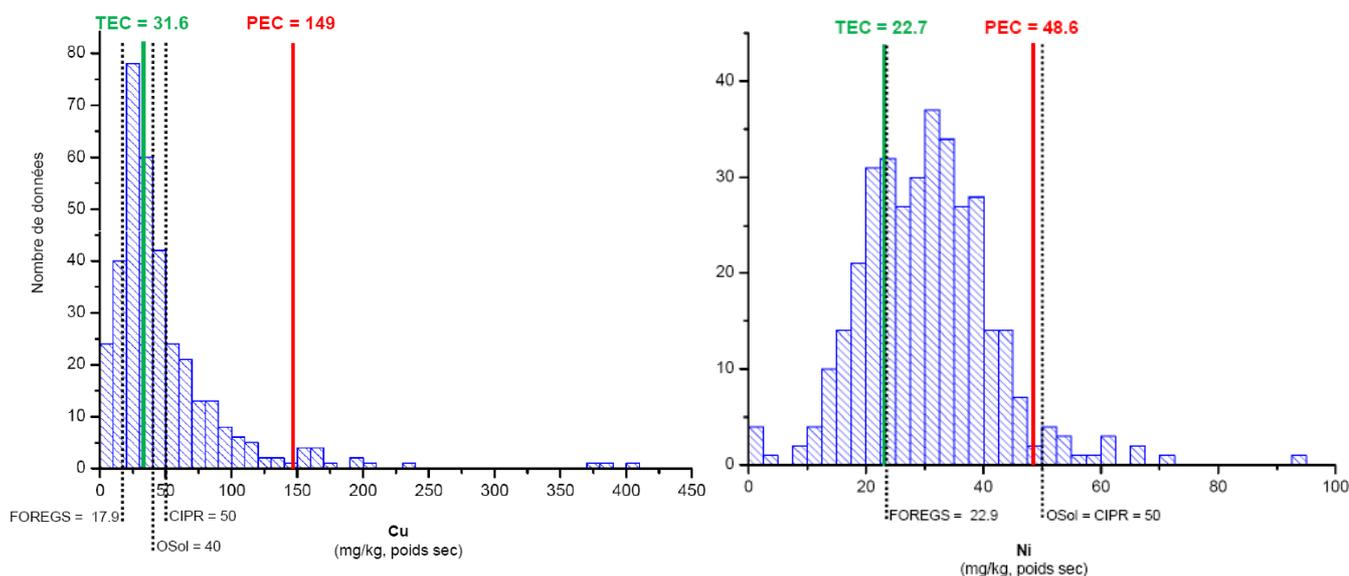


Figure 11 : Distribution des données de concentrations mesurées en Suisse pour le cuivre (a) (N = 355) et le nickel (b) (N = 355) sous forme d'histogrammes.

4.3. Harmonisation des méthodes et des stratégies d'échantillonnage

Les méthodes d'échantillonnage entre les cantons varient, qu'il s'agisse de la fraction analysée, du mode de prélèvement ou encore des méthodes de séchage (Partie 2, D). Or, pour obtenir des valeurs

comparables sur le territoire suisse, l'harmonisation des méthodes d'échantillonnage est primordiale. Cette mesure est la deuxième priorité des cantons après la définition de critères de qualité. Une création de groupe de travail permettrait la réalisation de cet objectif. Certains cantons collaborent déjà et l'OFEV prévoit, dans le cadre des études sur les PCBs, des méthodes harmonisées. Dans ce contexte, nous pourrions proposer de rejoindre ou créer un groupe de travail avec les cantons et personnes intéressées, afin d'établir un état actuel plus précis de la technique dans ce domaine et un document d'aide à l'exécution pour les gestionnaires, dans le cas des sites de sédiments contaminés, ou dans le cadre de la surveillance des eaux de surface.

Un tel travail a déjà été effectué en Suisse notamment pour l'échantillonnage des eaux souterraines ou la gestion de sites contaminés. Le document « Méthodes d'analyse dans le domaine des déchets et des sites pollués. État 2010 » (OFEV, 2010a) est une aide à l'exécution contenant des instructions et des prescriptions pour l'analyse des échantillons solides et aqueux dans le cadre de l'étude des déchets et des sites contaminés (OSites). Elle reflète l'état actuel de la technique dans ce domaine analytique. Pour les eaux souterraines, un guide d'aide à l'exécution est également disponible (OFEV, 2003). Il réunit les informations nécessaires et les précautions à prendre pour maîtriser chaque phase de l'échantillonnage, ainsi que d'en assurer la qualité. Du point de vue surveillance des eaux, dans le cadre du SMG, un exemple est la publication « Méthodes d'analyses et d'appréciation des cours d'eau. Analyses physico-chimiques, nutriments » (OFEV, 2010b). Des méthodes harmonisées pour l'étude des sédiments ont en revanche déjà été publiées en Europe et en France (European Commission, 2010 ; Schiavone & Coquery, 2011).

Un tel guide (ou chapitre dans notre guide complet) dévolu spécifiquement aux sédiments devrait être envisagé. Il devra notamment prendre en considération l'importance de faire des sous-échantillons lorsque l'on étudie les sédiments (Bervoets *et al.*, 1999) ainsi que l'importance de normaliser les données mesurées en terme de granulométrie et teneur en matière organique par exemple. La normalisation est importante car elle permet de prendre en compte la variabilité, en termes de granulométrie, matière organique et minéralogie du sédiment. Le tamisage à la fraction fine peut être une solution de normalisation. Pour les substances organiques, la méthode de normalisation la plus couramment utilisée est par la teneur en carbone organique. La concentration en substance organique est ainsi divisée par le contenu en carbone organique (TOC).

La représentativité spatiale (couches anoxiques, méandres, etc.) mais aussi temporelle (saison, débit, fréquence, etc.) de l'échantillonnage devront être étudiées.

4.4. Conclusions et perspectives

L'état des connaissances dans le domaine de l'évaluation de la qualité et la toxicité des sédiments a été évalué et a montré que l'approche chimique prédomine encore aujourd'hui (Partie 2). Le recours à des critères de qualité pour une évaluation du risque toxique est très fréquent. Les méthodes de dérivation des critères de qualité ont alors été étudiées en détail (Partie 2, C). L'enquête auprès des offices cantonaux de protection de l'environnement (Partie 2, D), nous a permis d'identifier les lacunes et les besoins des gestionnaires (Partie 3).

Dans le contexte de la directive européenne cadre sur l'eau, la Suisse devrait suivre les recommandations de l'Europe pour l'évaluation des sédiments dans les programmes de surveillance des eaux de surface. Ainsi, la participation à des discussions européennes sur le sujet, notamment dans le réseau SedNet est à renforcer. En attendant les directives européennes sur l'évaluation de la qualité des sédiments, nous proposons plusieurs voies d'évolution dans notre projet.

En effet, basés sur les résultats et les appréciations précédentes, nous pouvons résumer les recommandations et mesures prioritaires à mettre en avant, et préciser nos perspectives pour la suite du projet.

Les mesures prioritaires :

- Adapter les critères de qualité TEC et PEC pour les métaux aux fonds géochimiques suisses, aux valeurs déjà mesurées et aux effets sur les organismes benthiques et proposer une méthode pour les polluants organiques.
- Établir un système de classification de la qualité des sédiments à 5 classes pour correspondre à la typologie pour les cours d'eau du SMG et y associé une aide à la prise de décision pour l'intégration.
- Continuer la cartographie de la contamination des sédiments, pour des substances prioritaires, éléments trace métalliques et polluants organiques, qui auront été choisies. La mise à disposition des données existantes est primordiale.
- Déterminer un site de référence en « condition zéro », ou même plusieurs sites, en considérant notamment la granulométrie et la teneur en matière organique du sédiment. Il pourrait être proposé aux cantons intéressés de définir un site de référence et un site pollué dans leur canton, qui pourra servir de terrain d'évaluation de la méthode mais aussi de site d'éducation des gestionnaires et d'acquisition de données.
- Travailler à l'harmonisation des méthodes et stratégies d'échantillonnage entre les cantons.

Nos perspectives :

- Un état de l'art des tests écotoxicologiques pour sédiments dulcicoles (tests par contact ou avec des extraits), des bactéries aux stades précoces de poissons en passant par les algues, les macroinvertébrés et les plantes est prévu ainsi que l'étude de leur pertinence en fonction des types de pollution.
- Une recherche bibliographique sur les indices biologiques applicables au sédiment est également planifiée, afin de proposer des méthodes d'évaluation des sédiments sur le terrain.
- Prévoir un programme de surveillance des sédiments, en complément dans le SMG, par exemple.
- Définir des objectifs de qualité écologique à préserver ou restaurer et ainsi suivre l'amélioration des sites contaminés. Prendre des mesures afin d'éviter que les situations de contamination des sédiments n'empirent.

Notre travail à long-terme permettra de recommander la triade d'évaluation de la qualité des sédiments (Chapman, 1990) en proposant un volet chimie (comparaison des concentrations mesurées avec tel(s) critère(s)), un volet biologie (appliquer tel(s) indice(s) biologique(s)) et un volet écotoxicologie (tester le sédiment avec tel(s) organisme(s)). Les multiples lignes d'évidence de la triade en font une approche globale pour évaluer la toxicité des sédiments, qui a montré son efficacité depuis plus de dix ans dans un pays européen (de Deckere *et al.*, 2011).

Les sédiments jouent un rôle clé dans l'état écologique des cours d'eau. En Suisse, les cantons s'intéressent aux sédiments mais ont besoin d'outils pour l'évaluation de leur qualité. Des méthodes adaptées et harmonisées doivent leur être fournies à cette fin dans une perspective de surveillance globale des eaux superficielles et afin d'assurer le maintien ou le rétablissement d'écosystèmes aquatiques en bonne santé.

Références

- ∞ Amt für Umweltschutz und Energie Basel-Landschaft (AUE BL), 2008. Schwermetalle in Fließgewässersedimenten. Untersuchung 2007.
- ∞ Arbouille D., Howa H., Span D. & Vernet J.-P., 1989. Étude générale de la pollution par les métaux et répartition des nutriments dans les sédiments du Léman. Rapport Commission Internationale pour la Protection des Eaux du Léman contre la pollution (CIPEL). Campagne 1988 ; pp. 239-245.
- ∞ ATV-DVWK (Ed.), 2000. Die Elbe und ihre Nebenflüsse – Belastung, Trends, Bewertung, Perspektiven. Hennef, GfA Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V., 168 pp.
- ∞ Babut, M., 2011. Transfert de contaminants hydrophobes du sédiment au biote : construction de modèles dans une perspective de gestion. Séminaire final dans le cadre du projet « Transferts de contaminants hydrophobes dans le Rhône du sédiment au biote : construction de modèles dans une perspective de gestion » (TSIP-PCB). Présentation, Lyon, 5 janvier 2011.
- ∞ Baumann Peter & Langhans Simone D., 2010. Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau. Synthèse des évaluations au niveau R (région). Etat de l'environnement no.... Office fédéral de l'environnement, Berne : 47 p.
- ∞ Bervoets, L., M. De Wit, W. De Cooman, P. Seuntjens and R. Verheyen, 1999. Spatial variability in characteristics and trace metal levels in sediments from watercourses. *Toxicological and Environmental Chemistry* 68: 233-246.
- ∞ Binderheim E. & Göggel W. 2007 : Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau. Aspect général. L'environnement pratique no 0701. Office fédéral de l'environnement, Berne. 43 p.
- ∞ BMG Engineering AG im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), 2007. Sedimente am Hochrhein. Kurzbericht.
- ∞ Burton J. G. A., 2002. Sediment quality criteria in use around the world. *Limnology* 3(2): 65-76.
- ∞ Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME), 1999. Protocol for the Derivation of Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. CCME EPC-98.
- ∞ CCME, 2002. Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life: Summary tables. Updated. In: Canadian environmental quality guidelines, 1999, Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg.
- ∞ Centre Ecotox, 2010. Use of sediment quality criteria for the assessment of sediment toxicity: Applicability to Switzerland. Draft version. Centre Ecotox August 2010.
- ∞ Chapman, P. M., 1990. The sediment quality triad approach to determining pollution-induced degradation. *Science of the Total Environment* 97-98: 815-825.
- ∞ Chapman, P. M., 2007. Determining when contamination is pollution - Weight of evidence determinations for sediments and effluents. *Environment International* 33(4): 492-501.
- ∞ Commission Internationale de protection des eaux du Léman (CIPEL), 1993. Micropolluants dans les affluents. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 1992, 1993, 209-232.
- ∞ CIPEL, 2008. Métaux et micropolluants organiques dans les eaux et sédiments du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2007, 2008, 57-84.
- ∞ Commission Internationale pour la Protection du Rhin (CIPR), 2007. Comparaison de l'état du Rhin de 1990 à 2004. Rapport N°159 Kaiserin-Augusta-Anlagen 15, D 56068 Coblenz.
- ∞ CIPR, 2009. Détermination de normes de qualité environnementale pour les substances significatives pour le Rhin. Rapport N°164 Kaiserin-Augusta-Anlagen 15, D 5 6068 Coblenz.
- ∞ Curdy R., 2010. Proposition d'une méthode pour l'évaluation de la pollution et de la toxicité des sédiments : Application pour un site sur la rivière Urtenen dans le canton de Berne. Projet de Master. Sciences et Ingénierie. EPFL.
- ∞ De Cooman W., Florus M., Vangeheluwe M. L., Janssen C. R., Heylen S., DePauw N., Rillaerets E., Meire P. and Verheyen R., 1999. Sediment characterisation of rivers in Flanders. The Triad approach. Proceedings: CATS 4: Characterisation and treatment of sediments, 15-17 Sept, Antwerpen, pp 351-367.
- ∞ de Deckere, E., W. De Cooman, *et al.* (2011). "Development of sediment quality guidelines for freshwater ecosystems." *Journal of Soils and Sediments* 11(3): 504-517.

- ∞ den Besten, P., E. de Deckere, *et al.*, 2003. Biological effects-based sediment quality in ecological risk assessment for European waters. *Journal of Soils and Sediments* 3(3): 144-162.
- ∞ De Pauw, N. and S. Heylen (2001). "Biotic index for sediment quality assessment of watercourses in Flanders, Belgium." *Aquatic Ecology* 35(2): 121-133.
- ∞ Desrosiers M., Babut M. P., Pelletier, M., Bélanger, C., Thibodeau, S. and Martel, L., 2010. Efficiency of Sediment Quality Guidelines for Predicting Toxicity: The Case of the St. Lawrence River. *Integrated Environmental Assessment and Management* 6(2): 225-239.
- ∞ DiToro, M. D., C. S. Zarba, *et al.*, 1991. Technical basis for establishing sediment quality criteria for nonionic organic chemicals using equilibrium partitioning. *Environmental Toxicology and Chemistry* 10(12): 1541-1583.
- ∞ Environnement Canada et ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, 2007. Critères pour l'évaluation de la qualité des sédiments au Québec et cadres d'application : prévention, dragage et restauration. 39 pages.
- ∞ European Commission, 2003. Technical Guidance Document on Risk Assessment. In support of Commission Directive 93/67/EEC on Risk Assessment for new notified substances, Commission Regulation (EC) No 1488/94 on Risk Assessment for existing substances, Directive 98/8/EC of the European Parliament and of the Council concerning the placing of biocidal products on the market. Part II.
- ∞ European Commission, 2010. EU guidance on chemical monitoring of sediment and biota under the water framework directive. Version 7.
- ∞ European Parliament and Council, 2000a. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the Community action in the field of water policy"
- ∞ European Parliament and Council, 2000b. DECISION No 2455/2001/EC of 20 November 2001 establishing the list of priority substances in the field of water policy and amending Directive 2000/60/EC.
- ∞ Favarger P.-Y., Span D. & Vernet J.-P., 1990. Métaux lourds dans les sédiments des rivières du bassin lémanique suisse. Institut F.-A. Forel, Université de Genève, CH 1290 Versoix.
- ∞ Förstner, U., 2007. Environmental quality standards (EQS) applicable to sediment and/or biota. *Journal of Soils and Sediments*. 7(4): 270.
- ∞ Hou, A., R. D. DeLaune, M. Tan, M. Reams and E. Laws, 2009. Toxic elements in aquatic sediments: Distinguishing natural variability from anthropogenic effects. *Water, Air & Soil Pollution*. 203(1): 179-191.
- ∞ Institut Forel, 2007. Aspects sédimentaires de la gestion du barrage de Verbois. Loizeau, J.-L. & Wildi, Services industriels de Genève (SIG).
- ∞ Institut Forel, 2010. Échantillonnage et analyse de sédiments du réservoir de Verbois : Complément d'investigations. Loizeau, J.-L. & Wildi, Services industriels de Genève (SIG), 2010.
- ∞ Leung, K., A. Bjørgesæter, J. Gray, W. Li, G. Lui, Y. Wang and P. Lam, 2005. Deriving Sediment Quality Guidelines from Field-Based Species Sensitivity Distributions. *Environmental Science & Technology* 39(14): 5148-5156.
- ∞ MacDonald D., Ingersoll C. and Berger, T., 2000. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 39(1): 20-31.
- ∞ Margot J., 2008. Impacts des déversoirs d'orage sur les cours d'eau. Application de la méthodologie STORM et validation par le biais d'analyses écotoxicologiques et chimiques. Projet de Master. Sciences et Ingénierie. EPFL.
- ∞ Ministère de l'Environnement et du Développement Durable & Agences françaises de l'eau, 2003. Grilles d'évaluation version 2.
- ∞ OECD, 1992. Report of the OECD Workshop on effects assessment of chemicals in sediments. Copenhagen 13th – 15th May 1991.
- ∞ Office Fédéral de l'Environnement, 1990. Ordonnance du 10 décembre 1990 sur le traitement des déchets (OTD). No. RS 814.600. Berne, Suisse.
- ∞ Office Fédéral de l'Environnement, 1995. Le dragage de sédiments lacustres dans les ports et voies navigable. Informations concernant la protection des eaux. No. MGS-19-F. Berne, Suisse.
- ∞ Office Fédéral de l'Environnement, 1998a. Ordonnance du 28 octobre 1998 sur la protection des eaux (OEaux). No. RS 814.201. Berne, Suisse.

- ∞ Office Fédéral de l'Environnement, 1998b. Ordonnance du 1^{er} juillet 1998 sur les atteintes portées aux sols (OSol). No. RS 814.12. Berne, Suisse.
- ∞ Office Fédéral de l'Environnement, 1998c. Système modulaire gradué. Informations concernant la protection des eaux. No. 26. Berne, Suisse.
- ∞ Office Fédéral de l'Environnement, 1999. Directive pour la valorisation, le traitement et le stockage des matériaux d'excavation et déblais (Directive sur les matériaux d'excavation). No. VU-3003-F. Berne, Suisse.
- ∞ Office Fédéral de l'Environnement, 2003. Échantillonnage des eaux souterraines. Guide pratique. L'environnement pratique. VU-2506-F. 82 p.
- ∞ Office Fédéral de l'Environnement, 2010a. Méthodes d'analyse dans le domaine des déchets et des sites pollués. État 2010. L'environnement pratique. UV-1027-F. 72 p.
- ∞ Office Fédéral de l'Environnement, 2010b. Méthodes d'analyses et d'appréciation des cours d'eau. Analyses physico-chimiques, nutriments. L'environnement pratique. UV-1005-F. 44 p.
- ∞ Pardos M., Dominik J. & Houriet J.-P., 2003. Micropolluants dans les sédiments. Métaux et micropolluants organiques dans les matières en suspension et sédiments superficiels des grands cours d'eau suisses. Cahier de l'Environnement. Office fédéral de l'Environnement. Des Forêts et du Paysage, Berne. No. 358.
- ∞ Rossi L., V. Krejci & S. Kreikenbaum, 2004. Projet «STORM : Assainissement par temps de pluie». «Exigences légales en matière d'assainissement par temps de pluie». Gas-Wasser-Abwasser, Nr. 6/2004: 431-438.
- ∞ Schiavone S. & Coquery M. (2011). Guide d'échantillonnage et de pré- traitement des sédiments en milieu continental pour les analyses physico-chimiques de la DCE. Cemagref, 24 p.
- ∞ Schmid P. *et al.*, 2010: Polychlorobiphényles (PCB) dans les eaux en Suisse. Données concernant la contamination des poissons et des eaux par les PCB et les dioxines : évaluation de la situation. Connaissance de l'environnement n°1002. Office fédéral de l'environnement, Berne. 104 p.
- ∞ SedNet, 2006. Sediment Management – an essential element of River Basin Management Plans. Report on the SedNet Round Table Discussion. Venice, 22-23 Nov.
- ∞ Service des Eaux, Sols et Assainissement (SESA), 2005. Directive relative à l'immersion de matériaux de dragage dans les lacs. Directive cantonale DCPE 1000.
- ∞ Simpson S. L. and G. E. Batley, 2007. Predicting metal toxicity in sediments: a critique of current approaches. *Integrated Environmental Assessment and Management* 3(1) 18-31.
- ∞ Vernet J.-P., 1977. Étude de la pollution des sédiments du Léman et du bassin du Rhône. Commission Internationale pour la Protection des Eaux du Léman contre la Pollution, Lausanne. No. 1976.
- ∞ Vivien R., 2009. Bioindication par les oligochètes de la qualité des sédiments de cours d'eau genevois. Direction : Dr J. Perfetta, Service cantonal de l'écologie de l'eau, État de Genève; Dr E. Castella, Laboratoire d'écologie et de biologie aquatique, Université de Genève. Mémoire 168.
- ∞ Vivien R., M. Lafont and J. Perfetta, 2011. Proposition d'un seuil de toxicité des métaux lourds des sédiments mis en évidence par les vers oligochètes dans quelques cours d'eau. *Bulletin de la société vaudoise des sciences naturelles* 92.4: 153-16.
- ∞ Voies navigable de France (VNF), 2005. Guide pour la pratique du dragage.
- ∞ Wenning R. J., Batley G. E., Ingersoll C. G. and Moore D. W., 2005. Use of Sediment Quality Guidelines & Related Tools for the Assessment of Contaminated Sediments (SQG). Summary booklet of a SETAC Pellston Workshop.
- ∞ Wildi W., Dominik J., Loizeau J.-L., Thomas R. L., Favarger P.-Y., Haller L., Perroud A. and Peytremann C., 2004. River, reservoir and lake sediment contamination by heavy metals downstream from urban areas of Switzerland. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*. 9: 75-87.
- ∞ Zürich-Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, 2006. Wasserqualität der Seen, Fliessgewässer und des Grundwassers im Kanton Zürich. Statusbericht.

Annexe

Le tableau ci-dessous donne des exemples de valeurs seuils pour quelques substances métalliques et organiques choisies (Centre Ecotox, 2010).

mg/ kg dw	Cu	Hg	Ni	Zn	Anthracene (PAH)	Dieldrin	Σ_7 PBCs	Notes
PNEC _{sed}	0.80 (AF50, TGD)	0.47 (EqP, TGD)	2.94 (EqP, TGD) 3.20 (NOEC <i>Tubifex</i> /AF10)	37 (AF2, TGD)	0.03 (EqP, TGD)	-	-	Ref. 1
QS _{sed}	Not part of priority substances	0.67 (EqP, ARA, Rhine) 9.30 (NOEC- <i>C. riparius</i> /AF100)	- (no QS _{water})	Not part of priority substances	0.03 (EqP, TGD)	Not part of priority substances	-	Ref. 2 Drafts (priority substances only)
SEQ – eau	31	0.20	22	120	0.05	0.002	0.06	Ref. 3 « TEL » values
Canadian ISQGS-TEL	35.7	0.17	<i>In dev.</i>	123	0.05	0.003	0.03	Ref. 4 Anthracene value is provisional (from marine ISQG).
CIPR _{RO}	50	0.50	50	190 (AF+ARA, priority substance)	-	-	0.03	Trigger value for re-suspension risk assessment = 4*CIPR _{RO}
TEC	31.6	0.18	22.7	121	0.06	0.002	0.06	Ref. 5 Consensus-based.
Swiss median	27.4	0.14	30.8	86.3	-	-	0.007	Ref. 6 1999-2000 sampling in rivers (n=40)
OSol	40	0.50	50	150	-	-	-	Swiss soil indicative values

Ref. 1 EC, 2003. Ref. 2 Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive Environmental Quality Standards (EQS) - Substance Data Sheet. Ref. 3 MEDD & Agences de l'eau, 2003. Ref. 4 CCME, 2002. Ref. 5 McDonald *et al.*, 2000. Ref. 6 Pardos *et al.*, 2003.